



MAPEAMENTO DAS TEMPERATURAS DO AR NA CIDADE DE ARARAQUARA, SÃO PAULO, BRASIL

Renata A. Barbugli (1); Maurício Roriz (2)

Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

(1) traco@vivax.com.br (2) m.roriz@terra.com.br

RESUMO

Apresenta-se um método para mapear variáveis climáticas em zonas urbanas. Em diferentes estações do ano, as temperaturas do ar foram monitoradas em dezenas de pontos de Araraquara, cidade média do estado de São Paulo, Brasil. Através de foto-interpretação, cada um desses pontos foi caracterizado por parâmetros físicos da paisagem urbana. Análises de regressão indicaram forte influência desses parâmetros sobre as diferenças climáticas observadas entre os pontos. As equações encontradas permitiram estimar as temperaturas que ocorreriam em outros locais da cidade e gerar os mapas térmicos típicos de verão e inverno.

ABSTRACT

This paper presents a method to map climatic variables in urban areas. In different seasons of the year, the air temperatures were monitored in dozens of points of Araraquara, medium city of the state of São Paulo, Brazil. Through photo-interpretation, each one of those points was characterized by physical parameters of the urban landscape. Regression analyses indicated strong influence of those parameters on the climatic differences observed among the points. The found equations allowed to estimate the temperatures that would happen at other places of the city and to generate the typical thermal maps of summer and winter.

1. INTRODUÇÃO

Muitos estudos sobre as temperaturas do ar em centros urbanos adotam seus valores médios, obtidos em estação climatológica local. Quando disponíveis, são mais representativos os dados horários de anos climáticos típicos, ou normais climatológicas, que resultam de um período de trinta anos de observação. Ocorre que apenas algo em torno de 250 cidades brasileiras, ou aproximadamente 22% do total, dispõem de um sistema regular de registro de clima e estas, em sua maioria, contam apenas com uma única estação meteorológica, muitas vezes localizada em aeroportos ou outros pontos da periferia urbana. Os valores assim registrados são usualmente tidos como válidos para a cidade inteira. Inúmeras pesquisas, no entanto, têm encontrado acentuada diversidade climática entre diferentes zonas de uma mesma cidade. (LOMBARDO, 1985; OKE, 1976, 1980, 1996; TARIFA 2001).

A cidade de Araraquara tem 198 mil habitantes e situa-se no centro do Estado de São Paulo, com latitude de 21° 47' sul, longitude de 48° 10' oeste e altitude média de 650 metros. Apesar de ser uma

das principais cidades do interior paulista, somente a partir do ano 2000 são registrados alguns dados climáticos no aeroporto local, mas medidos apenas entre as 6 e as 23 horas. O estudo aqui apresentado sobre as temperaturas desta cidade é parte de pesquisa de mestrado desenvolvido junto à Universidade Federal de São Carlos.

2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para o desenvolvimento desta pesquisa, como Araraquara não dispunha de dados climáticos da área urbana, realizaram-se medições da temperatura do ar em diversos pontos da cidade, comparando-as inicialmente com os dados registrados no aeroporto. As primeiras leituras mostraram diferenças térmicas de até 6°C entre a área urbana e seu entorno imediato.

Foram realizados 5 grupos de medições, em meses representativos de verão e inverno, totalizando 41 locais monitorados. Em todos estes pontos, as temperaturas foram medidas a cada 10 minutos, durante 10 dias consecutivos. Utilizou-se sistemas eletrônicos “Hobo” de aquisição de dados, fabricados nos EE.UU. pela Onset. As primeiras medições revelaram que estes instrumentos são extremamente sensíveis às radiações térmicas, mesmo as de ondas longas, em ambientes internos. Para evitar que estas radiações afetassem as temperaturas registradas, os aparelhos foram instalados à sombra e no interior de recipientes de alumínio, com orifícios que permitissem a livre circulação do ar (Figura 1). A escolha dos locais a serem monitorados foi feita a partir da caracterização das diferentes tipologias de paisagem urbana, considerando dados de altimetria, densidade de ocupação, projeção da área construída, revestimento do solo, proximidade de água e presença de vegetação. A tabela 1 e a figura 2 mostram os pontos e os períodos de monitoramento.



Figura 1: Registrador Hobo e sua proteção

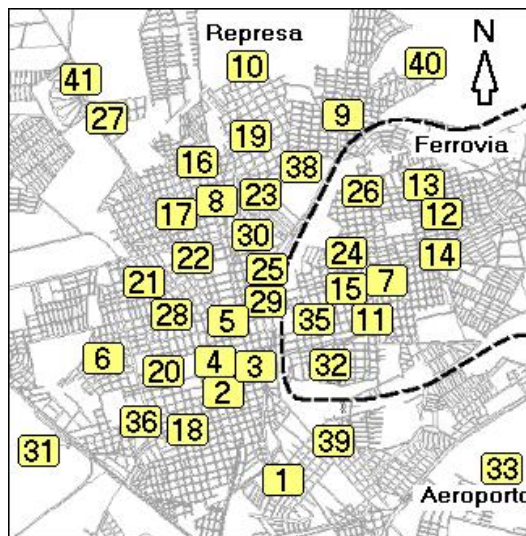


Figura 2: Localização dos pontos monitorados

Tabela 1: Pontos monitorados e respectivos períodos

Grupo	Pontos	Período
G1	1 a 10	23/06 a 03/07 de 2002
G2	11 a 19	06 a 15/08 de 2002
G3	20 a 27	25/11 a 04/12 de 2002
G4	28 a 33	30/06 a 10/07 de 2003
G5	36 a 41	06 a 11/09 de 2003

2.1 Estação de Referência

As temperaturas do ar (TBS) nos pontos 7, 8 e 9 (tab. 2 e fig. 3) foram medidas em duas épocas e indicaram que as diferenças de temperaturas entre os pontos mantinham-se praticamente constantes ao longo do ano. Assim, o ponto 9 foi adotado como referência, sendo monitorado simultaneamente aos demais, fato que permitiu comparar-se situações registradas em diferentes períodos do ano.

Tabela 2: Diferenças de TBS entre pontos

mês	Min8-Min9	Max8-Max9
Jun	18.7-18.3 = 0.4	24.7-26.0 = -1.3
Nov	24.4-24.2 = 0.2	33.3-35.0 = -1.7
mês	Min7-Min9	Max7-Max9
Jun	16.4-18.3 = -1.9	28.3-26.0 = 2.3
Nov	22.2-24.2 = -2.0	37.3-35.0 = 2.3



Figura 3: Localização dos pontos 7, 8 e 9

2.2 Tratamento dos Dados

Primeiramente, foram calculadas as médias horárias das temperaturas registradas com intervalos de 10 minutos. Em seguida, para caracterizar as temperaturas típicas de cada ponto, foi definido um dia médio do período de maior estabilidade climática de cada seqüência de dias monitorados, evitando-se os desvios que seriam provocados por eventuais frentes frias. A temperatura de cada hora desse dia típico foi calculada como média aritmética entre os valores observados, no mesmo ponto e na mesma hora, durante todo o período estável.

Como permaneciam constantes durante o ano as diferenças simultâneas (ΔT) entre as temperaturas do ponto 9 e as de cada um dos outros, todas as temperaturas foram normalizadas em relação às registradas no ponto 9. A equação 1 e a tabela 3 ilustram esse cálculo para temperaturas mínimas:

$$\Delta T_{\min} = T_{\min} (N) - T_{\min} (9) \quad [\text{equação 1}]$$

Tabela 3: Diferenças de temperatura em junho (°C)

ponto (N)	Tmin (N)	Tmin (9)	ΔT_{\min}
1	16.4	18.3	-1.9
2	18.3	18.3	0.0
3	18.7	18.3	0.4
4	17.5	18.3	-0.8

2.3 Parâmetros da Morfologia Urbana

Não se dispunha de tempo nem equipamentos suficientes para monitorar todos os locais necessários à elaboração de mapas com o nível de detalhamento desejado. A solução adotada foi procurar correlações entre as temperaturas do ar e alguns parâmetros de ocupação urbana, supostamente determinantes sobre as diferenças térmicas observadas entre os pontos, ou seja, altimetria, densidade de ocupação, projeção da área construída, área de asfalto, área cimentada, proximidade de água, presença de vegetação e ângulo de incidência solar. Definiu-se, então, uma malha sobre a área urbana e estabeleceu-se que cada célula de 1x1 km deveria conter pelo menos 1 ponto a ser

estudado. Tais definições resultaram em 64 pontos. Para todos eles foram identificados os parâmetros de ocupação e para 41 foram monitoradas as temperaturas (figura 4).

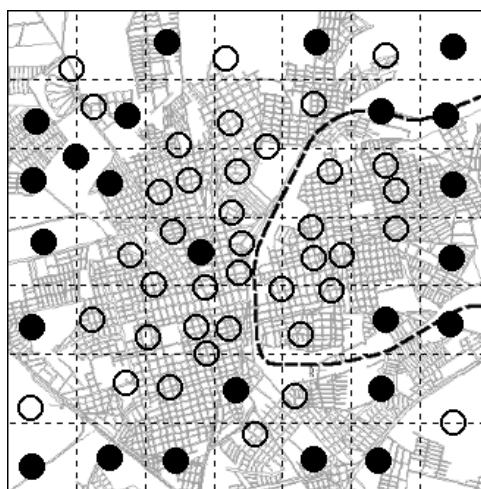
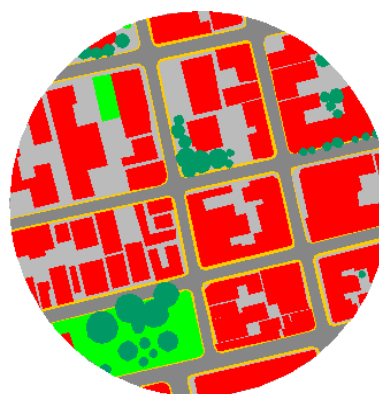


Figura 4: Total dos pontos estudados (os círculos vazios indicam pontos monitorados)

2.4 Quantificação dos Parâmetros Morfológicos



Figura 5: Foto aérea do ponto 3 (R= 150m)



área construída (projeção)	45.0 %
área pavimentada	18.1 %
área gramada	26.1 %
área arborizada	5.0 %
	5.8 %

Figura 6: Parâmetros urbanos do ponto 3

A importância relativa de cada parâmetro da paisagem urbana sobre as temperaturas, poderia ser quantificada pela porcentagem de sua área em relação à área total considerada em cada ponto. Para definir essa área total, seria necessário identificar qual o raio de influência desses parâmetros ao redor de cada ponto monitorado. A existência de um conjunto de árvores, por exemplo, influenciaria o clima em um raio de quantos metros? A resposta foi obtida por meio de sucessivas tentativas, na busca do raio que proporcionasse correlações mais fortes entre temperaturas e parâmetros de ocupação. Resultou desse processo um raio de 150 metros, com base no qual cada parâmetro foi marcado com cor específica sobre foto aérea da cidade (figuras 5 e 6).

2.4.1 O Relevo

As altitudes (figuras 7 e 8) foram identificadas em base digital de dados topográficos, elaborada conforme o método de interpolação de dados geográficos apresentado por Roriz (2002).



Figura 7: Locais monitorados

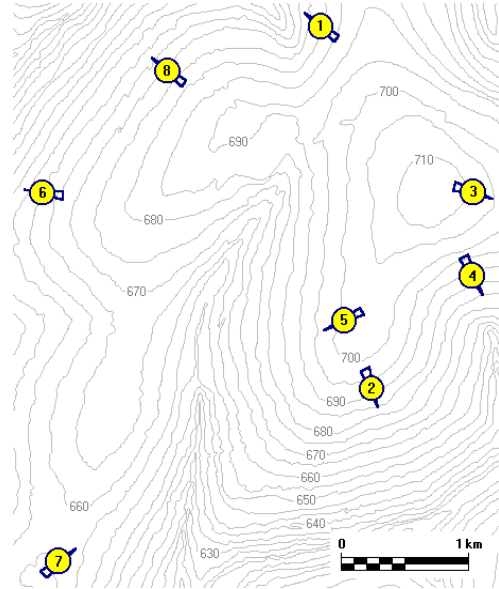


Figura 8: Relevo

2.4.2 Ângulo de Incidência Solar

O ângulo de incidência solar (eq. 2) sobre cada ponto foi calculado para o meio dia do dia típico de cada período. Quanto menor este ângulo, maior a quantidade de radiação que atinge cada unidade de superfície do solo, desempenhando, portanto, influência significativa nas análises pretendidas.

$$I = \text{ArcCos}(A + B) \quad \text{[Equação 2]}$$

Onde:

I: ângulo de incidência solar sobre o solo
 $A = \text{Sen}(\text{Alt}) \cdot \text{Cos}(\text{Dec})$
 $B = \text{Cos}(\text{Alt}) \cdot \text{Sen}(\text{Dec}) \cdot \text{Cos}(\Delta\text{Azi})$
 Alt: altura angular do Sol (fig. 10)

Dec: declividade do terreno (fig. 9)
 ΔAzi : diferença entre os azimutes ($\text{AziSol} - \text{Azi}$)
 AziSol: Azimute do Sol (fig. 10)
 Azi: Azimute do terreno (fig. 9)

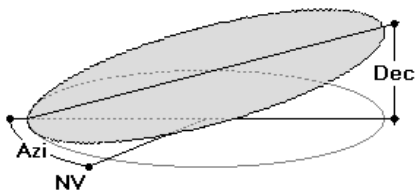


Figura 9: Azimute (Azi) e declividade (Dec)

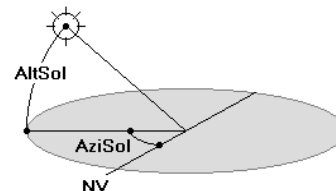


Figura 10: Ângulos da posição relativa do Sol

2.4.3 Índice Indicador de Proximidade de Água

Dois rios cruzam a cidade, mas a principal massa de água é uma represa próxima ao ponto 10. A influência da água foi quantificada por meio de um índice, adimensional, calculado pelo produto entre a área da superfície de água (no interior do círculo de 150 m de raio) e o inverso da distância em relação a cada ponto.

Os números resultantes foram normalizados, sendo atribuído o índice máximo (100) ao ponto 10, situado à beira da represa, e o índice mínimo (18.4) ao ponto 63, no canto inferior esquerdo do mapa, conforme apresentado na figura 11.

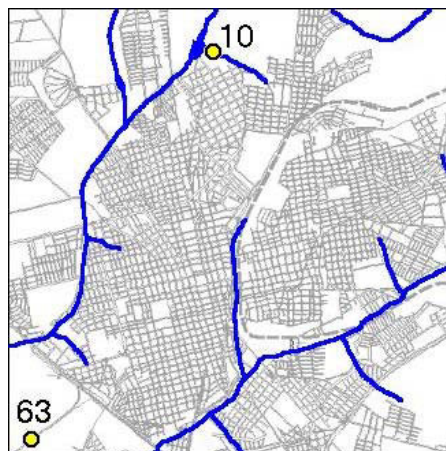


Figura 11: Hidrografia e Pontos 10 e 63

2.4.4 Densidade Demográfica

O número de habitantes por hectare foi obtido a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2001).

3. ANÁLISES QUANTITATIVAS

Com base nas temperaturas dos 41 locais monitorados e nos parâmetros urbanos dos 64 pontos, a primeira tentativa foi realizar análises de regressão linear múltipla para estimar a temperatura nos 23 pontos não medidos. Tais dados seriam suficientes para o processo final de interpolação que geraria os mapas térmicos típicos de inverno e verão. Estas primeiras análises, no entanto, indicaram que não seria possível encontrar uma equação única que fosse aplicável a todos os pontos, sendo necessário dividi-los em grupos com características mais homogêneas. Essa divisão foi feita através da análise estatística de Cluster.

3.1 Análise Estatística de Cluster

O propósito deste algoritmo é agrupar elementos similares de um conjunto através de alguma medida de semelhança ou distância. Um resultado típico deste tipo de agrupamento é a árvore hierárquica (figura 12), onde a similaridade que define a associação dos objetos é determinada pelo método matemático da distância Euclidiana. A identificação dos agrupamentos é realizada pela leitura do diagrama. Os números à esquerda indicam a escala de observação, enquanto a linha inferior identifica os nomes dos objetos agrupados. Quanto menor a escala de observação, maiores são as semelhanças entre os objetos. A análise de Cluster foi aplicada aos 64 pontos, em função dos parâmetros urbanos e do ângulo de incidência solar para o meio dia do dia típico de inverno (27 de Junho), resultando em 3 agrupamentos. O primeiro, continha apenas o ponto 10 (índice máximo de água), o segundo incluía os pontos com menores densidades de ocupação, situados principalmente no perímetro urbano e o terceiro, os pontos das regiões mais centrais da cidade (figura 12). Os valores médios dos parâmetros de cada um dos agrupamentos estão indicados na figura 13.

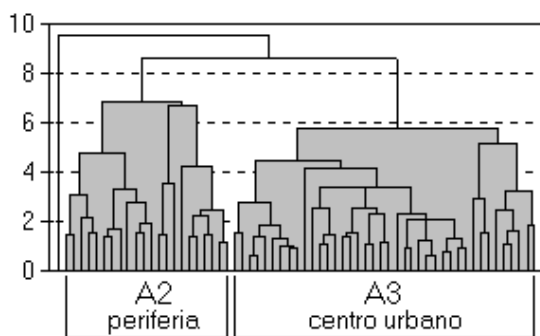


Figura 12: Resultados da análise de Cluster

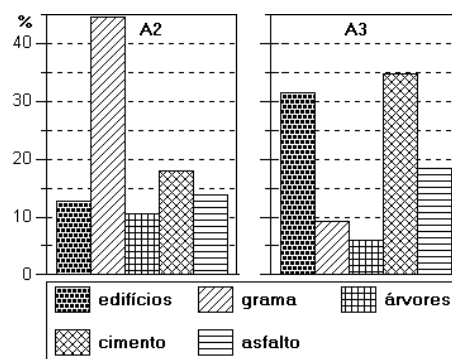


Figura 13: Parâmetros urbanos médios dos agrupamentos

A tabela 4 mostra os pontos dos agrupamentos identificados para o dia típico de inverno.

Tabela 4: Pontos agrupados na escala 7 de Cluster

	Pontos monitorados	Pontos não monitorados
A 1	10	
A 2	25, 31, 32, 33, 40, 41.	45, 46, 48, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 63, 64, 65, 66.
A 3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 35, 36, 38, 39.	47, 49, 54, 55, 61, 62, 67, 68, 69.

3.2 Análises de Regressão

Para cada agrupamento, foram realizadas novas análises de regressão linear múltipla, buscando identificar correlações entre as temperaturas e os parâmetros de ocupação, de modo a permitir que fossem estimadas as temperaturas dos pontos não monitorados. Primeiramente foi analisado o agrupamento 2, que reunia os pontos localizados no perímetro urbano. As melhores correlações foram encontradas para as diferenças (ΔT_{min} e ΔT_{max}) entre a temperatura de cada ponto e a da estação de referência, sendo tais diferenças calculadas pela equação 1. As figuras 14 e 15 mostram os resultados.

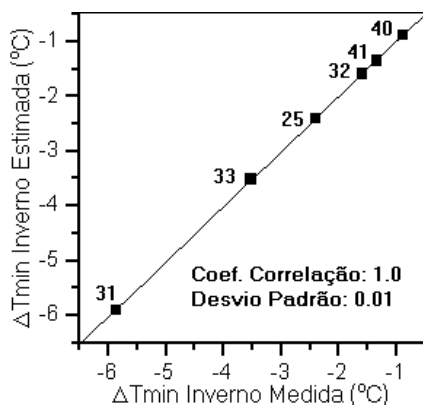


Figura 14: Valores medidos e estimados do ΔT_{min} de inverno no agrupamento 2.

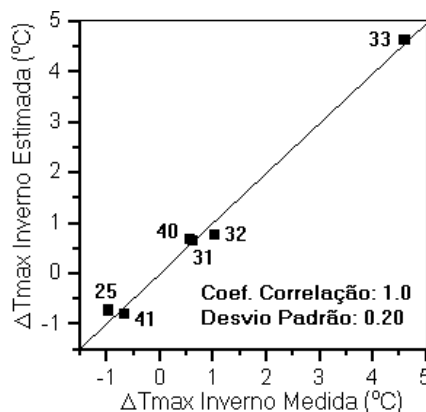


Figura 15: Valores medidos e estimados do ΔT_{max} de inverno no agrupamento 2.

As equações de regressão das retas apresentadas nas figuras 14 e 15 são as seguintes:

$$\Delta T_{\min} = -7,8 - 0,09A - 0,03B + 0,35C + 0,21D \quad [\text{Equação 3}]$$

$$\Delta T_{\max} = 111,04 - 0,23A - 0,17E - 0,16F \quad [\text{Equação 4}]$$

Sendo:

A = Porcentagem de área de árvores
 B = Porcentagem de área gramada
 C = Indicador de água

D = Diferença entre o ângulo de incidência solar no ponto e na estação de referência.
 E = Porcentagem de área cimentada
 F = Altitude do ponto

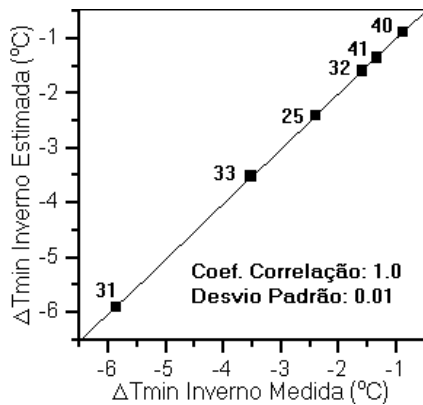


Figura 14: Valores medidos e estimados do ΔT_{\min} de inverno no agrupamento 2.

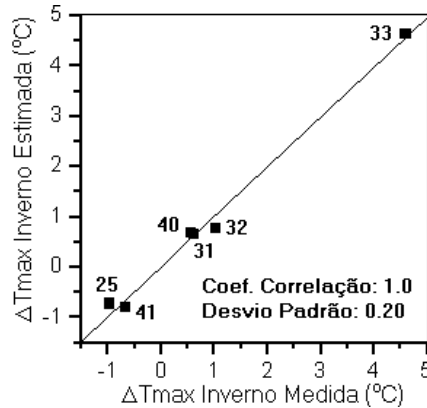


Figura 15: Valores medidos e estimados do ΔT_{\max} de inverno no agrupamento 2.

Para melhorar as correlações do agrupamento 3, foi necessário reduzir a escala de observação da análise de Cluster, sendo adotado o nível 3. Este fato deriva da maior complexidade morfológica do centro urbano. Com a nova distribuição, o número máximo de pontos não monitorados por agrupamento restringiu-se a 2. Os valores de ΔT , calculados pelas equações 3 e 4, permitiriam estimar as temperaturas mínimas e máximas de inverno para outros pontos da cidade, com base nas mínimas e máximas da estação de referência e nos parâmetros urbanos de cada ponto.

Tais estimativas, no entanto, seriam válidas somente para o inverno monitorado, havendo o risco de que aquele ano fosse atípico em relação ao clima local. Entre os diversos processos usados para identificar a tipicidade de anos climáticos, o mais simples é através das Normais Climatológicas, formadas pelas médias de dados observados ao longo de 30 anos, mas não disponíveis para a cidade de Araraquara. Optou-se, então, por uma base de dados do IPCC, “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC, 2001), compilação de médias mensais medidas entre 1961 e 1990 em inúmeros países, interpoladas para cada 0,5 grau de latitude e longitude. A figura 16 permite comparar estas médias históricas com os valores diurnos medidos durante 2 anos no aeroporto da cidade.

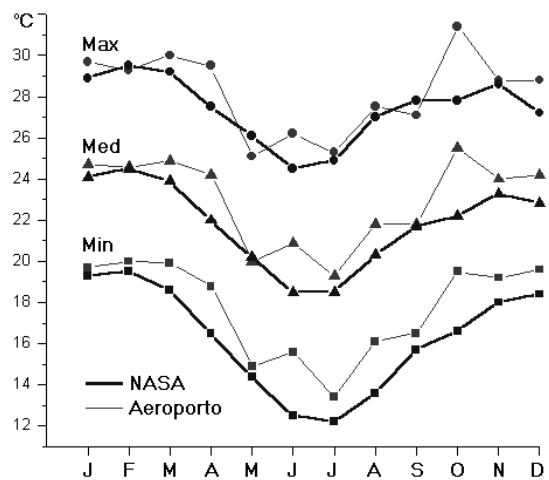


Figura 16: Normais de temperatura (IPCC) e valores medidos no aeroporto local.

Adotando-se as Normais do IPCC como típicas do clima local, foi calculado um fator de ajuste para corrigir as temperaturas dos 64 pontos.

3.2.1 Fatores de Ajuste da Tipicidade Climática

O fator de ajuste foi calculado para o ponto 33 (aeroporto) e aplicado aos demais pontos. Assim, FTmin é o fator de ajuste das temperaturas mínimas de inverno (junho), calculado através da equação 5:

$$FT_{min} = T_{minIPCC} / T_{min33} \quad [Equação 5]$$

$$T_{minIPCC} = 12.5 \text{ °C} / T_{min33} = 17.1 \text{ °C}$$

$$FT_{min} = 12.5/17.1 = 0.73$$

O FTmax é o fator de ajuste das temperaturas máximas de inverno, obtido pela equação 6.

$$FT_{max} = T_{maxIPCC} / T_{max33} \quad [Equação 6]$$

$$T_{maxIPCC} = 24.5 \text{ °C} / T_{max33} = 27.4 \text{ °C}$$

$$FT_{max} = 24.5/27.4 = 0.894$$

Procedimento semelhante foi aplicado ao período de verão (fevereiro).

4. RESULTADOS OBTIDOS

Sobre as temperaturas assim calculadas para os 64 pontos, aplicou-se o método de interpolação de dados geográficos apresentado por Roriz (2002), obtendo-se as estimativas para qualquer ponto da cidade que permitiram gerar os mapas climáticos típicos para inverno e verão (Figuras 17 a 20).

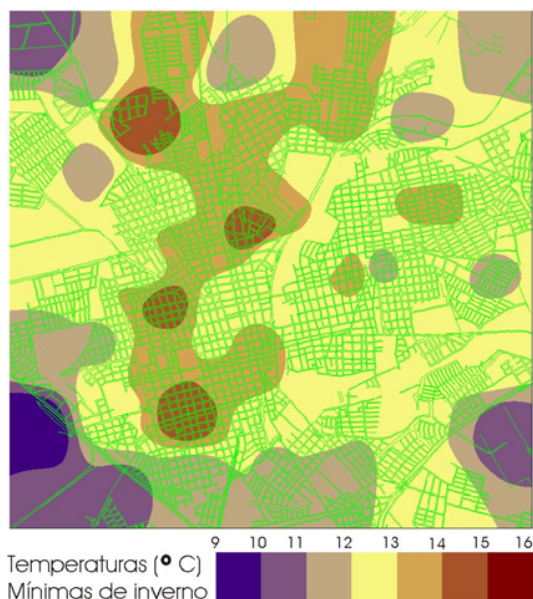


Figura 17: Temperaturas mínimas de Junho

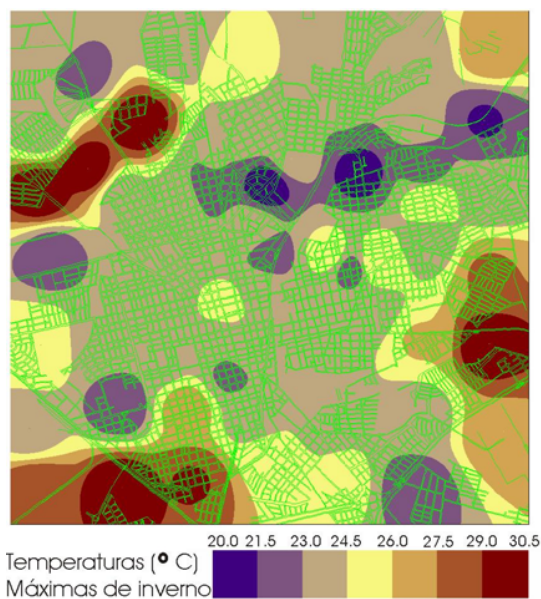


Figura 18: Temperaturas máximas de Junho

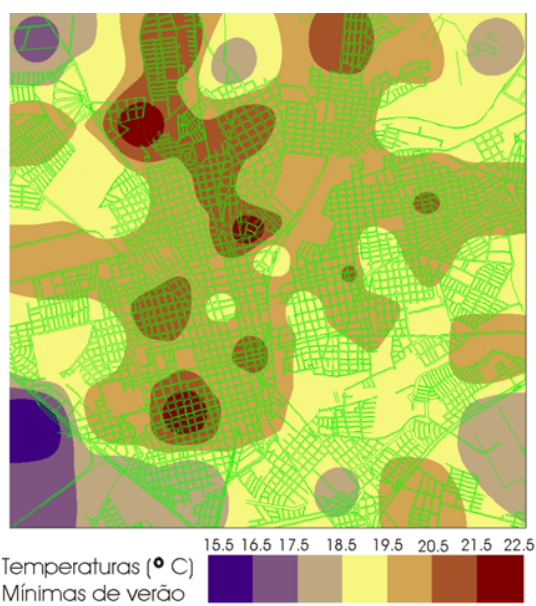


Figura 19: Temperaturas mínimas de Fevereiro

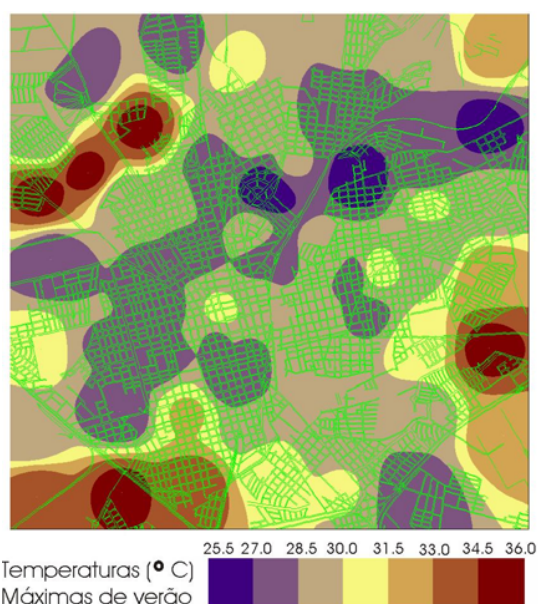


Figura 20: Temperaturas máximas de Fevereiro

5. CONCLUSÕES

As cidades são organismos extremamente dinâmicos, onde as interações entre homem e natureza estabelecem complexa diversidade de tipologias morfológicas. O estudo apresentado confirma a forte influência exercida por estas tipologias sobre a formação dos microclimas no interior da cidade, podendo torná-los mais amenos ou mais hostis para a vida de seus habitantes.

Neste sentido, desvendar causas e efeitos do clima urbano é desafio inadiável para os pesquisadores do ambiente construído. A qualidade do espaço urbano depende desse conhecimento, através de sua aplicação nos processos de gestão e planejamento das cidades, elevando os níveis de conforto ambiental e reduzindo os desperdícios de energia.

Quando realizado de maneira sistemática, o monitoramento da temperatura do ar no interior da cidade pode ser um instrumento eficaz para o diagnóstico e a hierarquização dos parâmetros morfológicos que interferem mais intensamente na formação dos microclimas.

Além da temperatura do ar, estudos mais completos deverão investigar outras variáveis climáticas, como a umidade relativa, a radiação solar e a ventilação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBUGLI, Renata A. “Influência do ambiente construído na variação de temperatura do ar em Araraquara, S.P”. Tese (mestrado). UFSCar. 2004.

LOMBARDO, Magda A. Ilhas de Calor nas Metrôpoles: O Exemplo de São Paulo. São Paulo: Editora Hucitec – Lalekla S.A. 1985.

IBGE. Censo Demográfico 2000. Rio de Janeiro, IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas / Departamento de População e Indicadores Sociais. IBGE, 2001. (arquivo eletrônico).

IPCC, 2001. “0.5 Degree 1961-1990 Mean Monthly Climatology”. DDC-IPCC. Data Distribution Centre of Intergovernmental Panel on Climate Change. [<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>]

OKE, T.R. "The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands". *Atmosphere*, V.14, n.4, p.269 –277,1976.

OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*. Second Edition. New York: Routledge, p. 3-76; 272-303. 1996

OKE, T.R.; KALANDA, B.D. & STEYN, D.G. "Parameterization of heat storage in urban areas" *Urban Ecology*, 5 (1980/81), pg. 45-54.

RORIZ, Maurício. "Un Método y un Ejemplo de Interpolación Geográfica de Temperaturas y Humedades". Páginas 205 a 214. in "Estudios de Arquitectura Bioclimática". Anuario 2002. Vol. 4., 240 páginas. Compilador: Manuel Rodríguez Viqueira. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Limusa Noriega Editores. México, D.F. México. 2002. ISBN 968-18-6414-X

TARIFA, José Roberto e ARMANI, Gustavo. Os climas urbanos. In: Os climas na cidade de São Paulo – teoria e prática São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 2001. GEOUSP. p. 47-70.