

Licinia Caldeira Balkestahl *

Estrutura espaciotemporal da Ilha de Calor Urbano (Porto)

Resumo:

Este trabalho tem por objectivo efectuar um estudo descritivo e de caracterização da evolução espaciotemporal da Ilha de Calor Urbano na freguesia de Paranhos, cidade do Porto. Procura-se analisar a evolução temporal, a estrutura espacial, assim como o estabelecimento das eventuais relações entre as principais propriedades da Ilha de Calor Urbano e as situações sinópticas que lhe estão superiormente associadas.

Para um desenvolvimento mais eficaz do nosso trabalho procedemos à formulação dos seguintes objectivos parciais:

1.1 Determinar a estrutura espacial da Ilha de Calor Urbano, ao longo de uma determinada secção através da freguesia de Paranhos-Porto (cortes aproximadamente N-S e W-E).

1.2 Determinar a estrutura espaciotemporal da Ilha de Calor Urbano, ao longo de uma determinada secção através da freguesia de Paranhos-Porto (cortes aproximadamente N-S e W-E).

1.3 Determinar o ritmo da variação diurna da Ilha de Calor Urbano,

* Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Departamento de Geografia, Portugal.
Email: balkestahl@mail.telepac.pt.

tanto quanto possível sob condições meteorológicas distintas, durante diferentes épocas do ano.

1.4 Determinar a variação da estrutura espaciotemporal da Ilha de Calor Urbano, sob diferentes situações sinópticas.

Concluimos que existe Ilha de Calor de magnitude considerável e variável, sobretudo nas áreas com maior densidade de edifícios, menor *svf* e de mais trânsito rodoviário. Habitualmente, as situações sinópticas de estabilidade potenciam e as de instabilidade atenuam/inibem a existência da Ilha de Calor. No entanto, esta relação não é linear pois ocorrem situações de relativa instabilidade que não só admitem a ocorrência de ICU como até podem corresponder a algumas das situações de ICU de magnitude mais elevada.

Palavras-chave: Ilha de Calor Urbano(ICU), sky view factor (*svf*), situação sinóptica, máxima intensidade da ICU

Abstract:

This work aims at making a descriptive study and characterization of spatial-temporal evolution of the Urban Heat Island in the parish of Paranhos, city of Porto. It seeks to analyze the temporal evolution, the spatial structure and the establishment of any relationships between the main properties of the Urban Heat Island and the synoptic situations which are linked with them.

For a more effective development of our work we proceeded to the formulation of the following partial objectives:

1.1. To determine the spatial structure of the Urban Heat Island over a section through the parish of Paranhos-Porto (section approximately N-S and W-E).

1.2. To determine the structure of space-time Urban Heat Island over a section through the parish of Paranhos-Porto (section approximately N-S and W-E).

1.3. To determine the rate of diurnal variation of the Urban Heat Island, as far as possible under different weather conditions, during different seasons.

1.4. To determine the variation of space-time structure of the Urban Heat Island, under different synoptic situations.

We concluded that there is a heat island of considerable and variable magnitude, especially in areas with higher density of buildings, lower SVF and more traffic. Usually, the synoptic situations of stability promote the UHI and those of instability attenuate / inhibit the existence of the Urban Heat Island. However, this relationship is not linear because there are situations of relative instability that not only admit the occurrence of UHI but also may even match some of the UHI situations of higher magnitude.

Keywords: Urban Heat Island (UHI), sky view factor (SVF), synoptic situation, maximum intensity of UHI

1. Introdução

Na actualidade, uma parte muito considerável da população mundial vive em cidades ou em meio urbanizado: desta forma, a atmosfera urbana configura uma componente fundamental do suporte biogeofísico de grande parte da população do mundo, tendendo esta a aumentar ainda mais no futuro. Sendo assim, há toda a conveniência em aproximar sustentabilidade e governança para que a política urbana, numa perspectiva socioambiental, possa responder de forma eficaz à complexa tarefa de gerir o território¹ no sentido da melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

As actividades humanas em geral e a urbanização em particular, acarretam modificações climáticas, sobretudo aos níveis das escalas local e microescala. Provocam emissões acrescidas de gases que eventualmente intensificam o “efeito de estufa” natural da atmosfera e que actuam na catalização de reacções químicas, bastante agressivas para a camada de ozono estratosférico. Tendo em vista que muitos desses

1. Fernandes, J.A.R., *Urbanismo sustentável: pela redução, reciclagem e reutilização da cidade*. Revista da FLUP, II Série, Volume I, 2007-pp. 161-176.

gases, além de poluentes, contribuem selectiva e eficazmente para o aprisionamento das radiações de grande comprimento de onda, nomeadamente as da banda do infra-vermelho, é lícito dizer-se que as acções antrópicas têm concorrido directamente para alterar a composição química da atmosfera e, indirectamente, para modificar o comportamento de alguns elementos do sistema climático²: em primeiro lugar são afectadas a temperatura do ar exterior e a velocidade do vento mas também a humidade do ar, a nebulosidade e a precipitação.

O clima urbano local dever ser entendido como parte integrante de um sistema climático em interacção dinâmica e permanente com os subsistemas climáticos de nível superior (mesoclimáticos) e de nível inferior (microclimáticos); não existe como entidade isolada e deve ser encarado numa perspectiva sistémica da Climatologia, cujo resultado final depende da acção conjunta do Homem e da Natureza (A. Koestler citado por C. Monteiro, 1976).

No início do século XIX foi efectuado um estudo (L. Howard, *The Climate of London*, Longman, Londres, 1818)³ em que se mediram diferenças de temperatura em diversos locais da cidade de Londres; e, posteriormente, durante as primeiras décadas do século XX, procedeu-se a estudos sobre outros aspectos do clima urbano, não só de temperatura, mas também da humidade do ar, da nebulosidade, da radiação, da precipitação e do vento. Segundo A. Kratzer (1937) as primeiras medições itinerantes de temperatura realizadas com recurso a um veículo automóvel – método clássico de aquisição de dados nos estudos de clima urbano – teriam sido efectuadas por Wilhelm Schmidt em Viena, na década de 1930. Mas Rudolf Geiger (1961) refere que o método foi utilizado pela primeira vez simultaneamente por Wilhelm Schmidt em Viena e A. Pepler em Karlsruhe, em 1929⁴.

2. Cf. Relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Citado por Monteiro, A., Perceptibilidade, risco e vulnerabilidade em Climatologia, Territorium, Minerva, Coimbra, 1995, pág. 55.

3. Cf. Ganho, Nuno, "Este facto foi evidenciado pela primeira vez em 1918 por L. Howard quando constatou que as temperaturas no interior de Londres são superiores às que se verificam na periferia da cidade", citando T. J. Chandler, 1962, em *Territorium* 2:1995, Coimbra, pág. 33.

4. Geiger, Rudolf, *Manual de Microclimatologia – O Clima da Camada de Ar Junto ao Solo*, 2ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 1990, pág. 502.

Na actualidade, além dos estudos sobre o fenómeno da Ilha de Calor Urbano, a pesquisa internacional sobre clima urbano tem sido também muito direccionada para estudos sobre o comportamento do vento, investigação na área do equilíbrio energético da atmosfera urbana, mitigação de efeitos, assim como modelação teórica e matemática da dinâmica da atmosfera urbana.

Ao longo dos tempos e em diversas cidades do mundo⁵ foram realizados estudos com o objectivo de demonstrar a existência de ilha de calor urbano, quer em cidades de grandes dimensões, quer em cidades de média dimensão. A chamada ilha de calor urbano constitui uma anomalia térmica positiva que se verifica entre as áreas urbanas e as áreas rurais circundantes, resultante da intervenção antrópica e da consequente alteração do balanço energético, e que é especialmente favorecida em situações sinópticas de maior estabilidade. A literatura internacional sobre o tema da ilha de calor urbano baseia-se preponderantemente em pesquisas levadas a efeito em cidades já consolidadas, à excepção do estudo sobre Columbia, Maryland (Landsberg, 1979).

A área de estudo contemplada neste trabalho localiza-se no NW de Portugal: a freguesia de Paranhos integra-se na parte NE da cidade do Porto. A cidade tem aproximadamente 300 000 habitantes e desde há cerca de 40 anos vem sofrendo um processo acelerado de urbanização. Insere-se na fachada atlântica do Noroeste da Península Ibérica, na zona das latitudes médias afectadas alternadamente pelos centros de acção subpolar e subtropical do hemisfério norte, pelo que revela características climáticas temperadas mas sujeita à grande variabilidade tipicamente mediterrânica; a sua integração num território da margem meridional da zona temperada do norte confere-lhe influências da circulação proveniente do norte de África, enquadrando-se segundo Alcoforado⁶ no domínio bioclimático atlântico.

5. Londres, Chandler, 1965; Nova Iorque, Bornstein, 1968; St. Louis, Changnon Jr., 1978; Montreal, T. Oke, 1975; Columbia, Maryland, Landsberg, 1979; Uppsala, A. Sunborg, 1950 e R. Taesler, 1980; Madrid, A. López Gómez, 1984; Lisboa, M.J. Alcoforado, 1986; Porto, A. Monteiro, 1993; Coimbra, Ganho, N., 1995.

6. Conjuntamente com outros autores (M. J. Alcoforado *et al.*, 1982) foram combinados os índices de Gaussen e Emberger para definir cinco domínios climáticos com base nos dias biologicamente secos.



FIGURA 1: PLANTA DA CIDADE

Os resultados que relatámos em 2005⁷, obtidos com recurso a medições itinerantes, vieram comprovar, a uma escala mais pormenorizada, os resultados de estudos anteriores⁸⁻⁹ sobre a ocorrência de Ilha de Calor Urbano em distintos locais da área de Paranhos-Porto. Pretendemos agora efectuar um estudo que privilegiasse a estrutura espaço-temporal da ICU, através da recolha de dados em postos fixos, em cortes aproximadamente N-S e W-E, aplicando uma metodologia que, além de incidir sobre diferentes espaços da cidade com características distintas, permitisse também anular o efeito do factor altitude¹⁰ na variação térmica, uma vez que estamos convictos de que a anulação do referido factor¹¹ nos permitirá determinar com maior rigor a real magnitude e a efectiva evolução temporal da Ilha de Calor Urbano na área de estudo.

7. Balkeståhl, L., Os efeitos da intensificação dos processos de urbanização no balanço energético local: Estudo de caso no pólo da Asprela, tese de mestrado, FLUP, Porto, 2005.

8. Monteiro, Ana., *O Clima Urbano do Porto*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1997.

9. Góis, Joaquim, *Contribuição dos Modelos Estocásticos para o Estudo da Climatologia Urbana*, FEUP, Porto, 2002

10. Andersson, K., C., Ekeblad, *Högsommardagar i Sverige 1917-2003*. Department of Physical Geography, Earth Sciences Centre Göteborg University, Göteborg, 2004

11. A maior parte dos primeiros estudos sobre ilha de calor urbano realizaram-se em cidades caracterizadas por topografia bastante uniforme mas justifica-se esta metodologia dado que a cidade do Porto apresenta diferenças de altitude razoáveis e é conveniente reportar os dados a um referencial comum.

2. Metodologia

2.1. Aquisição de dados

Foram efectuadas medições de temperatura em postos fixos previamente escolhidos, ao longo de perfis traçados através da freguesia de Paranhos-Porto, aproximadamente nas direcções N-S e W-E.

As medições foram levadas a cabo sistemática e continuamente durante o período de 21 de Agosto de 2004 até 17 de Fevereiro de 2005¹². Desta forma esperava-se obter uma quantidade suficiente de dados para o cumprimento dos dois objectivos acima enunciados (características da Ilha de Calor Urbano e estabelecimento das suas relações com as situações sinópticas).

O número de postos fixos, tendo em conta a extensão dos referidos perfis, considerou-se que deveria ser no mínimo de sete¹³. A localização dos postos de medição de temperatura foi escolhida com base no critério de que deveria ser representativa de áreas com diferentes densidades de ocupação do solo e de diferentes altitudes. No sentido de tentar apreender a magnitude máxima da Ilha de Calor Urbano, é especialmente importante localizar pelo menos um posto de registo tão perto quanto possível da área mais densamente povoada da freguesia de Paranhos.

As medições/registos foram efectuadas na generalidade com recurso a sondas térmicas armazenadoras de dados (dataloggers Tinytalk)¹⁴ de

12. O período total de registos estende-se desde 04/04-2004 até 24/08-2005 mas infelizmente só existem registos contínuos para a totalidade dos postos de aquisição, no período acima referido.

13. A sonda colocada na área do ISEP desapareceu após 1º registo feito em 14/ 08-2004 às 18:59 e calcula-se que deve ter sido subtraída durante 1ª quinzena de Setembro (?).

14. No prosseguimento da recolha de dados serão utilizados dataloggers do tipo Tinytag e também duas sondas armazenadoras de dados modelo Tinytag Plus 2 (TGP 4500); estes últimos, além da temperatura registam ainda humidade relativa. Apesar de não ser fácil – nem necessário neste caso – obter dados de humidade relativa, a medição desta variável em dois pontos pode vir a revelar-se útil quer para a análise de resultados, quer para a interpretação das situações sinópticas. O modelo de sonda Tinytag Plus 2 tem um dador incorporado com um tempo de resposta de 25 minutos, o que é bastante lento mas mesmo assim permite acompanhar as variações diárias mais características; as alterações locais mais rápidas não se poderão discernir mas, em caso de necessidade, pode adaptar-se um dador externo especialmente montado para o efeito.

grande capacidade de memória, que permitem efectuar registos de hora a hora ou a cada meia hora. Desta forma minimiza-se a necessidade de excessivos momentos de descarga de dados e de medições itinerantes. A hora de medição/registo foi programada de forma a que fosse tanto quanto possível coincidente com as horas de registo das observações sinópticas da estação de Aeroporto-Pedras Rubras (estação de referência escolhida).

A descarga de dados das sondas armazenadoras é feita através do programa Tinytag Explorer (Windows). Este programa pode ser utilizado para a construção de tabelas de dados e para apresentações gráficas mas também se podem exportar os dados do program Tinytag Explorer directamente para uma folha de cálculo tipo EXCEL.

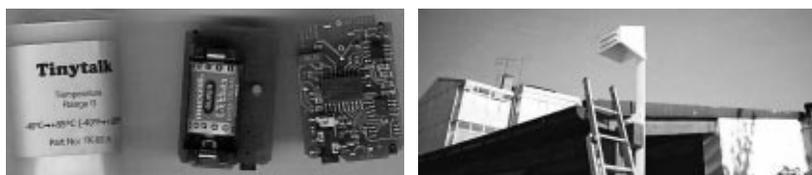


FIGURA 2: SONDA TÉRMICA TINYTALK UTILIZADA NOS POSTOS FIXOS E POSTO DE MEDIÇÃO (JUNTA DE PARANHOS)

Os dados adquiridos desta forma foram complementados por dados da estação meteorológica de Porto-Pedras Rubras, tendo sido recolhidos num período considerado suficientemente longo para serem representativos de situações sinópticas diversas, em diferentes épocas do ano. Foram também efectuadas medições itinerantes, em percurso pré-definido que permitiram complementar/confirmar os dados dos postos fixos (e a sua eventual cartografia com recurso às técnicas da geoestatística).

As situações sinópticas diárias foram documentadas através da aquisição de dados de cartas sinópticas e fotos de satélite (essencialmente DWD, British Met Office e NOAA-17): foram gravadas/analizadas as cartas sinópticas de superfície de UKMO e como complemento à análise sinóptica foram também registadas e analisadas fotografias do satélite NOAA-17.

A análise das medições efectuadas nestes postos fixos teve também a finalidade de testar a metodologia proposta, a qual poderá assim ser alargada a outras áreas da cidade do Porto.

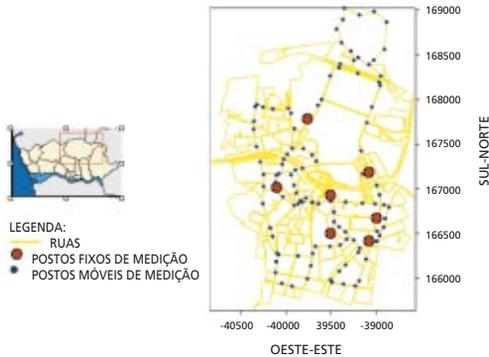


FIGURA 6: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, POSTOS DE RECOLHA DE DADOS, FIXOS E MÓVEIS

2.2. Crítica e pré-processamento Tratamento preliminar e compilação

2.2.1. Os dados resultantes das medições nos diferentes postos foram compilados em folha de EXCEL de acordo com o seguinte modelo:

Temperaturas Medidas

Dia	Data			Hora	A-125m	B-139m	C-148m	D-130m	E-115m	G-141m	Aerop-77m
					T°C						
Samedi	21	08	2004	12:00	24,5	21,6	22,3	28,4	24,8	27,4	24,0
Samedi	21	08	2004	13:00	27,4	24,8	24,1	30,7	25,2	28,4	24,0
Samedi	21	08	2004	14:00	28,4	27,7	25,2	30,7	25,2	29,6	24,0
Samedi	21	08	2004	15:00	27,4	28,8	24,8	28,1	23,7	28,4	25,0
Samedi	21	08	2004	16:00	27,0	30,7	25,2	27,7	23,4	27,0	24,0
Samedi	21	08	2004	17:00	27,4	32,2	26,6	28,1	23,0	27,4	23,0

Jeudi	17	02	2005	20:00	9,1	9,9	9,9	8,8	9,1	5,8	8,0
Jeudi	17	02	2005	21:00	8,0	9,1	8,8	7,3	8,0	5,0	8,0
Jeudi	17	02	2005	22:00	6,9	8,0	8,0	6,5	7,7	5,4	6,0
Jeudi	17	02	2005	23:00	6,9	7,7	7,7	6,2	7,3	6,2	7,0
Vendredi	18	02	2005	00:00	6,5	7,3	7,3	6,5	6,5	6,2	6,0

TABELA 1: TEMPERATURAS REGISTRADAS HORA A HORA

2.2.2. Os valores de temperatura medidos em cada posto e os valores registados na estação de Porto-Pedras Rubras foram corrigidos ao nível do mar¹⁵.

A correção da altitude faz-se para, ao recalculer as temperaturas medidas, reduzindo-as ao nível médio das águas do mar, obter um referencial comum, segundo a seguinte expressão:

$$\Theta = T_{corr} = T + \Delta z * 0,98/100$$

em que Θ é a temperatura potencial e Δz é a altitude acima do nível médio das águas do mar.

Os dados corrigidos foram compilados em nova tabela de EXCEL (tabela 2) de acordo com o seguinte modelo:

Temperaturas potenciais reduzidas ao nível médio das águas do mar

Dia	Data			Hora	A-125m	B-139m	C-148m	D-130m	E-115m	G-141m	Aerop-77m
					Θ°C	Θ°C	Θ°C	Θ°C	Θ°C	Θ°C	
Samedi	21	08	2004	12:00	25,7	23,0	23,8	29,7	25,9	28,8	24,8
Samedi	21	08	2004	13:00	28,6	26,2	25,6	32,0	26,3	29,8	24,8
Samedi	21	08	2004	14:00	29,6	29,1	26,7	32,0	26,3	31,0	24,8
Samedi	21	08	2004	15:00	28,6	30,2	26,3	29,4	24,8	29,8	25,8
Samedi	21	08	2004	16:00	28,2	32,1	26,7	29,0	24,5	28,4	24,8
Samedi	21	08	2004	17:00	28,6	33,6	28,1	29,4	24,1	28,8	23,8

Jeudi	17	02	2005	20:00	10,3	11,3	11,4	10,1	10,2	7,2	8,8
Jeudi	17	02	2005	21:00	9,2	10,5	10,3	8,6	9,1	6,4	8,8
Jeudi	17	02	2005	22:00	8,1	9,4	9,5	7,8	8,8	6,8	6,8
Jeudi	17	02	2005	23:00	8,1	9,1	9,2	7,5	8,4	7,6	7,8
Vendredi	18	02	2005	00:00	7,7	8,7	8,8	7,8	7,6	7,6	6,8

TABELA 2: TEMPERATURAS CORRIGIDAS

15. A correção adiabática tem por objectivo nivelar todas as temperaturas relativamente a um referencial comum e, neste caso, optámos por utilizar o nível médio das águas do mar por ser um referencial internacionalmente utilizado; a razão de ter sido sempre utilizado o valor de gradiente de 0,98°C está relacionada com a adiabática seca, pois em situação de ilha de calor muito dificilmente existiria adiabática húmida.

Os valores caracterizadores da Ilha de Calor Urbano entendem-se aqui como sendo as diferenças de temperatura entre os dados da estação de Porto-Pedras Rubras e cada um dos respectivos postos de medição. Os dados obtidos no aeroporto compreendem valores horários de: temperatura do ar, nebulosidade, pressão atmosférica, humidade relativa, direcção e velocidade do vento.

2.2.3. De seguida calcularam-se os desvios térmicos urbanos em cada hora, para cada posto de medição, de acordo com:

$$(\Delta\theta)_U = \theta - \theta_{\text{aerop}}$$

em que $\Delta\theta$ é a temperatura potencial.

Organizaram-se os resultados na Tabela 3, com os mesmos elementos das colunas das tabelas 1 e 2.

Desvios das temperaturas potenciais relativamente ao aeroporto

Dia	Data			Hora	A-125m	B-139m	C-148m	D-130m	E-115m	G-141m
					$\Delta\theta$ °C					
Samedi	21	08	2004	12:00	1,0	-1,8	-1,0	4,9	1,2	4,0
Samedi	21	08	2004	13:00	3,9	1,4	0,8	7,2	1,6	5,0
Samedi	21	08	2004	14:00	4,9	4,3	1,9	7,2	1,6	6,2
Samedi	21	08	2004	15:00	2,9	4,4	0,5	3,6	-0,9	4,0
Samedi	21	08	2004	16:00	3,5	7,3	1,9	4,2	-0,2	3,6
Samedi	21	08	2004	17:00	4,9	9,8	4,3	5,6	0,4	5,0

.....

Jeudi	17	02	2005	20:00	1,6	2,5	2,6	1,3	1,5	-1,6
Jeudi	17	02	2005	21:00	0,5	1,7	1,5	-0,2	0,4	-2,4
Jeudi	17	02	2005	22:00	1,4	2,6	2,7	1,0	2,1	0,0
Jeudi	17	02	2005	23:00	0,4	1,3	1,4	-0,3	0,7	-0,2
Vendredi	18	02	2005	00:00	1,0	1,9	2,0	1,0	0,9	0,8

TABELA 3: DESVIOS TÉRMICOS NOS DIFERENTES POSTOS DE MEDIÇÃO, RELATIVAMENTE À ESTAÇÃO DE PORTO-PEDRAS RUBRAS

Como critério para a existência de Ilha de Calor Urbano, defini-
mos preliminarmente que é satisfeita, em algum momento e em algum
ponto de medição, a seguinte condição¹⁶:

$$(\Delta\theta)_u \geq + 2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Após as análises preliminares, no entanto, verificou-se que este
critério poderá ter de ser reconsiderado para futura investigação, uma
vez que situações de Ilhas de Calor significativas, quer no espaço quer
no tempo, ficaram excluídas da análise perante a utilização deste critério.

2.2.4. Tendo como ponto de partida os valores do *sky view-factor*
bi-dimensional que foi por nós calculado em trabalho anterior¹⁷, calcu-
laram-se os valores do *sky view-factor* tridimensional (usando a razão
H/W, em que H corresponde à altura dos edifícios nos dois lados da rua
e W corresponde à largura das ruas).

A cada local de medição atribui-se um valor do *sky view-factor*
tridimensional¹⁸ (Ψ_s), calculado segundo o método preconizado por T. R.
Oke (1981).

Simultaneamente procurámos definir uma medida para a *influên-
cia integrada do edificado* circundante, nos *valores da temperatura*.
Recorremos à medida que foi também utilizada por nós em trabalho
anterior¹⁹, designada por *densidade de edifícios* (D_b que se refere ao
número de edifícios/hm²)²⁰.

16. Esta condição pode ter que ser reconsiderada no desenvolvimento do trabalho futuro pois verificou-se que algumas situações interessantes de ICU ficaram excluídas do estudo.

17. Balkestähl, L., Os efeitos da intensificação dos processos de urbanização no balanço ener-
gético local: Estudo de caso no pólo da Asprela, tese de mestrado, FLUP, Porto, 2005.

18. Oke, T.R., *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp 237-254, 1981.

19. Balkestähl, L., Os efeitos da intensificação dos processos de urbanização no balanço ener-
gético local: Estudo de caso no pólo da Asprela, tese de mestrado, FLUP, Porto, 2005.

20. Pode obter-se uma medida alternativa através do somatório do valor do indicador D_b no
sentido descendente da direcção do vento desde o limite da área edificada até ao ponto com
o valor máximo. No entanto, isso implica que cada ponto de medição assume diferentes valo-
res de D_b dependendo da direcção do vento. Esta medida ainda não foi posta à prova (expe-
rimentada) e necessita de ser testada por nós antes da sua utilização.

3. Resultados – Tratamento estatístico e análise

3.1. Estrutura espacial da Ilha de Calor Urbano

Nesta parte do estudo pretendeu-se estabelecer qual a relação entre a **máxima** intensidade da ilha de calor na área de estudo (Paranhos-Porto) e o *sky view factor*. Para tal foi definido o valor máximo para cada situação de ilha de calor escolhida, tendo sido ponderada a questão chave de que o valor de máxima intensidade da ICU pode manifestar-se em diferentes pontos e em diferentes ocasiões. Adoptou-se o seguinte procedimento: foi escolhido para cada caso de situação de ilha de calor o ponto de medição que apresenta $((\Delta\theta)_U)_{\max}$.

Foi estipulado o correspondente valor de Ψ_s (*sky view-factor* tridimensional).

A primeira tarefa desenvolvida consistiu em verificar se existe uma relação do tipo linear entre a máxima ICU e o *sky view-factor*, de acordo com:

$$((\Delta\theta)_U)_{\max} = \mathbf{a} + \mathbf{b}(\ln \Psi_s) \quad \text{para } \Psi_s > 0 \quad \text{eq. (1)}$$

Construiu-se uma tabela com os elementos obtidos pelo processo anteriormente referido, a que se acrescentou uma nova coluna dedicada ao tipo de situação sinóptica, os valores do *svf* e os valores da densidade de edifícios.

Posto	Data			Hora	Situação sinóptica	$((\Delta\Theta)_U)_{max}^{\circ C}$	Sky view factor	Densidade edifícios
C-148m	22	08	2004	02:00	AC, Atl. ac	4,5	0,35	20
C-148m	24	08	2004	03:00	AC, Atl. ac	3,0	0,35	20
C-148m	25	08	2004	03:00	AC, Atl. ac-occ	3,7	0,35	20
C-148m	26	08	2004	04:00	AC, Atl. ac	4,4	0,35	20
C-148m	27	08	2004	03:00	C (AC Atl)	4,1	0,35	20
C-148m	28	08	2004	01:00	C (AC Atl)	3,1	0,35	20

.....

B-139m	11	02	2005	21:00	ac (AC Atl)	2,1	0,64	12
C-148m	12	02	2005	23:00	ac (AC Atl)-cF	2,5	0,35	20
B-139m	15	02	2005	02:00	ac (AC Atl)	2,8	0,64	12
C-148m	16	02	2005	05:00	AC Atl cc	3,5	0,35	20
C-148m	17	02	2005	03:00	AC Atl ac	4,1	0,35	20
C-148m	17	02	2005	22:00	AC Atl nc	2,7	0,35	20

TABELA 4: RELAÇÃO ENTRE A MÁXIMA INTENSIDADE DA ICU E AS VARIÁVEIS EM ANÁLISE

A segunda tarefa consistiu em verificar se existe correlação entre a situação sinóptica, por um lado, e a intensidade máxima da ilha de calor; e, por outro lado, entre a situação sinóptica e uma combinação do sky view factor com a densidade de edifícios (esta última, medida de acordo com o acima referido), de acordo com:

$$((\Delta\Theta)_U)_{max} = a + b ((1 - D_B) \Psi_S) \quad \text{para } D_B < 1 \quad \text{e} \quad \Psi_S > 0 \quad \text{eq. (2)}$$

Em simultâneo com esta análise e a partir dos dados de medição, deverá também posteriormente poder verificar-se a localização da máxima intensidade da ilha de calor, na área em estudo, a qual pode variar de caso para caso, assim como determinar as principais características do edificado que influenciam/determinam a localização e magnitude do valor máximo da ilha de calor. Posteriormente, sempre que possível procurar-se-á efectuar, com o recurso a metodologias no âmbito da geostatística, a construção de mapas/gráficos caracterizadores do comportamento espacial das variáveis em estudo. Sendo certo que as abordagens geostatísticas preconizadas já foram, em parte, desenvolvidas e aplicadas em trabalhos anteriores, serão a partir daqui generalizadas às novas variáveis.

3.2. Estrutura espaciotemporal da Ilha de Calor Urbano

No sentido de tentar averiguar se ocorrem recorrentemente padrões espaço-temporais característicos na Ilha de Calor Urbano, efectuámos a análise descritiva dos dados, para períodos de 24 horas, das 12 às 12 (correspondentes a cada “dia completo” de ilha de calor). As regressões que estabelecemos entre as variáveis referidas permitiram verificar que na área de estudo existe relação entre a máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano e o *sky view factor*, assim como com a medida que designamos por densidade de edifícios ou *building densities* (nº de edifícios/hm²). Permitiram-nos ainda constatar que na área de estudo existe uma relação entre a máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano e a situação sinóptica.

Dos 4 333 momentos de observação horários, distribuídos por cerca de 180 dias (21/08-2004 a 18/02-2005), verificaram-se, de acordo com o critério $(\Delta\theta)_U \geq + 2^\circ\text{C}$ já referido acima, 100 situações de ocorrência de Ilha de Calor Urbano que foram seleccionadas para tratamento estatístico. A sua distribuição espaciotemporal está compilada na tabela que se segue:

Tipo de situação sinóptica	Nº de ocorrências nos Postos de medição				Total
	A-125m	B-139m	C-148m	E-115m	
AC Alt.	1	6	56	–	63
C (AC Atl)	–	1	13	1	15
ac (AC Alt)	–	4	2	–	6
AC Cont	2	2	9	–	13
nc	–	3	–	–	3
Total	3	16	80	1	

TABELA 5: OCORRÊNCIAS TOTAIS DE MÁXIMA INTENSIDADE DE ICU E SUA RELAÇÃO COM A SITUAÇÃO SINÓPTICA

3.2.1. Relativamente às referidas 100 situações de ocorrência de Ilha de Calor Urbano correspondentes aos postos fixos de medição em análise, a tabela 5 permitiu-nos sintetizar os diversos resultados obtidos. Em termos relativos, as situações de **máxima intensidade** de Ilha de Calor Urbano evidenciaram a seguinte **correspondência espacial**:

- 1% ao posto de medição E
- 3% ao posto de medição A
- 16% ao posto de medição B
- 80% ao posto de medição C

Os resultados aqui obtidos para o **posto C** revelam-se explícitos quando comparados com os dados estatísticos simples: este posto é, em média, um dos três postos mais frios (juntamente com E e G) e registra temperaturas diurnas relativamente baixas. No entanto, à noite, é o posto em que ocorre o maior número total de situações de máxima intensidade de ilha de calor, com maior frequência e de maior magnitude.

Essas situações correspondem fundamentalmente a situações sinópticas de Anticiclone Atlântico (56%) mas também é o posto em que se verifica um número razoável de ocorrências, mesmo em situação de depressão barométrica (13%); apresenta também um número considerável em situação associada a Anticiclone Continental (9%). Revela valores de desvios entre $+2,0^{\circ}\text{C}$ e $+7,2^{\circ}\text{C}$, sendo este último valor o máximo absoluto verificado neste estudo e correspondendo a situação de Anticiclone Continental.

Quanto aos dados estatísticos simples o **posto B** é, em média, o posto mais quente; e é não só o segundo a apresentar maior frequência de situações de máxima intensidade de ilha de calor mas também é recorrentemente aquele que apresenta a segunda maior magnitude, logo a seguir ao posto C (revela valores de desvios entre $+2,1^{\circ}\text{C}$ e $+5,6^{\circ}\text{C}$). É o posto que apresenta maior dispersão em termos de ligação às situações sinópticas.

O **posto A** apresenta somente 3 ocorrências de máxima intensidade de ilha de calor e revela valores de desvios entre $+2,1^{\circ}\text{C}$ e $+3,7^{\circ}\text{C}$, sendo duas situações associadas a Anticiclone Continental, com desvios de valor baixo, e uma a Anticiclone Atântico.

O único caso em que o **posto E** apresenta a máxima intensidade de ilha de calor corresponde a uma situação sinóptica de baixa pressão na Península Ibérica, em margem de Anticiclone Atântico (valor do desvio de $+2,9^{\circ}\text{C}$).

O **posto G** é claramente o mais frio, quer em média, quer em temperatura mínima; correspondem-lhe algumas situações de ilha de calor de magnitude muito baixa mas apresenta zero observações de

máxima intensidade de ilha de calor urbano. O mesmo acontece com o **posto D**, no qual se verificam numerosas situações de ICU, inclusive de magnitude muitas vezes superior a 2°C, mas que apresenta zero observações de **máxima intensidade** de ilha de calor urbano.

3.2.2. Relativamente à **incidência temporal** das diversas situações de **máxima intensidade** da ICU, pode salientar-se o seguinte:

Não se evidenciam, nem por excesso nem por defeito, meses manifestamente detentores de maior número de situações de máxima intensidade de ICU, à excepção de Setembro de 2004, que apresenta o maior número, e de Outubro de 2004, que apresenta somente 8 ocorrências.

Quanto à magnitude, parece ser evidente que os desvios de valor mais elevado ocorrem preponderantemente nos meses de Verão e início de Outono (8% de desvios superiores a +5°C entre Agosto e Outubro, inclusivé), enquanto os meses habitualmente mais frios apresentam poucas ocorrências (5% de desvios superiores a +5°C entre Novembro e Fevereiro, inclusivé).

Quanto à evolução temporal diurna, na maior parte das ocorrências verifica-se a situação expectável: a ICU de maior intensidade ocorre cerca de 3 a 5 horas após o pôr-do-sol e atenua-se mais ou menos lentamente após uma a duas horas depois do seu aparecimento. No entanto, verificaram-se casos curiosos que merecem ser mais aprofundados, em que a ICU, dependendo sobretudo da velocidade do vento, pode prolongar-se no tempo: noites há em que a ICU se prolonga até às 02h00 ou mesmo 05h00, com valores máximos a essas horas tardias, o que habitualmente só se verifica em situações de calma ou vento muito fraco (veja-se o exemplo da noite de 19/09-2004, em que a máxima intensidade deveria ocorrer entre as 23h00 e as 01h00, mas efectivamente ocorreu por volta das 03h00; situação idêntica ocorreu no dia 21/09-2004, em que embora o valor máximo se tenha verificado por volta das 00h00, a ICU prolonga-se com valores muito significativos até às 05h00).

Não é conveniente extrair conclusões quanto à distribuição anual das ocorrências, dada a duração do período de observação que efectivamente foi possível utilizar em contínuo.

4. Discussão

Concluimos que existe Ilha de Calor de magnitude considerável e variável, sobretudo nas áreas com maior densidade de edifícios, menor *svf* e de mais trânsito rodoviário. Na generalidade as situações sinópticas de estabilidade potenciam e as de instabilidade atenuam/inibem a existência e a magnitude da Ilha de Calor. Mas esta relação não é absolutamente linear pois algumas das situações de relativa instabilidade, desde que associadas a baixas velocidades do vento, não só potenciam como até podem originar algumas das situações de ICU de magnitude mais elevada, como se verifica nos dias 22 e 23 de Setembro de 2004 .

Estes resultados vieram confirmar a pesquisa anterior²¹ por nós efectuada, a qual já nos tinha permitido constatar que há casos de situação sinóptica de instabilidade/transição que apresentam ilhas de calor de maior magnitude do que situações sinópticas de estabilidade; por outro lado, há casos de situações sinópticas de estabilidade, praticamente sem ilha de calor, ou ilha de calor não significativa, dependendo sobretudo da direcção e velocidade do vento; uma terceira alternativa refere-se a situações de instabilidade/transição, as quais só favorecem a ilha de calor se o vento for fraco (e preferencialmente de quadrante N a NNE)²².

O facto de o posto de medição C ser aquele que apresenta **maior número de situações de máxima intensidade de ilha de calor**, de **valores muito variáveis** (dos mais baixos aos mais elevados), está claramente relacionado com a elevada densidade de edifícios e com o baixo *svf*, seja perante situação sinóptica de Anticiclone Atlântico, de Anticiclone Continental ou de situação sinóptica de baixa pressão.

O facto de o posto de medição B ser aquele que apresenta o segundo maior **número de situações de máxima intensidade de ilha de calor**, a seguir ao posto C, deve estar relacionado com o relativamente elevado valor de densidade de edifícios, apesar de o *svf* ser também bastante elevado. Cremos que aqui deve representar também

21. Balkeståhl, L., Monteiro, A., Góis, J., Taesler, R. Quenol, H., The influence of weather types on the urban heat island's magnitude and patterns at Oporto – a case study from November 2003 to January 2005. Gotemburgo, 2006.

22. Idem.

um papel importante o facto de a rua ser muito assimétrica e os edifícios de paredes mais altas estarem abertamente orientadas a Oeste. Não obtivemos ainda sucesso na tentativa de explicação da elevada dispersão de situações sinópticas de estabilidade que presidem às numerosas situações de **máxima intensidade de ilha de calor** (há uma única ocorrência em situação de instabilidade) mas mais uma vez consideramos que deve estar relacionado com a orientação e a exposição dos edifícios.

As poucas ocorrências de máxima intensidade de ilha de calor no posto de medição A, apesar dos valores de densidade de edifícios e do svf serem razoavelmente elevados, devem estar relacionadas com o facto de se tratar de um quarteirão caracterizado por pequenas vivendas unifamiliares (um dos bairros do Estado Novo), geralmente de baixa altura dos dois lados das ruas e rodeadas por logradouros de relativa extensão que, por um lado, favorecem o arejamento e, por outro lado, não são potenciadores da acumulação/retenção de energia, quer pelos materiais constituintes, quer pela distância entre quintais.

Os postos E, D e G apresentam os maiores valores de svf e as menores densidades de edifícios, pelo que logicamente ou não apresentam ocorrências (postos D e G) ou, como no caso do posto E, somente se verifica uma situação de máxima intensidade de ilha de calor.

Em conclusão, de forma geral podemos afirmar que aos valores mais baixos de svf e mais altos de D_b corresponde o maior número de ocorrências de máxima intensidade de ilha de calor; e vice-versa, um baixo/nulo número de ocorrências de máxima intensidade de ilha de calor.

Em situação de **estabilidade**, com Anticiclone centrado no Atlântico geralmente a N ou a NW da Península Ibérica, é potenciada a ilha de calor, com **valores de desvios muito variáveis**. Em situação de **estabilidade**, com Anticiclone centrado no Continente, ocorre a formação de ilha de calor em dias de calma ou vento fraco ($<3\text{m/s}$), com **valores de desvios geralmente elevados**.

Durante o processo observacional selectivo e comparativo dos dados, assim como na sua transposição para as tabelas, verificámos situações interessantes de ilha de calor (embora com baixa frequência e baixa magnitude).

Por essa razão pensamos que não podemos excluir exemplos de ilhas de calor pelo menos até ao limite inferior de $+1^\circ\text{C}$, pelo que nos

propomos reanalisar os dados, descendo a fasquia do critério de selecção e alargando o período de observação até prefazer pelo menos um ano.

Os resultados preliminares obtidos estão em conformidade com o expectável mas terão de ser confirmados com **maior número de postos de medição** para abrangerem **mais exemplos distintos de svf e de D_b**, assim como de um maior número de observações (período de pelo menos um ano).

No prosseguimento da nossa investigação, pretendemos alargar espacialmente este estudo para o exterior do perímetro da Freguesia de Paranhos, no sentido de que abranja também outras partes mais densamente ocupadas da cidade do Porto, através da recolha de dados em postos fixos, segundo dois cortes aproximadamente N-S e W-E e aplicando esta metodologia que, além de incidir sobre diferentes espaços da cidade com características distintas, permita anular o efeito do factor altitude²³ na variação térmica, o que nos permitirá determinar com maior rigor a extensão espacial, a efectiva evolução temporal e a real magnitude da Ilha de Calor Urbano na área de estudo.

Pretendemos prosseguir a nossa investigação no sentido da Climatologia Urbana Aplicada, quer no que diz respeito à questões específicas das suas diversas escalas espaciais, quer nas possibilidades que se abrem de aplicabilidade a situações concretas de planeamento e gestão do território, inclusivamente nas suas implicações com a saúde pública.

Bibliografia

- ALCOFORADO, M. J. (1993), *O Clima da Região de Lisboa – Contrastes e Ritmos Térmicos*, CEG da UL, Lisboa.
- ALCOFORADO, M. J., ALEGRIA, M. F., PEREIRA, Ana R., SIRGADO, C. (1982), Domínios Bioclimáticos em Portugal, definidos por comparação dos índices de Gaussen e de Emberger, Linha de Acção de Geografia Física, *Relatório* n.º 14, Centro de Estudos Geográficos, I.N.I.C., Lisboa.
- ANDERSSON, K., C. (2004), Ekeblad, Högsommardagar i Sverige 1917-2003. Department of Physical Geography, Earth Sciences Centre Göteborg University, Göteborg.

23. Andersson, K., C., Ekeblad, *Högsommardagar i Sverige 1917-2003*. Department of Physical Geography, Earth Sciences Centre Göteborg University, Göteborg, 2004.

- ARAÚJO, M. Assunção F. P. (1991), *Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral da Região do Porto*, FLUP, Porto.
- BALKESTÄHL, L. (2005), Os efeitos da intensificação dos processos de urbanização no balanço energético local: Estudo de caso no pólo da Asprela, tese de mestrado, FLUP, Porto.
- BALKESTÄHL, L., MONTEIRO, A., GÓIS, J., TAESLER, R., QUENOL, H. (2006), The influence of weather types on the urban heat island's magnitude and patterns at Oporto – a case study from November 2003 to January 2005. Gotemburgo.
- BALKESTÄHL, L., MONTEIRO, A., GÓIS, J., TAESLER (2007), The sky view factor as an indicator for urbanization effects: case study in Paranhos, Porto. Oslo.
- BERGSTRÖM, H. (2007), *Vindpotentialen i Sverige på 1 Km-skala. Institutionen för geovetenskap, luft och vattenlära*. Uppsala Universitet.
- FERNANDES, J. A. R. (2007), Urbanismo sustentável: pela redução, reciclagem e reutilização da cidade. Revista da FLUP, II Série, Volume I, pp. 161-176.
- GANHO, N. (1995), A ilha de calor de Coimbra sob diferentes condições de tempo de verão. *Territorium*, Coimbra, 2, p. 33-50.
- GEIGER, R. (1980), *Manual de microclimatologia – O Clima da Camada do Ar Junto ao Solo*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, ISBN 972-31-0522-5.
- GÓIS, J. (2002), *Contribuição dos Modelos Estocásticos para o Estudo da Climatologia Urbana*, FEUP, Porto.
- GRIMMOND, C. S. B. (1992), The suburban energy balance: methodological considerations and the results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions, *International Journal of Climatology*, vol.12, p. 481-497.
- MONTEIRO, A. (1997), *O Clima Urbano do Porto, Contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- MONTEIRO, A. (1994), A Climatologia como componente essencial no diagnóstico e na avaliação dos impactos ambientais em espaços urbanizados. O caso da cidade do Porto. *Territorium*, Coimbra, 1, p. 17-22.
- MONTEIRO, A. (1995), "Perceptibilidade, risco e vulnerabilidade em Climatologia – um estudo de caso no Porto". *Territorium*, Coimbra, 2, p.51-63.
- OKE, T. R. (1981), *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp 237-254.
- OKE, T. R. (1987), *Boundary layer climates*, Routledge, London and New York.
- QUENOL, H. (2002), *Modifications Climatiques aux Echelles Fines Générées par un Ouvrage Linéaire en Remblai*, USTL, Lille, France.
- RAMOS, Catarina (1986), *Tipos de Anticiclones e Ritmo Climático de Portugal*, Centro de Estudos Geográficos, INIC Lisboa.
- TAESLER, Roger (1980), Studies of the development and thermal structure of the urban boundary layer in Uppsala, *Relatório N° 61*, Uppsala.
- TAESLER, Roger (1978), Lokalmeteorologiska förhållanden i Västra Ångby, Knivsta, *Rapport R. 110:1978*, Byggnadsforskningen, Stockholm.
- TAESLER, Roger (1978), Observational Studies of Three-Dimensional Temperature-and Wind-fields in Uppsala, WMO-Symposium on Boundary-Layer Physics Applied to Specific Problems of Air Pollution, Norrköping, Sweden.

<http://severe.worldweather.org/rain/>

<http://weather.cnn.com/weather/forecast.jsp?locCode=LPPR>

<http://weather.noaa.gov/weather/current/LPPR.html>

http://weather.yahoo.com/forecast/POXX0022_c.html?force_units=1

<http://www.eumetsat.int/>

<http://www.infomet.fcr.es/>

Lícinia Caldeira Balkestähl

