



Licinia Balkeståhl,
Faculdade de Letras da Universidade do Porto,
Departamento de Geografia, Portugal ~
balkestahl@mail.telepac.pt

Ana Monteiro,
Faculdade de Letras da Universidade do Porto,
Departamento de Geografia, Portugal ~
anamt@letras.up.pt

Joaquim Góis,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
Portugal e Centro de Investigação em Geoambiente
e Recursos, CIGAR, Porto, Portugal ~ jgois@fe.up.pt

Estudo preliminar sobre a Frequência de Ocorrências da Ilha de Calor Urbano em Paranhos, Porto – sua relação com distintas Tipologias de Situações Sinópticas

Recursos Naturais e Ordenamento do Território

Resumo

Em estudo anterior datado de 2005, baseado em medições itinerantes de temperatura, comprovámos a ocorrência de Ilha de Calor Urbano em distintos locais da área da freguesia de Paranhos, na cidade do Porto, evidenciando a uma escala topoclimática os fenómenos na sua dimensão da relevante vertente espacial. Ao alargar agora a área de estudo a outros locais da cidade do Porto, correspondentes a partes mais densamente ocupadas e com distintas tipologias de edificado, e aplicando uma metodologia que, além de incidir sobre diferentes espaços com características distintas, privilegia a recolha de dados térmicos em permanência, hora a hora, num número reduzido de postos fixos, privilegia-se conscientemente a recolha e o tratamento de informação temporal em detrimento da informação espacial, permitindo assim evidenciar a efectiva extensão temporal do fenómeno. A metodologia aqui aplicada, ao reduzir ao nível médio das águas do mar as temperaturas medidas, permite também anular o efeito do factor de variabilidade térmica altitude, uma vez que estamos convictos de que a anulação do referido factor nos permitirá determinar com maior acuidade e rigor a real magnitude da Ilha de Calor Urbano na área de estudo, em simultâneo com a sua extensão temporal.

Tendo como referência a estação meteorológica de Porto-Pedras Rubras, pretendeu-se com este trabalho efectuar uma abordagem preliminar às características da magnitude máxima e da evolução temporal da Ilha de Calor Urbano, na freguesia de Paranhos, cidade do Porto, assim como o estabelecimento das eventuais relações entre essas propriedades e as situações sinópticas presentes, através de um estudo descritivo e estatístico baseado em dados horários de temperatura, recolhidos em postos fixos instalados na área de estudo, ao longo de dois cortes

de orientação aproximadamente Norte-Sul e Oeste-Este (a escolha da localização dos postos de medição de temperatura tentou ser, tanto quanto possível em meio urbano, representativo de áreas com diferentes densidades de ocupação do solo, diferentes tipologias de edificado e com diferentes altitudes). As medições e o respectivo registo dos dados térmicos são efectuados na generalidade com recurso a sondas térmicas armazenadoras de dados de grande capacidade de memória, do tipo dataloggers Tinytalk eTinytag. O recurso a este tipo de sondas permite minimizar a necessidade de medições itinerantes, assim como de excessivos momentos de descarga de dados. As horas de medição e registo foram programadas de forma a serem tanto quanto possível coincidentes com as horas de registo das observações sinópticas da estação de Aeroporto-Pedras Rubras, já atrás referida como estação de referência escolhida.

Tendo por base um estudo anterior, em que se procedeu ao estabelecimento das relações entre as principais propriedades da Ilha de Calor Urbano na área de estudo e as situações sinópticas mais frequentes a elas associadas, através de uma análise descritiva, analisou-se agora em pormenor a evolução da magnitude máxima e da extensão temporal da Ilha de Calor Urbano, com base na recolha dos já referidos dados horários de temperatura, dando-se particular relevo a um estudo estatístico sistemático de sequência temporal.

No presente estudo procedeu-se ao estabelecimento das relações entre as propriedades fundamentais da Ilha de Calor Urbano e as diversas tipologias de situações sinópticas que com elas se relacionam, salientando, além do estudo estatístico global anual, também a variabilidade das distintas características durante diferentes épocas do ano, com especial incidência na frequência das suas ocorrências e na sua extensão temporal.

Foi estabelecido preliminarmente o critério de selecção de ocorrências de magnitude máxima da Ilha de Calor Urbano igual ou superior a $+2^{\circ}\text{C}$, tendo por referência a estação meteorológica de Porto-Pedras Rubras, embora no decurso da investigação possam vir a ser consideradas magnitudes máximas de valor inferior desde que estas se revelem relevantes sob o ponto de vista espacial e/ou temporal.

O recurso a técnicas no âmbito da estatística paramétrica e da geoestatística (análises espaço-temporais), permitiu caracterizar o comportamento das temperaturas nos diferentes postos de medição. Permitiu ainda estudar as correlações entre as estações de registo e interpretar, à luz do conhecimento que temos da zona envolvida neste trabalho, a variabilidade espaço-temporal evidenciada. Merece-nos particular destaque o recurso a variogramas temporais (linha de investigação que foge à tradicional abordagem geoestatística) na tentativa de caracterizar a persistência da ilha de calor urbano. Esta análise releva igualmente não só os aspectos associados à frequência das ilhas de calor em função da altura do ano a que dizem respeito os registos, mas também a sua relação com as situações sinópticas que enquadram a ilha de calor observada. Paralelamente, procurou-se identificar / interpretar as diferenças / similitudes entre as estações para a totalidade dos registos e em função das diferentes estações do ano abrangidas pelo período em análise.

Foi evidenciado que a Ilha de Calor Urbano ocorre em todas as épocas do ano estudadas, com intensidade bastante variável e, perante tipologias de situações sinópticas específicas, de valor considerável; foram também salientadas as diferenças na magnitude máxima da Ilha de Calor Urbano em relação com distintas tipologias de edificado, correspondentes a diferentes partes da cidade do Porto; foi ainda obtida uma sinopse da frequência de ocorrências da Ilha de Calor Urbano e da variabilidade da sua duração temporal, quer relativamente às diferentes épocas do ano, quer perante as já referidas diversas situações sinópticas.

Termos chave: máxima intensidade da Ilha de Calor Urbano, extensão temporal da Ilha de Calor Urbano, frequência de ocorrência da Ilha de Calor Urbano, situação sinóptica, geoestatística

1. Introdução

Localizado junto à costa, no Noroeste de Portugal, o Porto é uma cidade de média dimensão com apenas 210 558 habitantes, embora inserido numa Grande Área Metropolitana, quase continuamente urbanizada, de aproximadamente 1 285 352 habitantes (INE, 2009), a qual sofreu um processo intenso de urbanização, especialmente após a década de 70 do século XX.

Enquanto território da margem meridional da Zona Temperada do Norte, localizado na fachada ocidental da Península Ibérica, a cidade do Porto revela características climáticas das latitudes médias do hemisfério norte, enquadrando-se no domínio bioclimático atlântico (Alcoforado *et al*, 1982)¹; mas está também sujeita às influências da circulação proveniente do norte de África, o que lhe confere ainda características climáticas da grande variabilidade tipicamente mediterrânica. Com altitudes que variam entre cerca de 90/150 metros, a parte da cidade em estudo está instalada numa plataforma litoral que desce suavemente em direcção ao oceano Atlântico a partir de uma linha de relevos designada por “relevo marginal” (Araújo, 1991).

Em estudo anterior datado de 2005 (Balkesthäl, 2005)², baseado em medições itinerantes de temperatura, comprovámos³ a ocorrência de Ilha de Calor Urbano em distintos locais da área da freguesia de Paranhos, na cidade do Porto, evidenciando, a uma escala topoclimática, os fenómenos na sua dimensão da relevante vertente espacial. Ao alargar agora a área de estudo a outros locais da cidade do Porto, correspondentes a partes mais densamente ocupadas e com distintas tipologias de edificado – e aplicando uma metodologia que, além de incidir sobre diferentes espaços com características distintas, atribui a prerrogativa à recolha de dados térmicos em permanência, hora a hora, num número reduzido de postos fixos – privilegia-se conscientemente a recolha e o tratamento de informação temporal em detrimento da informação espacial, permitindo assim evidenciar a efectiva extensão temporal do fenómeno da Ilha de Calor Urbano nocturna na área de estudo (Balkesthäl, Março/2009)⁴.

Neste trabalho pretende-se efectuar um estudo estatístico de caracterização da evolução da magnitude e da extensão espaço-temporal da Ilha de Calor Urbano (ICU) não só na área de Paranhos-Porto, mas também alargar ligeiramente a área de estudo para fora do perímetro da freguesia, de forma a incluir outros pontos da cidade que se revelaram interessantes como objecto de estudo, em trabalhos de investigação precedentes, já atrás referidos; e ainda estabelecer as eventuais relações entre as principais propriedades da Ilha de Calor Urbano e as situações sinópticas que lhe estão associadas (Balkesthäl *et al*, 2006)⁵.

Para tal procedemos à recolha de dados térmicos, em postos fixos, segundo cortes aproximadamente Norte-Sul e Oeste-Este, incidindo sobre espaços da cidade com diferentes características, seguindo uma metodologia que permitisse anular o efeito do factor altitude⁶ na variação térmica, dada a nossa convicção de que a anulação do referido factor⁷ nos permitirá evidenciar, com rigor, a real magnitude e a efectiva evolução temporal da Ilha de Calor Urbano nocturna. Uma vez que por definição “a ilha de calor urbano é o fenómeno associado ao aumento da temperatura na zona urbana em relação às áreas circundantes não urbanizadas” (Oke, 1987), optou-se por assumir como referência a estação meteorológica de Porto-Pedras Rubras.

¹ Com base numa combinação dos índices de Gaussen e Emberger, foram definidos por Alcoforado *et al* (1982) cinco domínios climáticos, reportados aos dias biologicamente secos.

² As medições itinerantes constituem a forma clássica de aquisição de dados, em estudos de ICU; na actualidade, dispondo de meios, pode efectuar-se a aquisição por processos mais modernos de detecção remota.

³ Esses resultados obtidos para a área de Paranhos vieram comprovar, a uma escala mais pormenorizada, os resultados de estudos anteriores efectuados na cidade do Porto, por Monteiro A (1997), e por Góis J (2004).

⁴ A metodologia aqui preconizada foi utilizada anteriormente, de forma experimental relativamente a dados obtidos em 6 postos fixos, entre 2004 e 2005, num primeiro período de medições.

⁵ O estudo efectuado sob a mesma temática por Balkesthäl *et al* (2006), resumiu-se a tratamento estatístico descritivo.

⁶ Esta metodologia torna-se significativa sempre que seja conveniente reportar os dados a um referencial comum.

⁷ Os primeiros estudos sobre ICU realizaram-se em cidades caracterizadas por topografia bastante uniforme mas no caso da cidade do Porto justifica-se esta metodologia dado que a cidade apresenta diferenças de altitude razoáveis.

Pretende-se agora, alargando sensivelmente a área de estudo para se dispor de um termo de comparação, atingir os seguintes objectivos:

- i) Analisar a estrutura espacial da Ilha de Calor Urbano nocturna, ao longo de uma determinada secção através da área de estudo (cortes aproximadamente N-S e W-E).
- ii) Determinar a extensão temporal da Ilha de Calor Urbano nocturna, ao longo de uma determinada secção através da área de estudo (cortes aproximadamente N-S e W-E).
- iii) Analisar a evolução da magnitude da ICU.
- iv) Analisar a evolução da extensão temporal da ICU, em estações do ano distintas e sob diferentes situações sinópticas.

Move-nos a convicção de que a atmosfera urbana configura uma componente fundamental do suporte biogeofísico de grande parte da população do mundo actual: a população mundial está estimada em 6 768 181 146 de habitantes; destes, cerca de 50,5% vivem em cidades ou em meio urbanizado (Central Intelligence Agency, Julho de 2010, estimativa), tendendo a população urbana a aumentar ainda mais no futuro (crescimento estimado da taxa anual de urbanização, para 2010-15, em cerca de 1,85%). Por essa razão, as novas políticas urbanas devem aproximar sustentabilidade e governança para que, numa perspectiva socio-ambiental, possam responder de forma eficaz à complexa tarefa de gerir o território no sentido da melhoria da qualidade de vida dos cidadãos (Fernandes, 2007).

2. Metodologia

Foram seleccionados espaços urbanos de características distintas, para a aquisição de dados horários de temperatura, recolhidos em postos fixos instalados na área de estudo, ao longo de dois cortes de orientação aproximadamente Norte-Sul e Este-Oeste (Figura 1). A escolha da localização dos postos de medição de temperatura tentou ser, tanto quanto possível em meio urbano, representativo de áreas com diferentes densidades de ocupação do solo, diferentes tipologias de edificado e correspondente a diferentes altitudes (Balkestahl, 2008)⁸.

⁸ Neste estudo datado de 2008 concluímos que existe ICU de magnitude considerável e variável, sobretudo nas áreas com maior densidade de edifícios, menor svf e de mais trânsito rodoviário; as correlações estabelecidas entre a densidade de edifícios/svf e os desvios térmicos mostram que a intensa ocupação do solo é claramente um factor potenciador do fenómeno da ilha de calor.

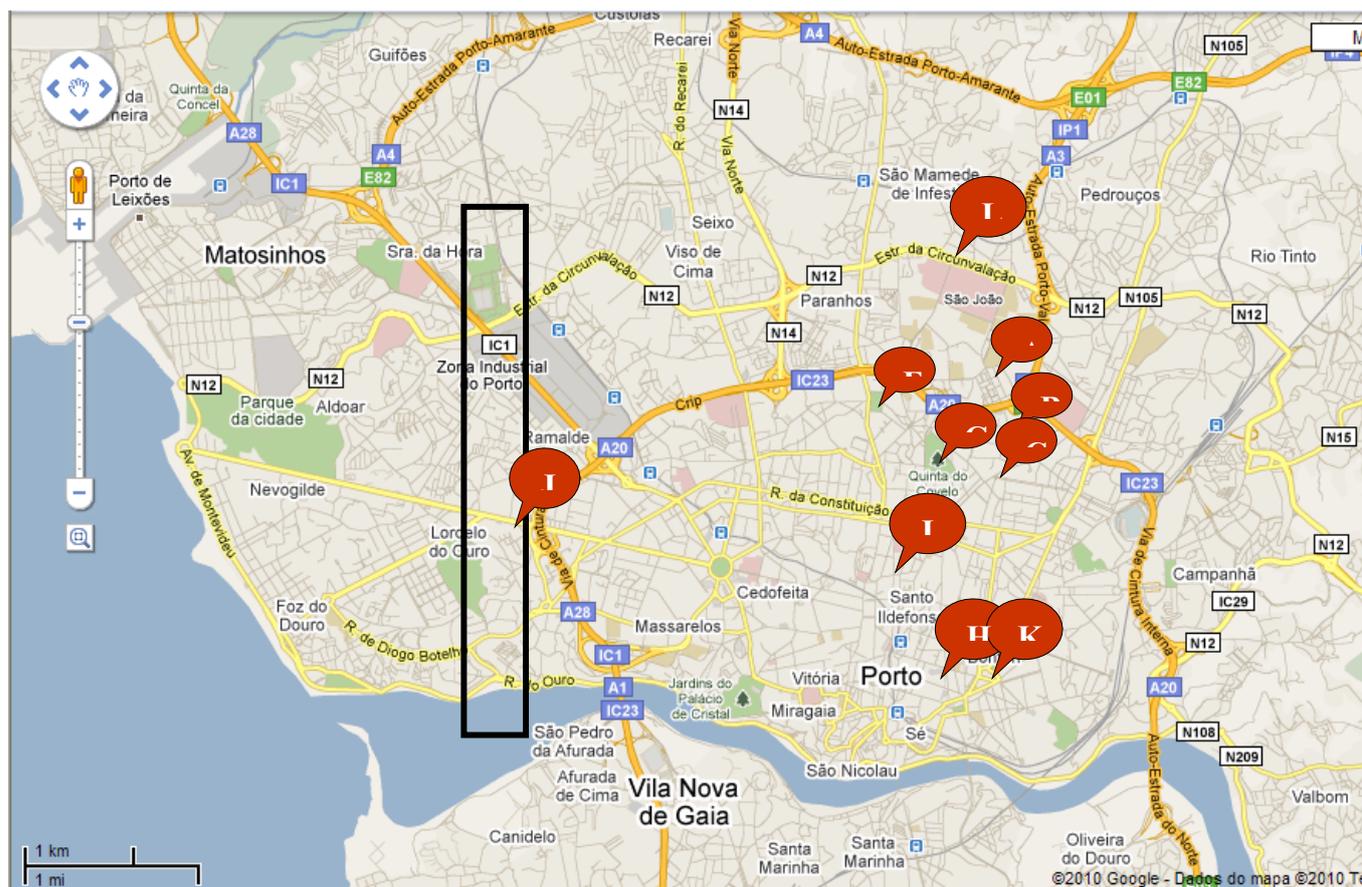


Fig.1- Localização da área de estudo, postos fixos de recolha de dados (Porto)

2.1. Aquisição directa e indirecta de dados

No que diz respeito à aquisição directa de dados, as medições levadas a cabo nos postos fixos (Figuras 2 a), b) e c), exemplos de alguns postos fixos) e o respectivo registo dos dados térmicos são efectuados com recurso a sondas térmicas armazenadoras de dados, de grande capacidade de memória, do tipo *dataloggers Tinytalk* e *Tinytag*. Estas medições sistemáticas e contínuas de dados horários de temperatura verificaram-se, até ao presente, durante dois períodos distintos:

- 21 de Agosto/ 2004 até 17 de Fevereiro/ 2005 (em seis postos fixos);
- 10 de Maio/2010 e em curso (até prefazer, no mínimo, um ano de recolha de dados, em dez postos fixos).

A recolha e tratamento preliminar dos dados processa-se através do programa *Tinytag Explorer*. O recurso a este tipo de sondas permite minimizar a necessidade de medições itinerantes, assim como de excessivos momentos de descarga de dados. As horas de medição e registo foram programadas de forma a serem, tanto quanto possível, coincidentes com as horas de registo das observações meteorológicas da estação de Porto-Pedras Rubras, já atrás referida como estação de referência escolhida.

No que se refere à aquisição indirecta de dados, durante os períodos de medição são também gravados dados horários da estação meteorológica de Porto-Pedras Rubras (temperatura, pressão atmosférica, direcção e velocidade do vento, humidade e estado de tempo), sendo as

situações sinópticas diárias documentadas através da aquisição de diversas cartas sinópticas de superfície, essencialmente British Met Office, USAF e DWD e ainda fotos do satélite NOAA-15/19, publicadas em página *Web* própria pela Dundee University, UK.

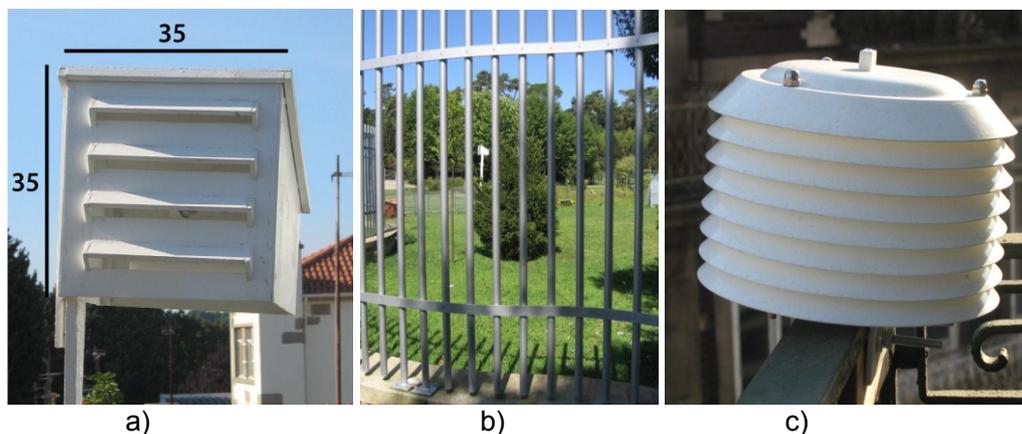


Fig. 2 a) Posto A, Rua do Tejo - abrigo da sonda e respectivas dimensões
b) Posto G, Covelo – localização em terreno aberto
c) Posto K, Largo do Padrão (Sul) – abrigo da sonda

2.2. Compilação de dados e Tratamento preliminar

Foi definido um modelo de tratamento dos dados de acordo com os seguintes procedimentos (Balkestähl, Março/2009)⁹:

2.2.1. – Procedeu-se à compilação em folha de EXCEL, dos dados adquiridos nos diferentes postos fixos, numa tabela da qual constam as temperaturas medidas hora a hora, as altitudes dos postos e os dados térmicos da estação de referência.

2.2.2. – A partir dos valores de temperatura medidos, efectuou-se a correcção do factor altitude (cálculo da **temperatura potencial**), tendo as temperaturas sido reduzidas ao nível médio das águas do mar:

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

em que θ é a temperatura potencial

e Δz é a altitude acima do nível médio das águas do mar

2.2.3. – De seguida procedeu-se ao cálculo dos devios térmicos potenciais urbanos horários, em cada posto de medição:

⁹ Dado que as abordagens geoestatísticas preconizadas já foram, em parte, desenvolvidas e aplicadas nos trabalhos precedentes, serão a partir daqui generalizadas às novas variáveis.

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

em que θ é a temperatura potencial

Foi por nós definido preliminarmente, como critério para a existência de Ilha de Calor Urbano, que, em algum momento e em algum ponto de medição, é satisfeita a seguinte condição¹⁰:

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

3. Tratamento estatístico e Análise de resultados

3.1. Estrutura espacial da Ilha de Calor Urbano nocturno

Com o objectivo de racionalizar a tarefa de tratamento estatístico dos resultados e de a dotar de maior eficácia, foi decidido utilizar o valor de máxima intensidade da ICU nocturna, para cada situação de ICU encontrada, segundo o critério pré-definido; foi ainda ponderada a questão de que o valor de máxima intensidade da ICU nocturna pode manifestar-se em diferentes pontos e em diferentes ocasiões. Nesse sentido, adoptou-se o seguinte procedimento: foi seleccionado, para cada caso de situação de ilha de calor nocturna em estudo, o ponto de medição que apresenta $((\Delta\theta)_U)_{\text{max}}$, tendo os dados sido compilados em tabela própria (Tabela 1).

Na mesma tabela foram ainda inseridos os dados relativos às principais variáveis sinópticas em análise, nomeadamente cada situação sinóptica correspondente às datas das ocorrências de ICU nocturna, a direcção e velocidade dominantes do vento, assim como as horas de início e duração aproximadas da Ilha de Calor nocturna.

Tabela 1 - Relação entre $((\Delta\theta)_U)_{\text{max}}$ e variáveis sinópticas em análise

(2º Período de medições, 10 Maio/2010 a 07 Julho/2010)

Maio-Agosto 2010		Situação sinóptica	$((\Delta\theta)_U)_{\text{max}} \text{ }^\circ\text{C}$	Início aprox. UHI	Duração aprox. UHI	Vento/ Direc /Veloc
Posto	Data/Hora					
I -130m	2010-05-11 01:00	C (AC Atl)-occ	3,7	01:00:00	3 h	Calm
I -130m	2010-05-12 05:00	C (AC Atl)-occ	2,6	05:00:00	1h	Variable 2
I -130m	2010-05-13 01:00	C (AC Atl)-occ	2,9	00:00:00	3h	Calm
I -130m	2010-05-14 03:00	AC Atl nc	3,6	00:00:00	5h	Calm
I -130m	2010-05-14 23:00	AC Atl nc-occ	2,0	23:00:00	1h	N7
I -130m	2010-05-15 23:00	AC Atl ac	4,3	23:00:00	8h	Calm
I -130m	2010-05-17 00:00	AC Atl ac	3,6	00:00:00	4h	Calm
B-139m	2010-05-18 01:00	AC Atl ac	6,0	00:00:00	5h	Calm
.....						
I -130m	2010-07-06 05:00	nc (AC Atl)	9,7	02:00:00	6h	Calm
C-148m	2010-07-07 03:00	C (AC Atl)	6,8	03:00:00	5h	Calm
C-148m	2010-07-08 00:00	C (AC Atl)	8,1	23:00:00	5h	SSW5
I -130m	2010-07-08 22:00	C (AC Atl)	2,0	22:00:00	1h	S7

Procedeu-se à análise estatística descritiva dos dados, para períodos de vinte e quatro horas, das 12 às 12 horas, correspondentes a cada "dia completo" de ilha de calor. Embora os dados

¹⁰ Critério por nós assumido e já anteriormente utilizado (Balkestáhl, Março/2009).

adquiridos neste estudo permitam abordar outras questões, nomeadamente o fenómeno de Ilha de Calor Urbano diurna¹¹, consideraram-se neste texto exclusivamente as Ilhas Urbanas de Calor nocturnas.

Dos 1 440 momentos de observação horários, distribuídos pelos 60 dias deste período em análise, verificaram-se, de acordo com o critério preliminarmente assumido ($\Delta\theta_U \geq + 2 \text{ }^\circ\text{C}$), um total de 47 situações de ocorrência de Ilha de Calor Urbano nocturna que foram seleccionadas para tratamento estatístico (Tabela 2).

Tabela 2 - Ocorrências totais de máxima intensidade de ICU no período em análise e sua relação com a situação sinóptica

Tipo de situação sinóptica	Nº de ocorrências nos Postos de medição								
	A-125m	B-139m	C-148m	E-115m	G-141m	H-100m	I-130m	J-60m	Total
Maio/2010 a Julho/2010									
AC Atl		2	1				7		10
C (AC Atl)			5*				10*		15
ac (AC Atl)			1				7		8
AC Cont							1		1
nc			10				2		12
cc (Ac Atl)							1		1
Total		2	17				28		47

* Em 24/05, C encontra-se no Atlântico

Em termos relativos, as situações de máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano nocturna evidenciaram a seguinte correspondência espacial:

- 4,2 % correspondem ao posto de medição B
- 36,2 % correspondem ao posto de medição C
- 59,6 % correspondem ao posto de medição I

3.2. Extensão temporal e magnitude da Ilha de Calor Urbano

Os dados das séries temporais dos oito postos fixos em estudo (Figuras 3 a), b), c) e d), exemplos da orientação/exposição de alguns postos fixos) foram tratados/analísados de forma empírica, por análise estatística simples/gráfica e por análise geoestatística, particularmente no que diz respeito à duração temporal da ICU nocturna.

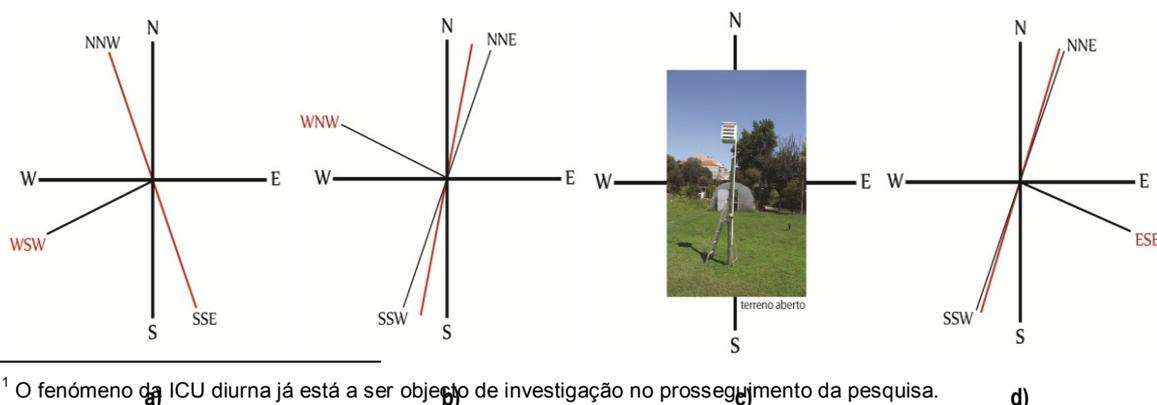


Fig. 3 – Orientação das ruas onde se localizam os postos fixos e exposição geográfica dos mesmos. de Geografia
 a) Posto A, Rua Tejo; b) Posto C, R. Costa Cabral; c) Posto G, Quinta Covelo; d) Posto I, R. Faria Guimarães

¹¹ O fenómeno da ICU diurna já está a ser objecto de investigação no prosseguimento da pesquisa.

Relativamente aos resultados obtidos nos postos fixos durante o período de medições em análise, considerando a observação empírica e os dados estatísticos simples/gráficos (Figuras 4 a), exemplo do tratamento gráfico da duração da ICU), deve destacar-se o seguinte:

Posto I (Faria Guimarães)

- em média, é o posto mais quente, logo seguido do posto B, ambos destacados relativamente aos restantes postos de medição;
- regista habitualmente temperaturas elevadas, quer diurnas quer nocturnas;
- apresenta as temperaturas mínimas mais elevadas, a seguir ao posto C e em igualdade com o posto B;
- em termos de temperatura máxima, ocupa somente o quarto lugar do conjunto em observação, depois dos postos B, H e E;
- revela valores de desvios térmicos $((\Delta\Theta)_u)_{max}$ entre 2,0 °C e 9,7 °C;
- em período nocturno, é o posto em que ocorrem, com maior frequência e de maior magnitude, os episódios de máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano (vinte e oito ocorrências num total de quarenta e sete);
- a ICU teve duração temporal de 1 hora até 8 horas, sendo as de maior frequência as ilhas de calor de cerca de 4 horas (seis ocorrências) e as de cerca de 5 horas (treze ocorrências).

Posto C (Costa Cabral)

- em média, é um dos quatro postos mais frios, juntamente com os postos E, G e J;
- regista temperaturas diurnas relativamente baixas;
- em igualdade de circunstâncias com o posto J, apresenta a temperatura máxima mais baixa do conjunto em observação;
- regista a temperatura mínima mais elevada do conjunto de postos em análise;
- revela valores de desvios térmicos $((\Delta\Theta)_u)_{max}$ entre 2,0 °C e 8,1 °C;
- em período nocturno, é o segundo posto a apresentar maior frequência de situações de máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano (dezassete ocorrências num total de quarenta e sete) e apresenta a segunda maior magnitude;
- a ICU teve duração temporal de 1 hora até 7 horas, sendo as de maior frequência as ilhas de calor de cerca de 3 horas (quatro ocorrências).

Posto B (Aval de Baixo)

- quanto aos dados estatísticos simples, o posto B é, em média, o segundo posto mais quente, imediatamente a seguir ao posto I;
- regista a temperatura máxima mais elevada do conjunto de todos os postos em análise;
- a seguir ao posto C, apresenta as temperaturas mínimas mais elevadas em igualdade com o posto I;
- apresenta somente 2 ocorrências de máxima intensidade de I C U nocturna (2/47);
- revela valores de desvios térmicos $((\Delta\Theta)_u)_{max}$ entre 2,8 °C e 6,0 °C;

- as 2 ocorrências de máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano nocturna verificaram-se perante Anticiclone centrado no Atlântico, com vento fraco a Variável;
- a ICU teve duração temporal de cerca de 1 hora ou 5 horas.

Postos A (R. Tejo,), E (Nove de Abril), G (Covelo), H (Largo do Padrão Norte) e J (S. João de Brito)

- no actual período de aquisição de dados, estes postos não apresentaram qualquer ocorrência de máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano nocturna, segundo o critério definido, embora apresentassem geralmente situações de ICU, nos mesmos dias e horas, à semelhança dos postos acima referidos;
- com a introdução na análise dos três novos postos de aquisição de dados no presente estudo, os postos A e E¹² em nada alteram a sua posição relativa quanto aos dados estatísticos simples;
- com a introdução na análise dos três novos postos, o posto G passa a ser, em média, o terceiro posto mais frio, a seguir aos postos C e J; continua a apresentar a temperatura mínima mais baixa de todo o conjunto.

Posto H (Largo do Padrão)

- o posto H revela valores de desvios nocturnos $(\Delta\Theta)_u$ até 7,8 °C (06/07-2010 às 05h00);
- apresenta uma temperatura mínima relativamente elevada (8,4°C);
- é, em média, o terceiro posto mais quente, imediatamente a seguir aos postos I e B;
- apresenta a segunda temperatura máxima, depois do posto B.

Posto J (S. João de Brito)

- posto J revela valores de desvios nocturnos $(\Delta\Theta)_u$ até 5,5 °C (06/07-2010 às 04h00);
- apresenta uma temperatura mínima relativamente elevada (8,7°C);
- é, em média, o posto mais fresco de todo o conjunto (20,0 °C);
- apresenta, em igualdade de circunstâncias com o posto C, a temperatura máxima mais baixa do conjunto em observação (38,0°C).

¹² No estudo de Março de 2009, efectuado sobre os dados adquiridos em 2004/2005, estes dois postos apresentavam respectivamente, somente duas e uma ocorrências de máxima intensidade de ICU;

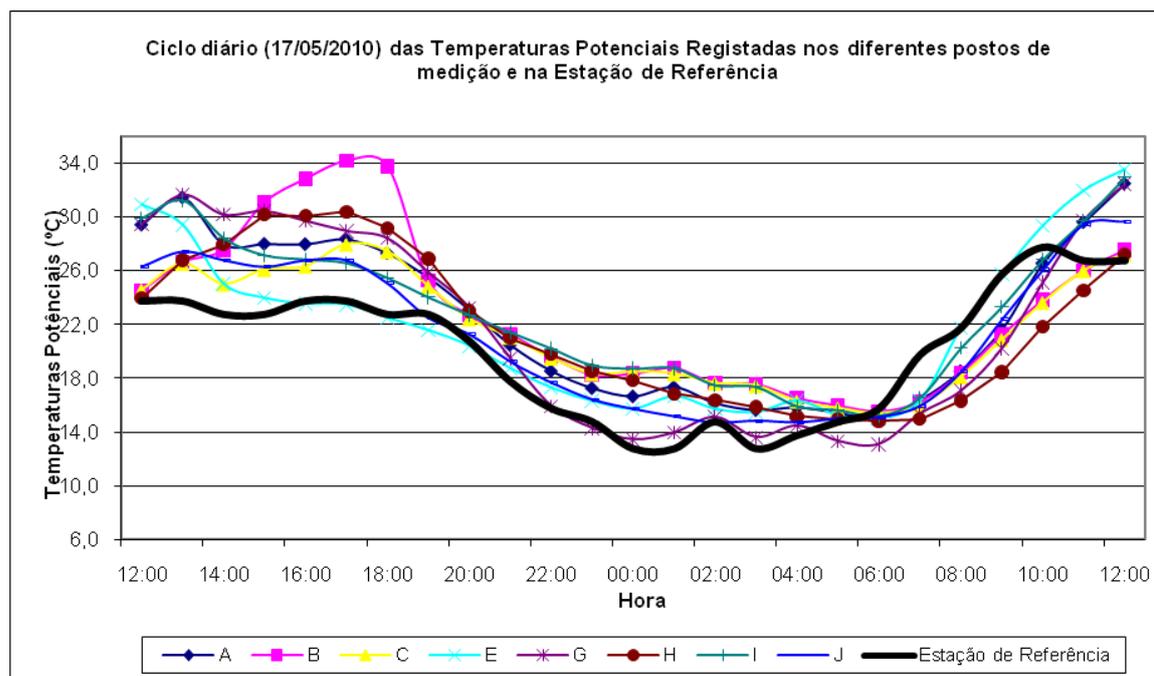


Fig. 4 - Exemplo do tratamento gráfico da duração da ICU: ciclo diário das temperaturas potenciais vs Aeroporto.

Estudou-se a estrutura da dependência temporal das temperaturas potenciais e dos desvios das temperaturas potenciais relativamente à estação de referência do Aeroporto de Pedras Rubras. Procurou-se ainda detectar eventuais ciclicidades nos registos com recurso a “*variogramas temporais*”.

Como alternativa ao estudo clássico trataram-se as séries temporais no contexto da geoestatística (Góis, 2004), tentando mostrar a estrutura da variabilidade temporal das temperaturas e dos desvios térmicos através da construção de semivariogramas que evoluem no tempo. Considerando $T(X_t)$ o valor da temperatura ou do desvio térmico na hora $t = 1, 2, 3, \dots$ e impondo que o processo obedeça aos seguintes constrangimentos:

- $E[T(x_t)] = \text{const. } \forall t \in \text{dominio}$ (estacionaridade);

- $\text{Var} [T(x_t) - T(x_s)] = 2\gamma |t - s|$, $\forall t \neq s \in \text{dominio}$ (isotropia).

é possível definir o semivariograma temporal como,

$$\gamma(t) = \frac{1}{2N(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} [T(X_i) - T(X_{i+t})]^2 \quad (1)$$

onde:

$\gamma(t)$ é o semivariograma para um vector t (horas);

$T(X_i)$ e $T(X_{i+t})$ são os pares de observações das temperaturas ou desvios separados pelo vector t (horas);

$N(t)$ é o número de pares de valores de temperaturas ou desvios calculados $T(X_i)$ e $T(X_{i+t})$, separados por t horas.

A observação dos variogramas experimentais, Figura 5 - a), b) (a título ilustrativo, apresentam-se somente gráficos relativos aos registos das temperaturas potenciais e aos desvios calculados para a estação de Faria Guimarães), com uma descrição formal muito semelhante à da Equação (1), permite identificar através da análise dos seus parâmetros algumas características da série temporal em estudo, assim:

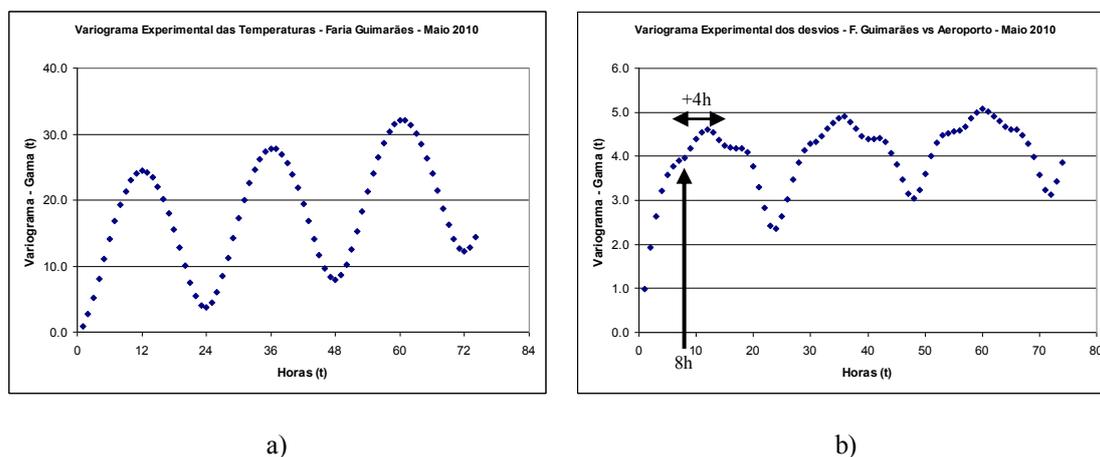


Fig. 5 - a) Variograma temporal das temperaturas potenciais relativas à estação de Faria Guimarães
b) Variograma temporal dos desvios térmicos relativos à estação de Faria Guimarães

O variograma dos registos das temperaturas potenciais (Figura 5.a)) evidencia a expectável ciclicidade na correlação dos valores das temperaturas horárias e diárias, isto é, as temperaturas estão correlacionadas entre si por intervalos de tempo iguais ou inferiores a 12 horas (correlação horária) ou em intervalos de tempo de aproximadamente 24 horas (correlação diária).

Com base na mesma metodologia, foi elaborado o variograma temporal sobre os registos dos desvios térmicos das temperaturas potenciais da estação de Faria Guimarães em relação às temperaturas potenciais do Aeroporto.

A análise do referido variograma (Figura 5.b)) permite-nos as seguintes conclusões:

- São evidentes dois períodos de correlação temporal (na terminologia geoestatística conhecido por at - alcance do variograma). Um primeiro período de correlação temporal com a duração máxima aproximada de 8h e um segundo período de correlação temporal com uma duração máxima aproximada de mais 4h;
- Pese embora os resultados não sejam inequívocos (ter-se-á de alargar o período de observação) estamos convictos que estes diferentes períodos de correlação temporal poderão estar ligados à duração (em horas) dos desvios térmicos positivos e desvios térmicos negativos. Esta apreciação poder-se-á revelar fundamental na determinação do tempo de duração de ilhas de calor ou de ilhas de frio.

4. Discussão

Relativamente ao estudo estatístico de caracterização da evolução da magnitude e da extensão espaço-temporal da Ilha de Calor Urbano nocturna, oferece-nos concluir o seguinte:

O maior número de ocorrências de máxima intensidade de Ilha de Calor Urbano nocturna $((\Delta\Theta)_u)_{\max}$ corresponde aos postos localizados em áreas mais intensamente urbanizadas, com baixos valores de svf e altos valores de D_B .

No conjunto dos postos em análise destacam-se nitidamente dois grupos de características recorrentemente distintas: um grupo constituído pelos postos A, E, G e J ao qual correspondem anomalias térmicas de valores habitualmente baixos; outro grupo constituído pelos postos B, C, H e I ao qual correspondem anomalias térmicas habitualmente elevadas, as quais podem atingir, em média, valores da ordem de entre 20% a 58% mais elevados relativamente aos do primeiro grupo referido.

Relativamente aos dados recolhidos/tratados anteriormente (período de aquisição de dados de 2004/2005), os resultados agora obtidos revelam que o "epicentro" da máxima intensidade da ICU nocturna se deslocou do posto C para o posto I. O posto que apresenta nesta fase de medições a maior frequência e maior magnitude de máxima intensidade de ICU nocturna, é o posto I (Faria Guimarães), o que é expectável e está claramente relacionado com a elevada densidade de edifícios e um dos mais baixos svf . O posto C (Costa Cabral), apesar de continuar a ser um dos postos mais frios, em média, apresenta a segunda maior frequência e magnitude de máxima intensidade de ICU nocturna, o que também está claramente relacionado com a elevada densidade de edifícios e o baixo svf , à semelhança do referido para o posto I. No posto B (Aval de Baixo) verificaram-se unicamente duas ocorrências de máxima intensidade de ICU nocturna: assim mesmo, esta situação não é expectável, dado que a este posto não correspondem os terceiros valores mais baixos de svf e mais elevados de D_B , pelo que se conclui que deve existir outro factor explicativo que condiciona a magnitude e frequência de máxima intensidade de ICU; no decurso da investigação surgiram circunstâncias que nos levam a crer que os resultados obtidos neste posto possam estar a ser influenciados pela radiação solar directa e pela irradiação das paredes do edifício, às horas de maior incidência solar, razão pela qual esta questão está a ser actualmente objecto de investigação.

Contrariamente ao expectável, dada a sua localização, baixo valor de svf e elevada D_B , o posto H não apresenta nenhuma ocorrência de máxima intensidade de ICU nocturna, embora apresente situações frequentes de ICU de magnitude considerável; este facto deve estar relacionado com o factor condicionante de proximidade ao rio Douro (cerca de 680 metros em linha recta) e também com uma localização do posto bastante ao abrigo dos ventos, excepto em caso de ventos de quadrante sul, quando se verifica claramente uma descida no valor desses desvios, habitualmente elevados.

O facto de os postos A, E, G e J apresentarem 0% de ocorrências de máxima intensidade de ICU nocturna deve-se provavelmente a diferentes factores condicionantes, em parte relacionados com os valores de svf e de D_B . No entanto, estes postos de medição devem ser objecto de tratamento mais aprofundado para poderem ser identificados outros eventuais factores explicativos de importância relevante. No entanto, a pesquisa até agora efectuada permite-nos adiantar desde já as seguintes explicações: quanto ao facto de o posto G apresentar 0% de ocorrências de máxima intensidade de ilha de calor deve-se provavelmente a este posto corresponder ao valor mais elevado de svf e mais baixo de D_B , dada a sua localização em terreno aberto, pouco urbanizado; relativamente aos postos A e J, estes correspondem a áreas de baixa densidade construtiva e de razoavelmente elevado svf , no caso do posto J acresce ainda que este se localiza somente a cerca de 3 quilómetros do mar (medidos em linha recta), sofrendo provavelmente uma influência acentuada das brisas marítimas, as quais contribuem para diminuir ou anular os valores dos desvios térmicos; quanto ao posto E, apesar de se inserir numa área de elevada densidade construtiva, está nas proximidades de um parque arborizado de dimensão razoável (cerca de 2,4 hectares), o que contribui certamente para baixar os valores das anomalias térmicas.

Relativamente às relações entre as propriedades da Ilha de Calor Urbano e as Situações Sinópticas que lhe estão associadas, na época do ano em estudo, pudemos concluir o seguinte:

O total das trinta e duas situações sinópticas de estabilidade ou de relativa estabilidade observadas, foram subdivididas em cinco grupos que revelaram características distintas.

- i) Verificaram-se dez situações sinópticas de indiscutível estabilidade, correspondentes a:
- Anticiclone centrado no Atlântico, de grande desenvolvimento transversal, fundamentalmente com ventos de Norte e ar de trajecto marítimo, em que ocorreram desvios térmicos que variaram entre 2,0 °C e 4,3 °C, em que a ICU teve duração temporal de 1 hora até 8 horas, dependendo da direcção e velocidade do vento, e extensão espacial muito variável;
 - Anticiclone centrado no Atlântico, de grande desenvolvimento longitudinal, prolongado desde os Açores até às Ilhas Britânicas, muitas vezes intensificado no Golfo de Biscaia, com ventos já de tendência de trajecto continental, em que os desvios térmicos variaram entre 2,8 °C e 6,3 °C, em que a ICU teve duração temporal de 1 hora até 7 horas, dependendo da direcção e velocidade do vento, e com extensão espacial muito variável.

ii) Verificaram-se oito situações de estabilidade, de curvatura anticiclónica, associadas geralmente a Anticiclone centrado no Atlântico, mas com depressão barométrica nas proximidades da Península Ibérica, que revelaram as seguintes características: os desvios térmicos variaram entre 2,5 °C e 5,5 °C, respectivamente com massa de ar de trajecto tipicamente marítimo vs continental, em que a ICU teve duração temporal entre 2 horas a 5 horas e extensão espacial muito variável, mas geralmente extensa.

iii) Verificaram-se doze situações sinópticas de estabilidade, de curvatura neutra, associadas geralmente a Anticiclone centrado no Atlântico, mas com depressão barométrica nas proximidades da Península Ibérica, que revelaram as seguintes características: os desvios térmicos variaram entre 2,2 °C e 9,7 °C, respectivamente com massa de ar de trajecto tipicamente marítimo vs continental, em que a ICU teve duração temporal entre 1 hora e 7 horas e extensão espacial muito variável; nestes casos, as anomalias térmicas de valor mais elevado correspondem a situações de massa de ar de trajecto continental, provenientes do norte de África e do Mediterrâneo.

iv) Verificou-se somente uma situação sinóptica de estabilidade correspondente a Anticiclone Continental, que revelou as seguintes características: os valores de desvios são relativamente baixos, de 3,7 °C, ocorreram perante calma e com 4 horas de duração temporal; esta única ocorrência de ICU nocturna ($(\Delta\Theta)_u$)_{max} do período agora em análise, em situação de estabilidade com Anticiclone Continental, contraria os resultados obtidos no período 2004/2005 pois, expectavelmente ocorre a formação de ICU com calma ou vento fraco (<3m/s), mas neste caso com valores de desvios relativamente baixos (3,7 °C), em comparação com os dados das medições anteriores. Cremos dever-se este facto à posição desta alta pressão, em margem direita do Anticiclone principal, favorecendo a circulação de ar de trajecto marítimo.

v) Verificou-se uma única situação sinóptica de relativa estabilidade correspondente a curvatura ciclónica, com depressão barométrica no Atlântico, que revelou as seguintes características: os valores de desvios térmicos são baixos, de 2,5 °C, ocorreram perante calma e com duração temporal de somente 1 hora; cremos que esta única ocorrência de

ICU nocturna $((\Delta\Theta)_u)_{\max}$ do período agora em análise, em situação de curvatura ciclónica, se deva ao facto de o gradiente barométrico ser muito baixo, mas a incipiente ICU também se dissipou muito rapidamente.

O total das quinze situações sinópticas de instabilidade observadas, foram correspondentes a depressão barométrica geralmente de origem térmica, mas com Anticiclone localizado no Atlântico, revelaram as seguintes características:

- perante depressão localizada sobre a Península Ibérica e margem direita de Anticiclone Atlântico junto à costa – o que origina ventos de trajecto nitidamente marítimo – os desvios térmicos variaram entre 2,0 °C e 3,6 °C, a ICU teve duração temporal variável entre 1 hora até 4 horas, dependendo da direcção e velocidade do vento, podendo a ICU ser espacialmente extensa.
- perante depressão localizada no/ou a sudoeste da Península Ibérica – o que origina calmaria ou ventos fracos de trajecto continental, muitas vezes provenientes do Mediterrâneo ou do norte de África – os desvios térmicos variaram entre 4,3 °C e 8,1 °C, a ICU teve uma duração temporal variável entre 4 horas a 7 horas, dependendo da direcção e velocidade do vento, podendo a ICU ser espacialmente extensa.

O tratamento das séries temporais no contexto da geoestatística acima referido, veio confirmar os resultados obtidos através da observação empírica e do tratamento estatístico simples e revelou, através da construção de semivariogramas que evoluem no tempo, a seguinte estrutura da variabilidade temporal das temperaturas e dos desvios:

Os variogramas das temperaturas potenciais evidenciam a expectável ciclicidade na correlação dos valores das temperaturas horárias e diárias, isto é, as temperaturas estão correlacionadas entre si por intervalos de tempo iguais ou inferiores a 12 horas (correlação horária) ou em intervalos de tempo de aproximadamente 24 horas (correlação diária).

São evidentes dois períodos de correlação: um primeiro período de correlação temporal com a duração máxima aproximada de 8h e um segundo período de correlação temporal com uma duração máxima aproximada de mais 4h.

Como conclusões finais, podemos afirmar que na época do ano em análise, correspondente praticamente a um período de verão, constatou-se que o maior número de ocorrências de máxima intensidade de ICU nocturna $((\Delta\Theta)_u)_{\max}$ está relacionado com situações sinópticas de nítida estabilidade ou de relativa estabilidade, prefazendo um total de 32 casos, nomeadamente:

- 10 situações de Anticiclone, centrado no Atlântico (AC Atl.);
- 8 situações de curvatura anticiclónica (ac, AC Atl.);
- 12 situações de curvatura neutra (nc, AC Atl.);
- 1 situação de Anticiclone Continental (AC Cont., na realidade um prolongamento de AC Atl.);
- 1 situação de curvatura ciclónica (cc, C Atl.).

Ocorreram também 15 casos de máxima intensidade de ICU nocturna $((\Delta\Theta)_u)_{\max}$ sob Depressão Barométrica, as quais, por se tratar de uma época de verão, correspondem na generalidade a baixas pressões de origem térmica (C).

Podemos afirmar ainda que, quer a magnitude (2,0 °C a 9,7 °C), quer a extensão temporal da Ilha de Calor Urbano na área de estudo são muito variáveis: os episódios de ICU nocturna

podem apresentar uma duração de aproximadamente entre 1 hora até 8 horas, com valores de magnitude muito diversos.

Os episódios de ICU de maior extensão territorial nem sempre coincidem com os de maior extensão temporal. Estes, por sua vez, correspondem geralmente às magnitudes mais elevadas.

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). Estamos a trabalhar estatisticamente para verificar se deveremos excluir/incluir exemplos de ilhas de calor até ao limite inferior de 1°C, pelo que nos propomos reanalisar os dados, descendo eventualmente a fasquia do critério de selecção.

A maior parte dos resultados preliminares obtidos estão em conformidade com o expectável mas terão de ser confirmados com séries de dados temporalmente mais extensas para abrangerem todos os períodos de observação propostos (período de pelo menos um ano, com cobertura temporal de todas as estações do ano).

5. Referências

Alcoforado M. J. (1993) O Clima da Região de Lisboa – Contrastes e Ritmos Térmicos, C E G da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Alcoforado M J, Alegria M F, Pereira A 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 e Ekeblad C (2004) Högsommardagar i Sverige 1917- 2003. Department of Physical Geography, Earth Sciences Centre Göteborg University, Göteborg.

Araújo M A (1991) Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral da Região do Porto, Dissertação de doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.

Balkeståhl L (2005) Os efeitos da intensificação dos processos de urbanização no balanço energético local: Estudo de caso no pólo da Asprela, Dissertação de mestrado, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.

Balkeståhl 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, 6TH International Conference on Urban Climate, Gotemburgo, 458-461.

Balkeståhl L, Monteiro A, Góis J, Taesler R (2008) The Sky View Factor as an Indicator for Urbanization Effects: case study in Paranhos, Porto. The 3TH Annual Congress of the Council for European Urbanism - Climate Change and Urban Design, Oslo.

Balkeståhl L (Março/2009) Estrutura espaço-temporal da Ilha de Calor Urbano, Cadernos do Curso de Doutoramento em Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.

Balkeståhl L (Novembro/2009) Extensão Temporal e Magnitude Máxima da Ilha de Calor Urbano - Estudo de caso em Paranhos, Porto. VII Congresso da Geografia Portuguesa, Coimbra.

Bergström H (2007) Vindpotentialen i Sverige på 1 Km-skala. Institutionen för Geovetenskaper, luft och vattenlära. Uppsala Universitet, Uppsala, Sverige.

Fernandes J A R (2007) Urbanismo sustentável: pela redução, reciclagem e reutilização da cidade. Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto II Série, Volume I,-pp. 161-176

Góis J (2004) Contribuição dos Modelos Estocásticos para o Estudo da Climatologia Urbana, Dissertação de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Monteiro A (1997) *O Clima Urbano do Porto*, Contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território, Fundação Calouste Gulbenkian, ISBN 972-31-0750-3

Oke T.R. (1987), *Boundary layer climates*, Routledge, London and New York

Ramos C. 1986 *Tipos de Anticiclones e Ritmo Climático de Portugal*, Centro de Estudos Geográficos, INIC Lisboa 1986

Taesler R. (1980) "Studies of the development and thermal structure of the urban boundary layer in Uppsala", Relatório N° 61, Uppsala

<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/>

<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html>