



RELATÓRIO

FASE 1 | FEVEREIRO 2020

Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para Áreas Críticas na Cidade de Lisboa

Cartografia
de Vulnerabilidade Térmica:
Mapeamento dos Efeitos
das Ondas de Calor em Lisboa
Face às Projecções Climáticas



ONDAS de CALOR LISBOA

Em parceria com:



75
anos

Cofinanciado por:





IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA

Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Relatório

16/2/2020

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

FICHA TÉCNICA

Coordenador	António Lopes
Membro da Equipa	Ana Oliveira
Membro da Equipa	Ezequiel Correia
Membro da Equipa	Cláudia Reis

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

ÍNDICE

FICHA TÉCNICA.....	2
Índice.....	3
Índice de Figuras	4
Índice de Quadros	5
Preâmbulo	6
1. Introdução.....	7
1.1. Clima urbano e Tipos de Tempo Locais (TTL).....	7
1.2. Ilhas de Calor Urbano e o Seu Impacte	9
1.3. Lisboa e as Alterações Climáticas.....	11
1.4. Identificação e caracterização do fenómeno de Ilha DE calor urbano	12
2. Ciclo Térmico Anual e Tipos de Tempo em Lisboa.....	13
2.1. Ciclo Térmico Anual.....	13
2.2. Tipos de Tempo LOCAIS (TTL) Dominantes em Lisboa.....	16
3. Caracterização da Ilha de Calor Urbano.....	20
3.1. A Rede de Observações.....	20
3.2. Intensidade da ICU em condições típicas de Inverno e Verão	21
3.3. Intensidade da ICU em Dias de Calor Extremo.....	29
4. Padrão Espacial da ICU típica dos Tipos de Tempo Dominantes e Dias de Calor Extremo.....	31
4.1. Modelação Espacial: Dados e Metodologia	31
4.1.1. Intensidade da ICU: parâmetros	32
4.1.2. Variáveis Explicativas Consideradas.....	33
4.1.3. Modelo Geoestatístico	38
4.2. Mapas da Ilha de calor urbano Típica	39
5. CONCLUSÕES.....	47
Bibliografia	50
ANEXO	53

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Temperaturas médias estacionais (2009-2018) em Lisboa e momentos astronómicos....	14
Figura 2 – Temperaturas médias diárias (curva) e estacionais (reta horizontal) em Lisboa (2009-2018). (vermelho – máxima; verde – média; azul – mínima)	14
Figura 3 – Frequência estacional de ocorrência de TTL em Lisboa.....	19
Figura 4 – Localização das estações da rede de mesoescala do CEG/IGOT.....	21
Figura 5 - Ciclo Diário da intensidade da ICU observada, em estações da Rede CEG/IGOT (a-e) e por TTL (i-ii): mediana (ICU50p), primeiro quartil (ICU25p), terceiro quartil (ICU75p), e percentis 90 (ICU90p) e 10 (ICU10p).	24
Figura 6 – Diagramas de extremos e quartis da intensidade da ICU nos TTD de Verão (esquerda) e Inverno (direita), nas estações da Rede CEG/IGOT: Carnide (CAR), Monsanto (MON), Vale de Alcântara (VAL), Campo de Ourique (OUR), Restauradores (RES), Saldanha (SAL), Bairro Alto (BAL), Parque das Nações (PNA). Distribuição empírica dos valores extremos (ICU95p e ICU5p) e quartis (ICU25p, ICU50p e ICU75p) da intensidade da ICU nos períodos de valor positivo: em cima, nas 3 horas de valor máximo diário, ao Entardecer (em cima); em baixo, durante o período estável noturno.	27
Figura 7 - Ciclo Diário da Temperatura do Ar registada no Aeroporto e nos Restauradores, e intensidade da ICU durante: (a) condições medianas do TTD de Verão (percentis 50 da temperatura do ar, T50p); e (b) condições de calor extremo do TTD de Verão (percentis 90 da temperatura do ar, T90p).	28
Figura 8 - Ciclo da intensidade da ICU e as temperaturas horárias registadas no Aeroporto e nos Restauradores, entre os dias 4 e 6 de julho de 2010.....	30
Figura 9 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Inverno - Entardecer.....	40
Figura 10 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Inverno - Noite.....	41
Figura 11 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Verão - Entardecer.....	42
Figura 12 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Verão - Noite.....	43
Figura 13 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Onda de Calor - Entardecer.	45
Figura 14 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Onda de Calor – Noite.	46

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 1 – Caraterísticas das estações térmicas atuais em Lisboa	15
Tabela 2 – Elementos climáticos utilizados para a classificação dos tipos de tempo em Lisboa.	18
Tabela 3 – Condições médias de temperatura, nebulosidade e velocidade do vento com vento de N, NO e O.	19
Tabela 4 – Valor da intensidade da ICU, calculada como a mediana da diferença entre cada estação da Rede CEG/IGOT e o Aeroporto por TTLD, ao entardecer (máximo diário) e durante a noite (período estável positivo)	33
Tabela 5 – Listagem de Imagens ETRS+/Landsat 7 utilizadas no presente estudo	36
Tabela 6 – Listagem das Variáveis Explicativas testadas na modelação	37
Tabela 7 – Erros dos Modelos de Interpolação EBKRP selecionados.....	39

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

PREÂMBULO

De acordo com o **Contrato de Aquisição de Serviços nº 19042458**, designado “Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para as Áreas Críticas na Cidade de Lisboa”, apresenta-se o Relatório da Fase 1 de acordo com a cláusula 3, ponto 2 a) do Caderno de Encargos.

O presente relatório é dedicado à fundamentação científica e à caraterização dos padrões da Ilha de Calor Urbano Atual, expressos na cartografia digital entregue¹, designadamente:

- a) Mapa da Ilha de Calor Atual no Inverno, ao entardecer
- b) Mapa da Ilha de Calor Atual no Inverno, durante o período noturno
- c) Mapa da Ilha de Calor Atual no Verão, ao entardecer
- d) Mapa da Ilha de Calor Atual no Verão, durante o período noturno
- e) Mapa da Ilha de Calor Atual durante um dia de Onda de Calor, ao entardecer
- f) Mapa da Ilha de Calor Atual durante um dia de Onda de Calor, durante o período noturno

¹ Inclui-se em anexo a este relatório os metadados da cartografia elaborada.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

1. INTRODUÇÃO

1.1. CLIMA URBANO E TIPOS DE TEMPO LOCAIS (TTL)

Os climas urbanos tiveram uma atenção muito especial a nível mundial a partir da individualização desta disciplina na segunda metade do século XX, principalmente depois do reconhecimento internacional sobre as causas antropogénicas das alterações climáticas globais. E se num primeiro momento as cidades mereciam pouca atenção nos estudos do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), mais recentemente é um tema recorrente, sobretudo depois da primeira edição do livro *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network* (Rosenzweig et al., 2011), recentemente atualizado pelo *The Earth Institute* da Universidade de Columbia (Rosenzweig et al., 2018). Esta obra teve o alto patrocínio de várias entidades e individualidades reconhecidas internacionalmente, como Anne Hidalgo, atual presidente da Câmara de Paris e anterior presidente do grupo *C40 Cities Climate Leadership Group* (atualmente liderado pelo Mayor de Los Angeles).

A atmosfera urbana responde aos fluxos de energia, e da água, mas também a concentrações de gases e partículas, cujos “ciclos naturais” são modificados pelas atividades humanas. Os climas urbanos são indubitavelmente um produto dessas atividades e os estudos pretendem responder ao modo mais adequado de lidar com uma grande variedade de superfícies diferentes das paisagens naturais (Oke et al., 2017).

O crescimento urbano, sem precedentes na história da humanidade (em 2030 estima-se que 60% da população mundial habitará em áreas urbanas, valor que aumentará para 65% em meados do século XXI), levanta muitos desafios mesmo não considerando o maior de todos, que é o das alterações climáticas globais.

Gerir territórios e “cuidar” populações mais expostas a extremos climáticos, como as Ondas de Calor (OC) – que se projetam mais intensas e frequentes no futuro, torna-se assim um imperativo. Ao efeito das ondas de calor, qualquer que seja a sua definição, deve-se antes de mais adicionar um outro, conhecido como ilhas de calor urbano (ICU). No próximo ponto descrevem-se essas ICU, mas pode-se adiantar que elas correspondem a núcleos mais aquecidos nas cidades, sobretudo em áreas mais densas e poluídas e com menos vegetação. Note-se que os primeiros trabalhos na cidade de Lisboa remontam a 1986, quando M.J. Alcoforado apresentou um estudo intitulado:

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

“*Contribution to the Study of Lisbon’s Urban Heat Island: Analysis From an Infra-Red Image*”, apresentado no *International Symposium of Urban and Local Climatology*, em Freiburg.

Os climas locais das cidades dependem da integração dos elementos climáticos, que por sua vez, resultam da soma do efeito regional (*background climate C*, ou clima de mesoescala), dos elementos das paisagens locais (L) e do efeito urbano (E), (este modelo foi proposto por Lowry, em 1977 [1]). Sendo M o valor medido de um elemento climático, para um determinado tipo de tempo *i*, durante um período *t* na estação *x*.

$$M_{itx} = C_{itx} + L_{itx} + E_{itx} \quad \text{Equação 1}$$

Como denominador comum, surge aqui o tipo de tempo, que pode tomar duas formas: o tipo de tempo sinóptico; e o tipo de tempo local, que definem em boa medida o pulsar dos padrões térmicos nas cidades. O primeiro, de natureza sinótica - *Weather Type Classification (WTC)*, corresponde aos grandes padrões meteorológicos de larga escala e que influenciam uma região: padrões de pressão, sistemas frontais, velocidade e direção do vento e a forma como evoluem ao longo de um período alargado de tempo (geralmente dias) caracterizam estes tipos sinóticos e são normalmente observados em cartas sinóticas de superfície e de altitude (geralmente 500hPa); o segundo corresponde às variações locais dos elementos meteorológicos (temperatura, vento, humidade, precipitação, etc.), ou seja, os estados da atmosfera numa sucessão natural que definem os climas locais. Neste caso, o termo “local” define as condições da camada limite atmosférica que rodeia a cidade. Podem assim ser facilmente caracterizados os tipos de tempo “quentes e secos”, ou “frios e chuvosos”, “os ventosos”, etc., numa multiplicidade de cambiantes que se traduzem em frequências de ocorrência das combinações dos parâmetros meteorológicos que definem cada um deles. A sua utilização neste trabalho permitirá associar os vários tipos de ICU de acordo com os tipos de tempo mais frequentes, de modo a termos uma imagem mais clara das frequências com que as ICU ocorrem e quais os padrões que determinam o seu aparecimento (Hidalgo e Jouglu, 2018).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

1.2. ILHAS DE CALOR URBANO E O SEU IMPACTE

A Ilha de Calor urbano (ICU) é considerada a mais evidente alteração climática de origem antrópica em contexto local (Oke 1982, 1987 e 2017). Fruto das alterações nas características materiais e morfológicas no território, bem como das emissões de calor e poluentes, a ICU define-se de forma sintética como uma anomalia (diferença) positiva entre a temperatura observada em meio urbano, quando comparada com aquela observada em meio não urbano. Embora seja apelidada como ‘ilha’, o seu padrão espacial não só é muito diverso entre áreas urbanas distintas, como também se altera no tempo numa mesma cidade, consoante as condições meteorológicas ou a sazonalidade (Lopes, 2003). Assim, as ICU’s podem assumir geometrias tão distintas como um padrão térmico concêntrico, tentacular ou múltiplos *hotspots* dispersos pela área urbana, embora em termos de ciclo diário a sua intensidade máxima seja comumente verificada durante a noite.

A existência de ICU, por si só, não é um fator negativo, já que em contexto de climas mais frios, ou com uma estação marcadamente fria, contribui para a diminuição das necessidades energéticas, por exemplo para aquecimento, particularmente durante o inverno. Pelo contrário, em climas quentes e/ou durante o período estival, a presença deste diferencial de temperatura pode exacerbar a exposição ao calor. Este é o caso do Sul da Europa, particularmente em Lisboa, para onde as principais projeções indicam o aumento significativo do número, duração e severidade de episódios de onda de calor, com correspondentes impactos, tais como aumento das necessidades de arrefecimento de Verão, ou os riscos para a saúde decorrentes da exposição ao calor extremo (Beniston et al. 2007; Rodríguez-Puebla et al. 2010; EEA 2012).

Estudos já efetuados, concluem que a intensidade da ilha de calor noturna de Lisboa varia, em média, entre 1^oC e 4^oC, ocorrendo em 85% das noites de Inverno e 63% das noites de Verão, (Lopes 2003; Alcoforado et al. 2006, 2009; Lopes et al. 2013). Por conseguinte, esse diferencial positivo pode contribuir para o aumento da mortalidade e morbidade em contexto de tipos de tempo muito quentes, encontrando-se documentadas a associação entre calor extremo patologias tais como golpes de calor, exaustão, distúrbios de sono, problemas respiratórios e cardíacos, entre outras (Alcoforado et al. 2009; Vasconcelos 2012). A título de exemplo, as taxas de mortalidade anuais ligadas ao calor nesta cidade poderão subir de 5,4 a 6 por 100 000 habitantes em 1980-1998 para entre 8,5 e 12,1 em 2020 e para um máximo de 29,5 habitantes por cada 100 000 em 2050 (Casimiro et al. 2006).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Refira-se, ainda, que em Portugal, em geral, e Lisboa não será exceção, a taxa de penetração de equipamentos de ar condicionado em contexto doméstico é francamente reduzida, pelo que a maioria da população (cada vez mais envelhecida e vulnerável, EUROSTAT 2017) não dispõe de meios para arrefecimento interior das suas habitações (Gouveia et al. 2018). Esta condição, que na literatura é apelidada de pobreza energética (Bouzarovski 2014; Thomson et al. 2017), torna ainda mais relevante o estudo da ICU na medida em que a exposição ao calor acrescido durante episódios de calor extremo, podem ser agravados durante o período de repouso.

Por último, apesar de se encontrarem documentadas as características gerais da ICU de Lisboa, tal como foi estudada nas décadas anteriores, diversos fatores intrínsecos e extrínsecos à cidade, sugerem a importância de visitar e aprofundar o seu estudo porque:

- Têm ocorrido diversas alterações de ocupação e uso do solo urbano, particularmente no norte da cidade e ao longo da frente ribeirinha, alterando potencialmente os padrões dominantes de circulação de vento, fator normalmente associado à dispersão da poluição e dissipação do calor;
- Os estudos sobre o clima do passado recente na região do Sul da Europa demonstram já o sinal do aquecimento durante o Verão, bem como a maior frequência/intensidade de OC, condições, portanto, diferentes daquelas verificadas aquando da aquisição dos dados usados em estudos anteriores;
- O aumento do volume e qualidade dos dados atualmente existentes, bem como das técnicas de análise e modelação geoestatística territorial, permite que a investigação sobre a ICU seja aprofundada (e quantificada) em matéria da relação entre o mosaico de climas urbanos e de tipologias morfológicas do tecido construído, bem como o peso das atividades antrópicas para esse acréscimo de temperatura;
- A existência de modelos preditivos de clima futuro permite ainda acrescentar valor ao estudo da ICU, ao convir a possibilidade de cenarizar a evolução futura da cidade e correspondente impacto no contexto de alterações Climáticas (AC).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

1.3. LISBOA E AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

De acordo com o Plano Metropolitano para as Alterações Climáticas - PMAAC-AML (AML, 2018), a evolução recente da temperatura do ar na região de Lisboa regista um aumento generalizado, tanto da máxima como da mínima, em linha, aliás, com os diversos estudos de âmbito europeu (EEA 2005; EEA 2012) ou ibéricos (Giorgi 2005; Rodríguez-Puebla et al. 2010; Fonseca et al. 2016).

O aumento generalizado nas diversas escalas temporais de análise (anual, sazonal e mensal), tem sido mais acentuado na Primavera e no Verão e tem-se traduzido, igualmente, no aumento da frequência quer do número de dias de Verão, quer do número Noites Tropicais. O mesmo se aplica ao número de eventos e dias consecutivos de OC: na AML, entre 1971 e 2016, entre +0,5 a +0,8 eventos de OC por década, e +2,5 a +3,5 dias com OC por década.

Na cidade de Lisboa, o estudo efetuado no âmbito do corrente projeto (IDAD, 2019) dedicado ao regime atual e futuro das Ondas de Calor em Lisboa, revela que a média da temperatura do ar entre 1999-2018 na estação meteorológica de Lisboa/Geofísico, se situa 1,9^oC acima da média do período 1855-1900, e 0,4^oC, da registada entre 1986 e 2005, sendo o período de Julho a Outubro aquele onde se verificam maiores diferenças.

As projeções do clima futuro apontam para um continuado aumento generalizado da temperatura do ar e dos eventos de calor extremo: segundo o mesmo estudo e de acordo com o cenário mais gravoso de concentração de gases com efeito de estufa, RCP8.5, na cidade de Lisboa, a média da temperatura máxima poderá ser superior à atual em 1,6^oC, no período 2046-2065 e 3,6^oC em 2081-2100; a média da mínima, poderá ser superior 1,6^oC e 3,1^oC, nos mesmos períodos. Os meses de Julho a Outubro são aqueles para os quais se projetam maiores aumentos na temperatura do ar, período durante o qual a ocorrência de eventos de calor extremo deverá aumentar significativamente: o número médio anual de dias em onda de calor, em meados do século poderá ser cerca de 4 vezes, superior ao atual, e cerca de 6 vezes superior no fim do século, altura em que, se se confirmar o pior cenário, em Lisboa se poderão registar, em média, cerca de 60 dias em onda de calor.

Estes factos são particularmente revelantes para a cidade de Lisboa. No PMAAC-AML (AML, 2018), refere-se que “É expectável que a subida da temperatura do ar e o aumento do número de dias de stresse térmico devido ao calor se agravem nas áreas de densidade urbana média e elevada, nomeadamente, onde ocorre o efeito ilha urbana de calor (atualmente com uma intensidade média

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

de 3°C)”, sustentando a relevância da ICU como agravante da exposição ao calor extremo quer em contexto de usufruto do espaço público, quer no contexto doméstico por via das crescentes necessidades de arrefecimento não supridas.

1.4. IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DE ILHA DE CALOR URBANO

Para uma adequada identificação do fenómeno de ICU é necessário proceder à sua caracterização temporal e espacial. Tratando-se de uma anomalia da temperatura regional, tanto a sua intensidade como a sua incidência espacial estão fortemente dependentes quer de variações sazonais, quer de condições meteorológicas (tipos de tempo locais - TTL). Particularmente em Lisboa, a velocidade e direção do vento estão identificados como fatores de maior relevo. Por conseguinte, não é adequado identificar um padrão único de ICU em Lisboa, mas sim situações-tipo representativas das condições meteorológicas mais relevantes.

Assim, a metodologia de análise da ICU em Lisboa contempla os seguintes passos:

- Identificação de Tipos de Tempo Locais Dominantes (TTL);
- Caracterização do ritmo diário e da intensidade da ICU;
- Identificação, à mesoescala, do padrão espacial de ICU's atuais representativas de cada TTL;

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

2. CICLO TÉRMICO ANUAL E TIPOS DE TEMPO EM LISBOA

2.1. CICLO TÉRMICO ANUAL

O PMAAC-AML chama a atenção para alterações no ciclo anual da temperatura, entre as quais se destaca o alargamento do período mais quente. A divisão estacional comumente utilizada, baseada em critérios astronómicos, pode levar, por isso, a que se dê menos a atenção a períodos que, pertencendo a uma estação astronómica diferente, podem ter características térmicas semelhantes.

Neste trabalho decidiu-se ensaiar uma divisão estacional baseada na análise do ciclo anual das temperaturas máxima e mínima, de forma a identificar as datas de início e fim dos períodos mais quente e mais frio do ano, em Lisboa. Mantem-se a designação das diferentes estações, mas ressalva-se que a sua classificação está relacionada apenas com as suas características térmicas.

Para o efeito utilizaram-se os valores diários da temperatura do ar registada nos últimos 10 anos (2009-2018) na estação meteorológica do Aeroporto², e aplicou-se uma análise de *clusters* à série cronológica, de modo a identificarem-se períodos com características térmicas homogéneas ao longo do ciclo anual da temperatura.

Utilizou-se um método de otimização, *K-means*, e definiram-se *à priori* 4 grupos (*clusters*), de modo a identificarem-se as estações térmicas extremas e as intermédias. Considerou-se que cada dia do ano pertence a um dado *cluster* se em, pelo menos, 7 dos 10 anos de observações estiver classificado como tal.

As datas-limite de cada período térmico foram definidas a partir da distribuição dos *clusters* ao longo do ano, considerando-se que um dado período termina quando ocorrem uma sequência de 5 ou mais dias consecutivos classificados noutra *cluster*.

Os resultados obtidos revelam quatro períodos cujo início e fim não coincide com os momentos astronómicos e com características térmicas claramente diferenciadas (Figura 1); atente-se, desde logo, na relação entre as médias estacionais das temperaturas: por exemplo, a temperatura mínima

² Os dados foram obtidos no National Centers for Environmental Information – NOAA (<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/hourly>)

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

média estacional é superior à temperatura média do período anterior, e o mesmo é válido para os outros parâmetros (Figura 2).

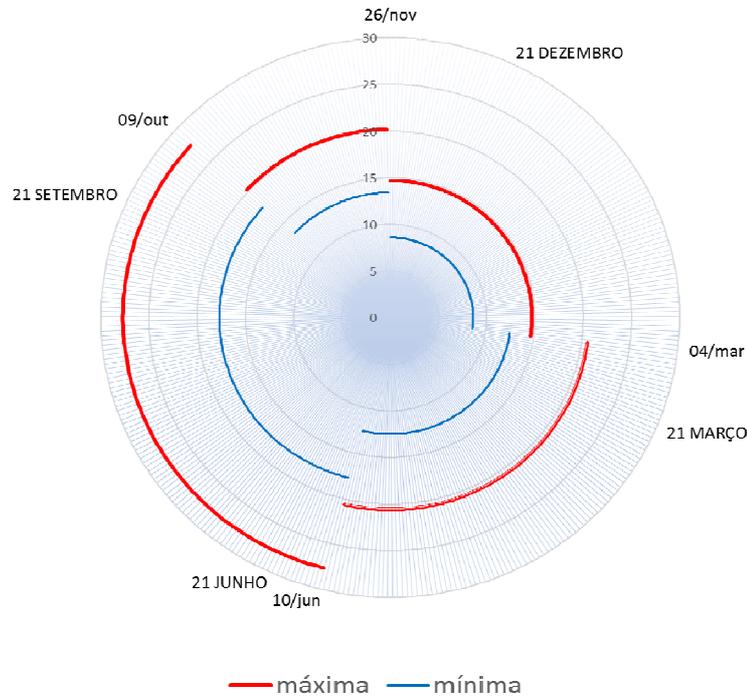


Figura 1 – Temperaturas médias estacionais (2009-2018) em Lisboa e momentos astronómicos.

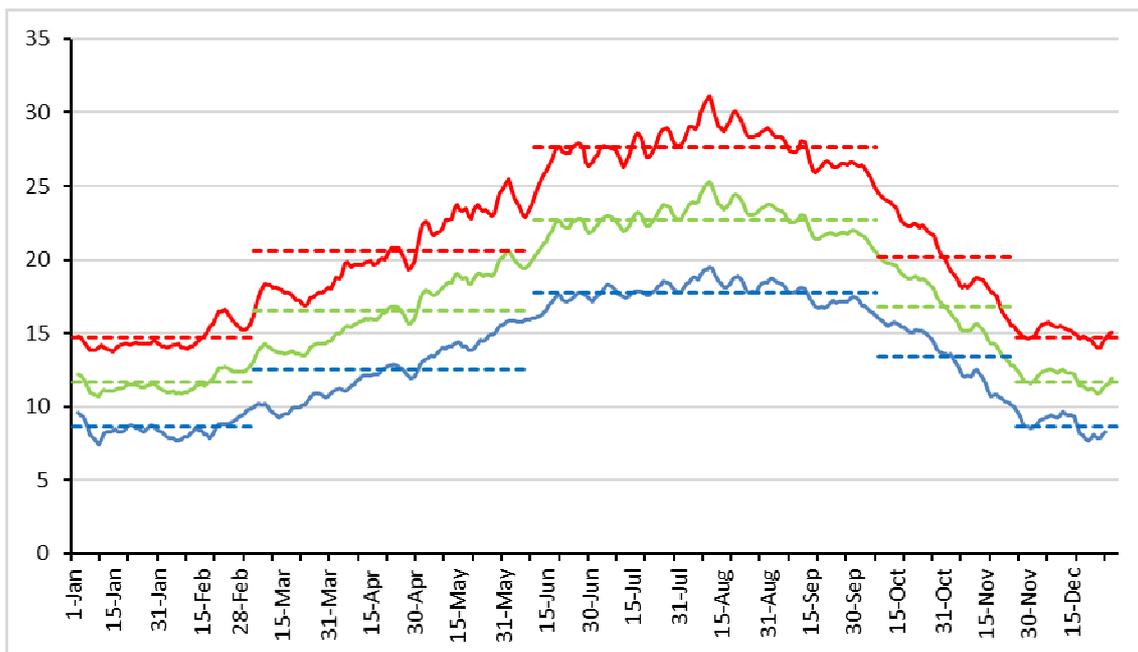


Figura 2 – Temperaturas médias diárias (curva) e estacionais (reta horizontal) em Lisboa (2009-2018). (vermelho – máxima; verde – média; azul – mínima)

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Tabela 1 – Características das estações térmicas atuais em Lisboa

Períodos Estacionais	•Início •Fim	Temperatura média (°C)		
		mínima	média	máxima
Inverno	26/11 4/03	8,6	11,7	14,7
Primavera	5/03 10/06	12,5	16,6	20,6
Verão	11/06 8/10	17,7	22,7	27,7
Outono	9/10 25/11	13,4	16,8	20,2

O período mais frio do ano, decorre entre 26 de Novembro e 4 de Abril, marcado por uma temperatura máxima média abaixo dos 15^oC e mínima de 8,6^oC (Figura 2 e Tabela 1).

O Verão decorre entre 11 de Junho e 8 de Outubro, com uma temperatura máxima média de 27,7^oC e mínima de 17,7^oC; com um período particularmente quente durante a primeira quinzena de Agosto.

Os períodos de transição não são muito diferentes entre si, quando se observam os valores médios da temperatura: a média e a máxima apresentam diferenças até 0,4^oC, sendo na mínima, de 0,9^oC. Todavia, a amplitude térmica média é maior na Primavera (8,1^oC) do que no Outono (6,8^oC), refletindo aquilo que mais distingue estas duas estações: a transição do período mais frio do ano para o mais quente faz-se de forma irregular (Figura 2) e por um período de tempo mais longo do que a transição do Verão para o Inverno; no Outono, a descida dos valores da temperatura é regular e acentuada, e ocorre durante cerca de 1 mês e meio.

Além da magnitude da alteração dos valores da temperatura do ar que se têm vindo a verificar e se projetam para o futuro na Área Metropolitana de Lisboa (AML, 2018; IDAD, 2019), as alterações no seu ciclo anual são aspetos que devem ser considerados na tomada de decisões para fazer face às AC.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Conforme se verifica na divisão estacional apresentada, o período mais frio do ano inicia-se cerca de 1 mês antes do Inverno astronómico e o seu fim é antecipado em cerca de 2 semanas; a primavera mantém a sua dimensão, mas com cerca de duas semanas de desfasamento; a alteração mais significativa, verifica-se nos outros dois períodos: o período mais quente do ano inicia-se 2 semanas antes do Verão astronómico e prolonga-se por cerca de 120 dias, até ao início da 2ª semana de Outubro. O Outono vê a sua duração encurtada, resumindo-se a cerca de 1 mês e meio.

2.2. TIPOS DE TEMPO LOCAIS (TTL) DOMINANTES EM LISBOA

A combinação de elementos climáticos (nebulosidade, temperatura, humidade, vento, precipitação, etc.), corresponde à noção de “tipo de tempo”. Essa combinação depende em grande medida das condições atmosféricas de escala sinóptica, mas estas nem sempre determinam “idênticas combinações de elementos climáticos à superfície e conseqüentemente, não se lhe associam sempre os mesmos padrões de repartição das variáveis climáticas à escala local” (Ganho, 2001, p.54), dada a influência das características da superfície que, localmente, modificam as condições atmosféricas gerais. Assim, à superfície e à escala local, a caracterização das condições atmosféricas deve decorrer da combinação de elementos climáticos observados nesse local.

Para a análise da intensidade e dos padrões espaciais da ICU na cidade de Lisboa, classificaram-se e agruparam-se as condições atmosféricas locais por tipos de tempo locais (TTL), no período entre 2009 e 2018. A classificação fundamenta-se na metodologia aplicada por Hidalgo e Jouglá (2018) no estudo do clima urbano de Toulouse, na França.

Utilizou-se os dados horários da estação meteorológica do Aeroporto de Lisboa (

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Tabela 2). Dada a inexistência de alguns elementos nos registos disponíveis nessa estação meteorológica, recorreu-se aos dados das reanálises do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF).

Os tipos de tempo foram determinados para os períodos diurno e noturno, já que as condições podem ser distintas. Foi igualmente considerada a divisão estacional referida no ponto anterior gerando-se, assim, oito TTL.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Tabela 2 – Elementos climáticos utilizados para a classificação dos tipos de tempo em Lisboa.

Elementos Meteorológicos horários	Fontes
Temperatura do ar	National Centers for Environmental Information – NOAA
Vento (direção e velocidade)	
Humidade específica	National Centers for Environmental Information – NOAA Reanálises ERA 5 Land – resolução 9km; coordenadas: 38,8; -9,2) https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview
Vento (direção e velocidade)	Reanálises (ERA 5 – resolução espacial: 25 km; coordenadas: 38,75; -9,25) https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5
Precipitação	
Nebulosidade	

Foram utilizadas as médias diárias de todos os elementos, exceto no caso da nebulosidade, em que utilizou o valor mais frequente (moda) e a combinação dos elementos climáticos à escala diária foi feita através de uma análise de clusters, utilizando o método *k-means*.

Dada a importância que a direção e a velocidade do vento têm nas condições atmosféricas em Lisboa, obtiveram-se 3 tipos de tempo para cada período diário, associada a vento de N, NO e O (i), de NE e E (ii) e S, SE e SO (iii). Conforme se verifica na Figura 3, os TTL associados a vento de N, NO e O são os mais frequentes Lisboa (> a 40% dos dias), e em particular, na Primavera e no Verão. No Verão, os período diurno (80% dos dias) e noturno são quase exclusivamente dominadas por estas condições. Dada a sua esmagadora presença no período mais quente do ano, decidiu-se analisar os padrões da ICU em Lisboa em condições de vento destes quadrantes.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

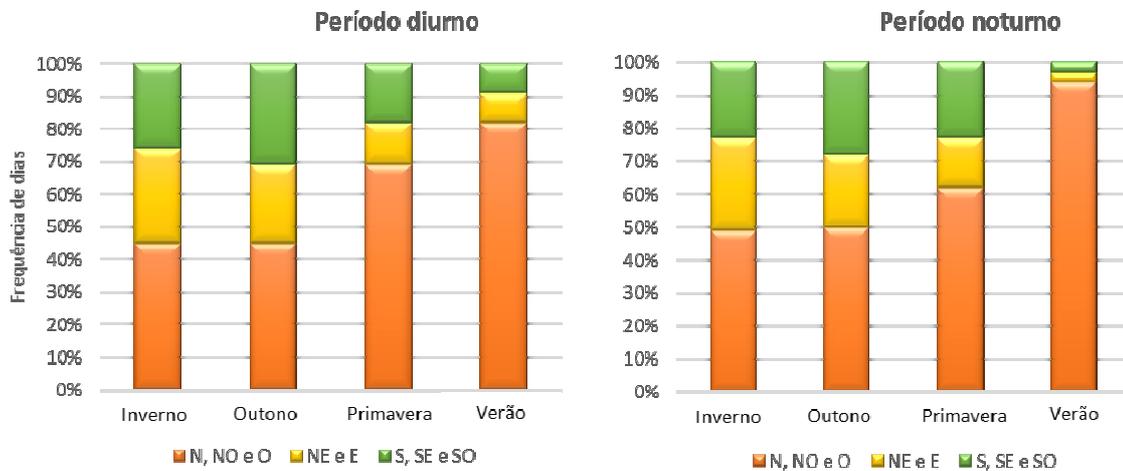


Figura 3 – Frequência estacional de ocorrência de TTL em Lisboa.

Tabela 3 – Condições médias de temperatura, nebulosidade e velocidade do vento com vento de N, NO e O.

Estações	Períodos	Temperatura (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Nebulosidade (décimos)
Inverno	Diurno	13,1	5,5	0,5
	Noturno	10,7	4,2	0,5
Primavera	Diurno	17,9	5,6	0,5
	Noturno	14,0	3,4	0,4
Verão	Diurno	24,3	5,7	0,3
	Noturno	19,3	4,8	0,3
Outono	Diurno	17,2	4,9	0,5
	Noturno	14,7	3,9	0,4

3. CARACTERIZAÇÃO DA ILHA DE CALOR URBANO

O cálculo da intensidade da ICU quantifica o sinal térmico urbano no contexto da temperatura regional. Por conseguinte, corresponde à diferença entre a temperatura do ar registada nas áreas urbanas e aquela registada em áreas rurais envolventes (Alcoforado et al., 2006; Alcoforado et al., 2014; Oke, 1982, 1987), conforme a Equação 2.

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r \quad \text{Equação 2}$$

Neste trabalho, considera-se concretamente o estudo da ICU da atmosfera urbana inferior (*Urban Canopy Layer*), ou seja, a que resulta das temperaturas registadas entre o nível do solo e o nível médio dos topos dos edifícios, dando continuidade aos estudos anteriores (Alcoforado et al., 2006; Alcoforado et al., 2014; Alcoforado et al., 2009; Lopes, 2003; Lopes et al., 2013).

3.1. A REDE DE OBSERVAÇÕES

Um dos desafios ao estudo da ICU em Lisboa corresponde à carência duma rede de observações de temperatura com séries contínuas longas e uma densidade espacial adequada à caracterização do padrão térmico da cidade. Este facto obriga a especial cuidado na seleção dos pontos de observação representativos daquilo que se designa como urbano e não-urbano. Adicionalmente, a particularidade das áreas periurbanas e suburbanas se apresentarem como um tecido construído contínuo, para além dos limites administrativos da cidade, representa um desafio acrescido na escolha de um local de referência tipicamente não urbano. Não obstante, e no sentido de permitir confrontar resultados com os estudos de referência anteriores (Alcoforado et al., 2006, 2009 e 2014; Lopes et al., 2011 e 2013) foi considerado o Aeroporto como o local não urbano de referência.

Como representativo das condições térmicas em meio em meio urbano, utilizaram-se os registos da temperatura do ar registados na rede de observações urbanas do CEG (Lopes *et al* 2013). Este centro, unidade de investigação do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT), possui uma rede fixa de mesoescala destinada à medição da temperatura e da humidade do ar na cidade de Lisboa. A rede foi constituída em 2004 com sensores providos de *data loggers* e

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

capacidade para registar em intervalos de 15 minutos, instalados em postes de iluminação a uma altura aproximada de 3,5 metros e distanciados cerca de 1 metro da estrutura de modo a evitar a sua influência térmica (Alcoforado et al., 2014).

Os sensores foram distribuídos por locais relevantes para o conhecimento dos padrões de distribuição da temperatura e dos fatores que os condicionam: dois na margem do rio Tejo, em Belém e no Parque das Nações, um no topo da colina de Monsanto e outro no Vale de Alcântara, um em Campo de Ourique, três em áreas centrais, Bairro Alto, Restauradores e Saldanha, e um na parte setentrional da cidade, Carnide (Figura. 4).

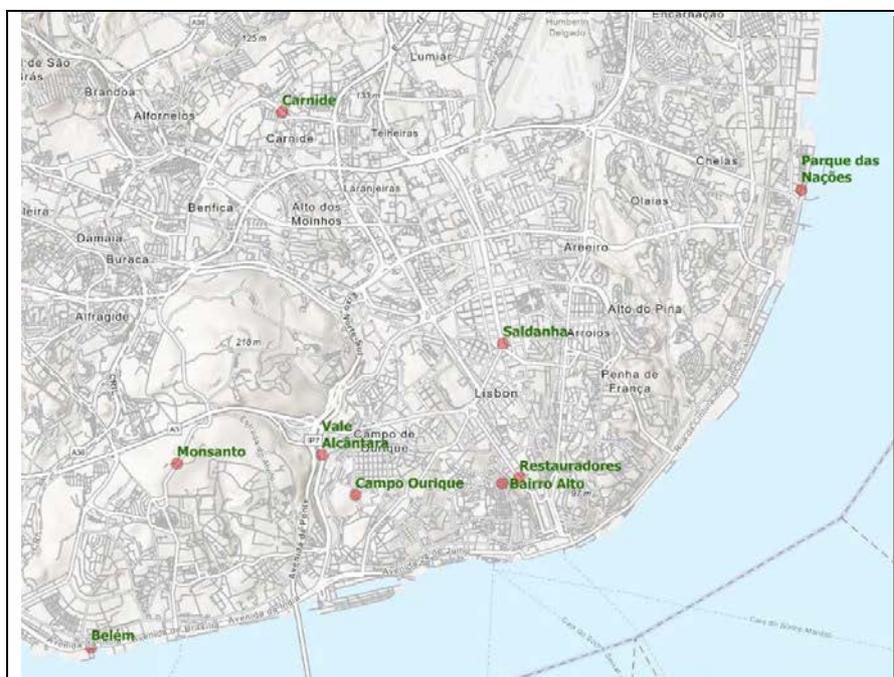


Figura 4 – Localização das estações da rede de mesoescala do CEG/IGOT.

A rede funcionou regularmente entre 2004 e 2015, ano a partir do qual deixou de ter manutenção regular. Todavia, a dimensão da série de registos não é a mesma em todos os locais, já que, não foram todos instalados na data da constituição da rede e alguns foram desativados.

Neste trabalho utilizam-se as séries de dados horários disponíveis nas nove estações entre os anos de 2009 e 2014.

3.2. INTENSIDADE DA ICU EM CONDIÇÕES TÍPICAS DE INVERNO E VERÃO

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A intensidade da ICU em Lisboa é traduzida pela diferença entre a temperatura observada em cada estação da rede do CEG/IGOT e aquela registada na estação do Aeroporto. O cálculo da intensidade da ICU foi feito para cada registo horário das séries disponíveis, considerando-se datas cujos períodos diurno e noturno tenham sido ambos identificados como representativos dos Tipos de Tempo Locais Dominantes (TTLD) de Verão e Inverno. As séries horárias da intensidade da ICU resultantes foram caracterizadas em termos de frequência estatística, identificando-se os ciclos diários da ICU, por percentis e para cada TTLD. A opção por percentis deve-se à necessidade de identificar simultaneamente a distribuição empírica das intensidades mais frequentes (mediana da ICU) a sua variabilidade. Não obstante, os valores medianos da intensidade da ICU divergem da média apenas algumas décimas de °C.

A intensidade da ICU na cidade de Lisboa possui um ritmo diário bem marcado. Na Figura 5, sintetizam-se as condições típicas durante os TTLD de Verão e Inverno, em cinco estações, representativas dos vários contextos morfoclimáticos e de ocupação urbana na cidade de Lisboa, designadamente:

1. a estação de Belém, situada na faixa ribeirinha da parte ocidental da cidade, exposta a Sul e sob influência das brisas de oceânicas ocidentais, caracterizada por um entorno construído de baixas volumetrias e compacidade;
2. a estação do Parque das Nações, situada na faixa ribeirinha oriental, mais exposta a Nascente e exposta aos fluxos continentais de leste, e instalada num núcleo local de maior densidade de urbana, devida sobretudo ao aumento do edificado em altura, de origem recente;
3. a estação de Carnide, localizada na parte setentrional da cidade, afastada da influência do Tejo e a mais exposta aos ventos de Norte (predominantes no Verão), e situada num contexto de edificado em altura que confere à área uma maior rugosidade aerodinâmica e maior razão H/W, ainda que a compacidade não seja homogeneamente elevada, em virtude de diversos espaços intersticiais livres de construção;
4. a estação de Monsanto, representativa da maior mancha arbórea de Lisboa, com carácter florestal;
5. a estação dos Restauradores, localizada no centro da cidade, mais resguardada quer dos ventos de norte quer das brisas e representativa da área urbana de construção mais

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

consolidada da cidade, com a mais elevada compacidade e razão volumétrica entre cheios e vazios.

Reforçando as conclusões de estudos anteriores sobre a ICU em Lisboa (Alcoforado et al., 2006, 2009 e 2014; Lopes et al., 2003 e 2013), e em coerência com a bibliografia de referência (Oke, 1982, 1987; Oke et al., 2017; Weston, 2007), salienta-se a consistência dos resultados entre estações urbanas (todas, exceto Monsanto): em pelo menos 50% das frequências, a intensidade da ICU afirma-se como um fenómeno positivo sobretudo durante o período do crepúsculo da tarde (entardecer) e durante a noite, independentemente do local urbano, ou da sazonalidade. Adicionalmente, confirma-se a sazonalidade da intensidade da ICU: é durante o Verão que existe a maior amplitude de valores, quer entre as curvas do percentil 90 e 10, quer entre os máximos e mínimos diários da mediana (ICU50p), o que indica uma maior variabilidade, mas também intensidades neste TTD. Também espetável pelo seu contexto florestal, a estação de Monsanto apresenta sobretudo ausência de diferenças de temperaturas positivas em relação ao aeroporto, exceto durante um período de 3 a 5h ao final do dia.

A comparação entre os perfis diários das várias estações urbanas por TTLD revelava novos elementos sobre a ICU em Lisboa, particularmente a existência de um ciclo da intensidade da ICU que se pode categorizar em cinco estádios, com características que, maioritariamente, se modificam sazonalmente:

- i. período diurno de intensidade mediana negativa, ou seja, durante o qual os espaços urbanos se encontram mais frescos do que o Aeroporto – durante o Verão, este período é mais estável (i.e., com variações horárias inferiores a $0,2^{\circ}\text{C}/\text{hora}$) e mais longo, com duração mínima de 6 horas (e.g. Parque das Nações e Campo de Ourique), *versus* duração mínima de 2h no Inverno (Restauradores), e valores mínimos que variam entre $-2,4^{\circ}\text{C}$ (Carnide) e $-0,7^{\circ}\text{C}$ (Parque das Nações) no Verão, e $-0,3^{\circ}\text{C}$ (Restauradores) e $-1,7^{\circ}\text{C}$ (Bairro Alto) no Inverno;
- ii. período diurno de aumento de intensidade da ICU, durante o qual a diferença de temperatura para o Aeroporto aumenta a um ritmo de, pelo menos, $0,2^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ – durante o Verão, a intensidade da ICU tem uma taxa de variação maior do que no Inverno, especialmente nos locais de contexto urbano mais denso e/ou consolidado (e.g. Saldanha, Belém, Parque das Nações);

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

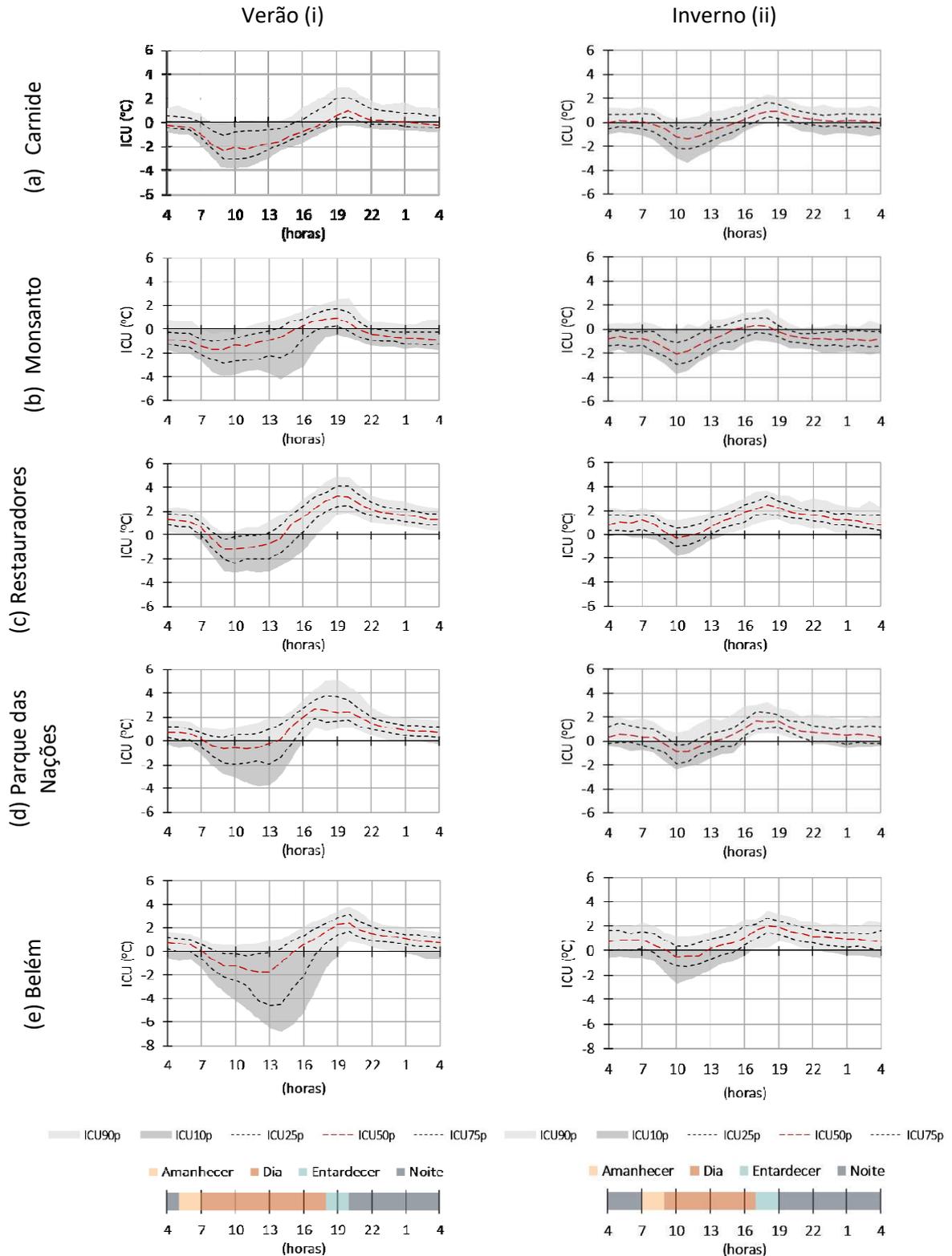


Figura 5 - Ciclo Diário da intensidade da ICU observada, em estações da Rede CEG/IGOT (a-e) e por TTLD (i-ii): mediana (ICU50p), primeiro quartil (ICU25p), terceiro quartil (ICU75p), e percentis 90 (ICU90p) e 10 (ICU10p).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

- iii. período de pico de intensidade da ICU, que ocorre durante o crepúsculo da tarde (entardecer): durante o Verão registam-se intensidades superiores às de Inverno, mais uma vez nas estações localizadas em espaço urbano mais denso/consolidado, ocorrendo durante um período de tempo que pode ser apenas pontual, como nos Restauradores, com valor mediano máximo de 3,2°C, pelas 17h no Verão, e 2,5°C pelas 18h no Inverno, ou mais prolongado, como no caso do Parque das Nações, onde o pico dura 4h no Verão, com intensidade mediana de 2,5°C, e 3h no Inverno, com intensidade mediana de 1,7°C;
- iv. período de decréscimo de intensidade da ICU, que ocorre com o anoitecer;
- v. período de estabilidade da intensidade da ICU, durante a noite: quer durante o Verão quer durante o Inverno, este período é caracterizado quer pela menor amplitude entre curvas dos percentis, quer pelas menores taxas de variação de intensidade (maioritariamente, decréscimos inferiores a 0,1°C/hora); é caracterizado ainda por uma menor dependência sazonal, visto que a diferença entre as medianas das intensidades da ICU estável noturna de Verão e de Inverno é inferior a 0,4°C em todos os casos (em média, 0,16°C inferior).

Os perfis da intensidade mediana da ICU (ICU50p) ao longo do dia mostram, não só, que existem estádios coerentes entre locais, como reforçam os resultados de estudos anteriores quanto à proximidade de resultados entre estações cujo entorno apresenta um tipo de ocupação urbana de características similares. Por outro lado, a análise por TTLD acrescenta novos elementos, na medida em que se tornam mais evidentes as diferenças entre estações da Rede CEG/IGOT que estão mais sujeitas a condições específicas dos regimes estacionais.

Destaca-se o facto de Carnide ser o único local de contexto urbano a apresentar valores de intensidade de ICU (mediana do pico de intensidade e mediana do período estável noturno) no Verão inferiores aos do Inverno, ainda que as diferenças sejam inferiores a uma décima. Este resultado justifica-se com a sua exposição à Nortada, prevacente durante Verão. Por outro lado, as estações de Belém e Parque das Nações revelam as maiores amplitudes de intensidade diurnas, fato que sugere a relevância da existência de brisas de Oceano ou do Tejo (respetivamente) no padrão térmico diurno, nestes locais.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

É no Parque da Nações onde se deteta o estádio de intensidade máxima de ICU mais cedo, a partir 17h, tanto no TTD de Verão como de Inverno, e onde este se prolonga por várias horas. Outra particularidade deste local é ser aquele que apresenta a maior intensidade de ICU no percentil 90 (ICU90p), ou seja, onde se registam os diferenciais mais extremos no período de pico, na ordem dos 5°C.

Não obstante o facto da estação de Restauradores estar posicionada num espaço público particularmente alargado (Praça) face ao seu contexto (Baixa), inclusive na continuidade de um dos arruamentos de maior largura da cidade, e com direção aproximada Noroeste-Sudeste (Avenida da Liberdade), é de salientar que é neste local da rede CEG/IGOT onde se registam as maiores intensidades medianas de ICU: 2,7°C de intensidade máxima horária durante o Verão, e 2,5°C durante o Inverno. Também durante o período estável noturno, apresenta os valores medianos mais elevados 1,5°C e 1,2°C. Adicionalmente, apresenta a particularidade de ter o menor período de arrefecimento diurno durante o Inverno, com a mediana mínima a aproximar-se de zero.

Considerando a distribuição empírica das intensidades da ICU (Figura 6), confirma-se que Restauradores e Parque das Nações são as estações da Rede IGOT onde os picos máximos diários durante o Verão são superiores, quer na mediana (ICU50p), quer os valores do 3º quartil (ICU75p) ou extremos máximos (ICU95p) são superiores. Contudo, o Parque das Nações tem uma amplitude de intensidades muito superior durante o entardecer, e essa aproximação de valores não se mantém durante a noite ou durante o Inverno. Por conseguinte, a estação dos Restauradores é o local onde a ICU se revela mais intensa e de forma mais consistente no tempo.

Tratando-se da estação da Rede CEG/IGOT representativa do centro da cidade, uma área de edificado mais consolidado e compacto, e onde a ICU surge com maior intensidade, importa perceber de que forma a intensidade da ICU mediana se relaciona com a temperatura do ar durante o TTLD de Verão. Na Figura 7 apresentam-se os ciclos diários dos valores medianos da temperatura do ar (T50p) registada no Aeroporto e nos Restauradores, bem como a respetiva diferença (intensidade estimada da ICU). A mesma análise é feita para o percentil 90 da temperatura do ar (T90p), ou seja, durante condições de calor extremo de âmbito regional.

Verão

Inverno

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

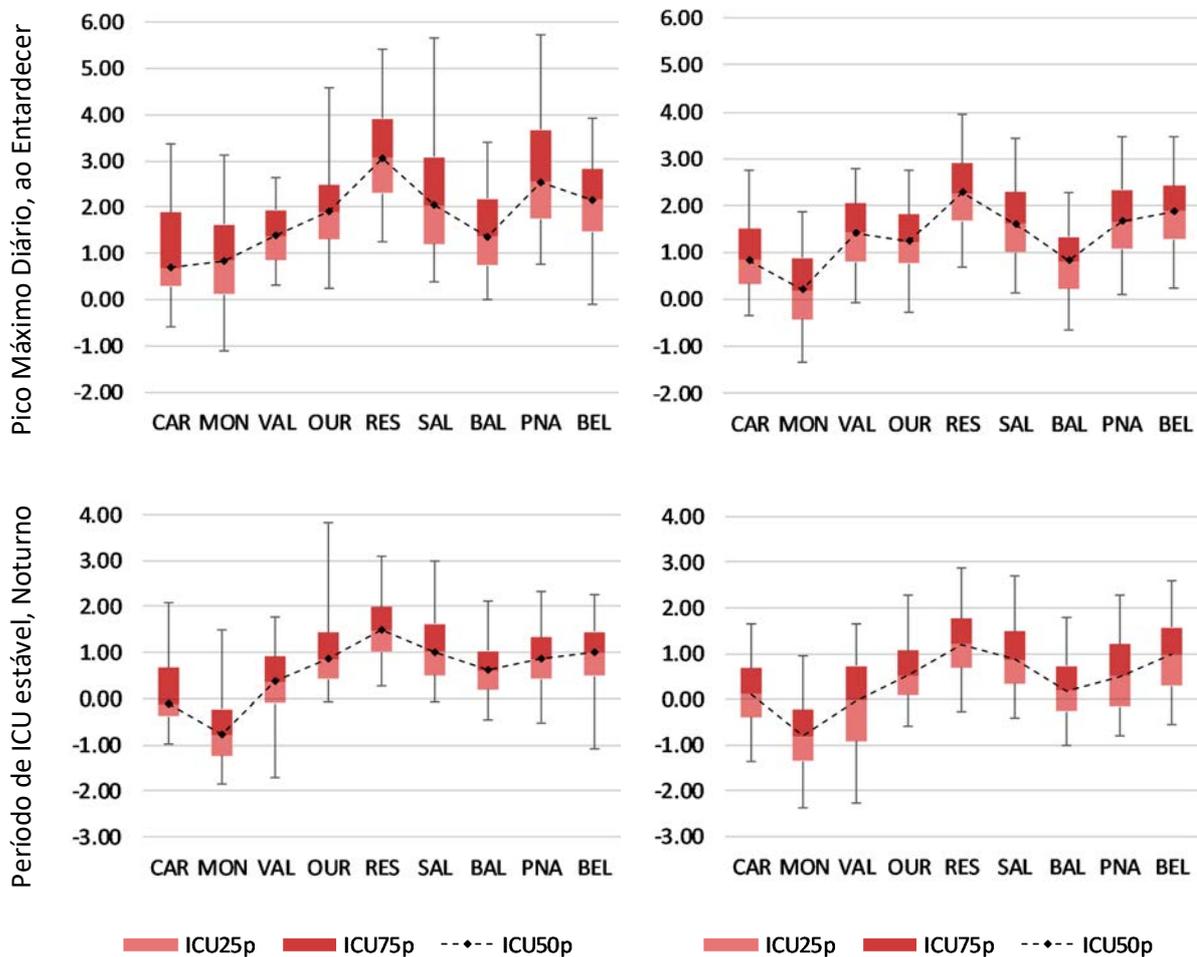


Figura 6 – Diagramas de extremos e quartis da intensidade da ICU nos TTD de Verão (esquerda) e Inverno (direita), nas estações da Rede CEG/IGOT: Carnide (CAR), Monsanto (MON), Vale de Alcântara (VAL), Campo de Ourique (OUR), Restauradores (RES), Saldanha (SAL), Bairro Alto (BAL), Parque das Nações (PNA). Distribuição empírica dos valores extremos (ICU95p e ICU5p) e quartis (ICU25p, ICU50p e ICU75p) da intensidade da ICU nos períodos de valor positivo: em cima, nas 3 horas de valor máximo diário, ao Entardecer (em cima); em baixo, durante o período estável noturno.

Em circunstâncias medianas no TTLD de Verão (Figura 7:a), a intensidade de ICU, com cerca de 3°C ao entardecer, não representa necessariamente uma temperatura extrema nos Restauradores (cerca de 26°C nos Restauradores *versus* 23°C no Aeroporto). Por outro lado, em circunstâncias de calor extremo (Figura 7:b), durante as quais o percentil 90 da temperatura do ar (T90p) no Aeroporto chega a ser superior a 28°C ao entardecer, a intensidade da ICU tende a agravar-se, pelo que a temperatura registada nos Restauradores não só é superior à do Aeroporto, como ultrapassa os 30°C. Este facto sugere que, considerando o TTLD de Verão anteriormente descrito, existe uma relação positiva de crescimento da intensidade máxima horária da ICU com o aumento da temperatura do ar, embora o mesmo não se verifique durante o período estável noturno.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

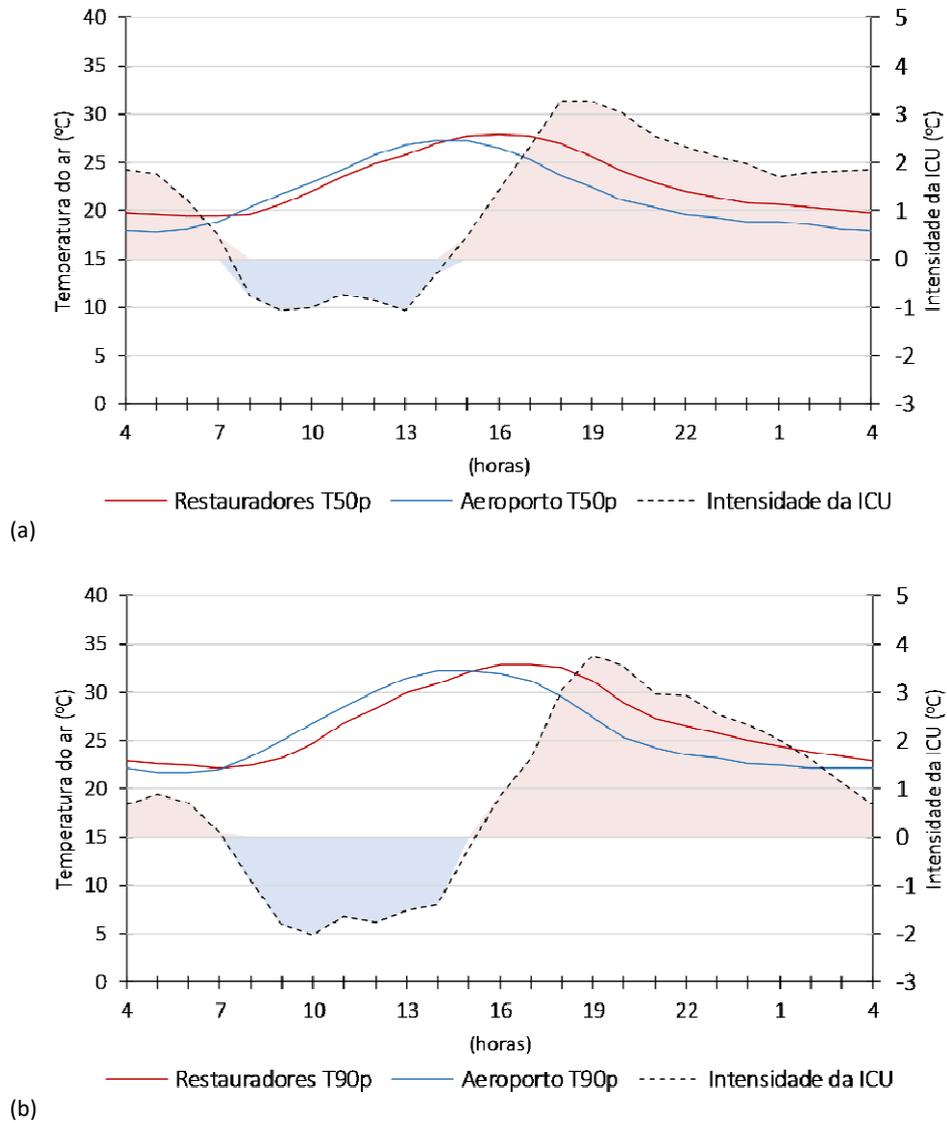


Figura 7 - Ciclo Diário da Temperatura do Ar registada no Aeroporto e nos Restauradores, e intensidade da ICU durante: (a) condições medianas do TTD de Verão (percentis 50 da temperatura do ar, T50p); e (b) condições de calor extremo do TTD de Verão (percentis 90 da temperatura do ar, T90p).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

3.3. INTENSIDADE DA ICU EM DIAS DE CALOR EXTREMO

Considerando a ICU como um fenómeno particularmente prejudicial quando ocorrem situações de calor extremo, e a relação positiva entre intensidade máxima diária da ICU e temperatura do ar, sugerida pelos resultados anteriores, identificaram-se dias representativos de temperaturas anormalmente elevada. Para este efeito, a estação dos Restauradores foi usada como referência, uma vez que representa o ponto de observação onde se registam as maiores intensidades de ICU. Os dias representativos destas condições correspondem àqueles em que se registaram temperaturas horárias iguais ou superiores ao percentil 95 (em pelo menos 50% das horas), durante 3 ou mais dias seguidos.

No período de dados observados e classificados por TTLD (2009-2014) verificam-se apenas 5 eventos que cumprem a estes critérios. Nos Restauradores, estes episódios têm uma duração média de 3 dias, registando-se valores máximos diários que variam entre os 40,8°C (no dia 5 de julho 2010, pelas 16h00) e os 35,4°C (no dia 20 de junho de 2009, pelas 18h00). Por se tratarem de eventos extremos, que apresentam intensidades distintas, optou-se por detalhar aquele durante o qual se registaram as temperaturas mais extremas, no conjunto dos 3 dias. A Figura 8 apresenta, simultaneamente, o ciclo da intensidade da ICU e as temperaturas horárias registadas no Aeroporto e nos Restauradores, entre os dias 4 e 6 de julho de 2010.

Durante este evento verifica-se uma replicação dos estádios detetados anteriormente, ou seja, existe um período de “frescura” diurna nos Restauradores desde o crepúsculo da manhã (amanhecer), seguindo-se período de aquecimento a ritmo acelerado após a altura máxima do sol, e registando-se um pico máximo que coincide o entardecer (exceto no dia 05 de julho de 2010, em que se antecipa) e que se aproxima ou ultrapassa os 4°C. Por conseguinte, essa intensidade máxima é superior em até 1°C à condição mediana do TTLD de Verão, um agravamento bastante significativo quando se registam temperaturas do ar superiores a 35°C no Aeroporto.

Já durante o período estável noturno, a ICU positiva é também observada, contudo a sua intensidade é inferior a 2°C, valor similar à intensidade mediana da ICU no TTLD de Verão. Portanto, a ocorrência de um evento de calor extremo afeta sobretudo a intensidade pico diário; contudo, importa ressaltar que uma intensidade de 1 a 2°C durante a noite, quando se registam temperaturas noturnas de quase 30°C, não deixa de um agravamento considerável para os níveis de conforto térmico e necessidades de arrefecimento.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

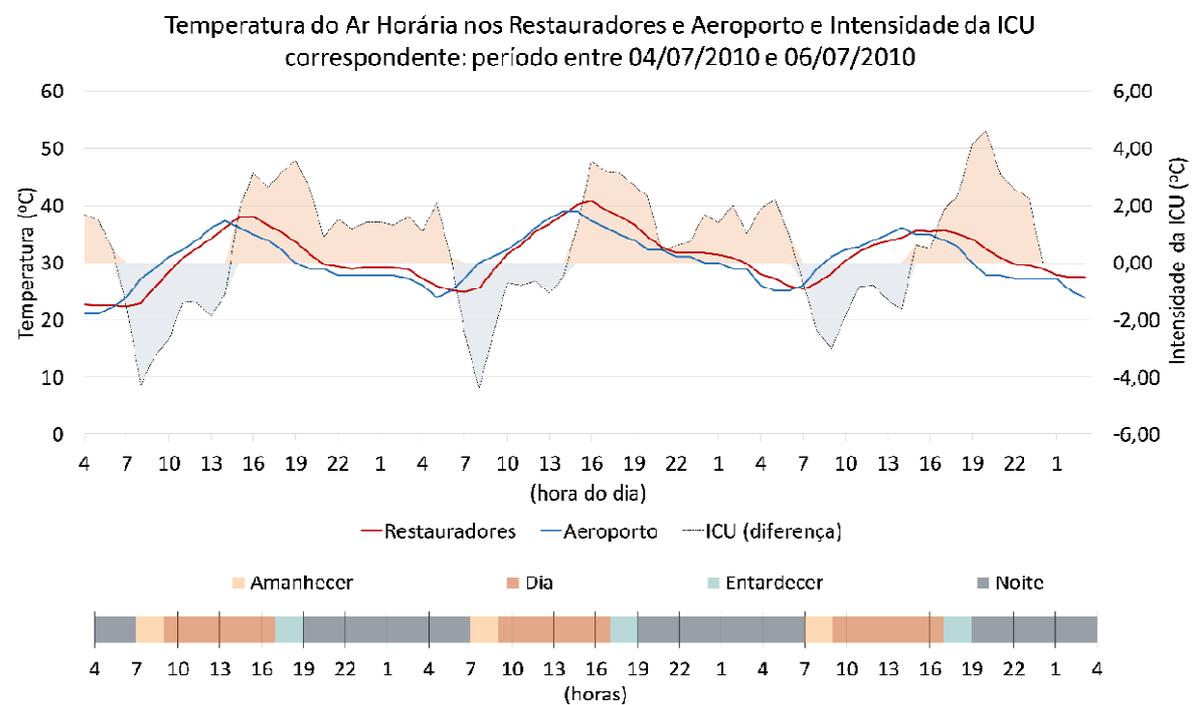


Figura 8 - Ciclo da intensidade da ICU e as temperaturas horárias registadas no Aeroporto e nos Restauradores, entre os dias 4 e 6 de julho de 2010.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

4. PADRÃO ESPACIAL DA ICU TÍPICA DOS TIPOS DE TEMPO DOMINANTES E DIAS DE CALOR EXTREMO

4.1. MODELAÇÃO ESPACIAL: DADOS E METODOLOGIA

Uma das principais condicionantes ao estudo do padrão espacial da ICU em Lisboa é o reduzido número de estações de mesoescala existentes. Desde os primeiros estudos que se têm testado diversos modelos estatísticos (Alcoforado et al., 2006, 2009 e 2014; Lopes et al., 2003 e 2013) de modo espacializá-la com o maior rigor e detalhes possíveis, usando as intensidades de ICU registadas pela Rede CEG/IGOT como variáveis dependentes, e informação relativa à topografia e às características de ocupação e uso do solo como fatores preditivos.

No presente estudo considerou-se esse legado, usando, designadamente, as variáveis preditivas que se revelaram mais significativas anteriormente, agora mapeadas em toda a extensão da cidade, e utilizou-se informação atualizada, nomeadamente, os “Mapas Climáticos Urbanos - geometria e densidade urbana atual”, e os índices associados, produzidos no âmbito deste projeto (Correia, 2019). Estes índices, sejam aqueles que constam da cartografia final, sejam passos intermédios para o seu cálculo, foram também testados no âmbito da presente modelação. Adicionalmente, e com recurso a imagens de satélite de alta resolução (30 a 100metros) multiespectrais e térmicas, produziram-se mapas das componentes do balanço energético e radiativo, bem como índices de vegetação, albedo e temperatura das superfícies - considerando que esta informação é intrínseca ao território ou à geometria urbana, estas variáveis calculadas a partir de observações de deteção remota pretendem refletir características das superfícies que se alteram conforme as condições meteorológicas.

Finalmente, desenvolveu-se o mapeamento detalhado da ICU em ambiente SIG, tirando partido do potencial de modelos geoestatísticos recentes. Nas subsecções seguintes descreve-se: (i) a metodologia para a definição das intensidades da ICU; (ii) as variáveis preditivas que serviram de *input* aos modelos; e (iii) o projeto de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o modelo geoestatístico utilizado.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

4.1.1. Intensidade da ICU: parâmetros

Com o objetivo de identificar os padrões espaciais da ICU característicos dos TTLD identificados, utilizou-se a mediana das anomalias da temperatura durante os dois estádios do ciclo diário em que esta se apresenta como positiva, designadamente, (i) o pico de intensidade da ICU ao entardecer, e (ii) o período estável noturno. No caso do pico de intensidade, considerou-se, em cada estação da Rede CEG/IGOT, a mediana entre as 3 horas de intensidade máxima diária; no caso do período estável noturno, consideraram-se todas as horas do período, ou seja excluindo os crepúsculos da manhã e tarde (amanhecer e entardecer, respetivamente). Por conseguinte, os valores obtidos espelham períodos específicos do perfil das curvas medianas apresentadas na secção anterior (ICU50p, na Figura 5).

No caso concreto da situação de calor extremo, cada evento apresenta intensidades e duração distintas, pelo que é incipiente considerar um cenário típico que estatisticamente represente o seu conjunto. Por outro lado, as projeções para a AML e, sobretudo, para Lisboa, indicam um agravamento dessas situações extremas, quer em frequência, quer em intensidade e duração. Por conseguinte, é conveniente identificar a situação mais extrema, sendo certo que representa o *worst case scenario* da série observada, mas também as circunstâncias extremas que se projetam serem mais recorrentes. Adicionalmente, houve que considerar a disponibilidade de imagens de satélite de cobertura adequada durante os eventos identificados, requisito exigente já que o sensor de melhor resolução espacial, à data o *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) a bordo do satélite Landsat 7, apenas faz a cobertura da região uma vez a cada 16 dias. Aplicados estes critérios, foi identificado o dia 6 de julho de 2010 como representativo, sendo certo que faz parte do evento de temperatura mais elevada. Em coerência com os valores calculados para os TTLD, calculou-se a mediana da intensidade da ICU nas 3 horas de valores máximos ao entardecer, bem como a mediana do período estável noturno desse dia.

Na Tabela 4 apresentam-se os valores de intensidade da ICU em cada ponto da Rede CEG/IGOT, para as estações térmicas extremas e para um evento de onda de calor. No ponto 4.2 do presente relatório apresentam-se os respetivos mapas da ICU, cujo modelo de interpolação a seguir se descreve.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Tabela 4 – Valor da intensidade da ICU, calculada como a mediana da diferença entre cada estação da Rede CEG/IGOT e o Aeroporto por TTLD, ao entardecer (máximo diário) e durante a noite (período estável positivo)

Estação	Intensidade da Ilha de Calor Urbano (°C)					
	TTLD de Verão		TTLD de Inverno		Onda de Calor (06/07/2010)	
	Entardecer	Noite	Entardecer	Noite	Entardecer	Noite
Aeroporto	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹	0,00 ¹
Bairro Alto	1,14	0,71	0,83	0,29	2,18	0,87
Belém	2,30	1,03	1,91	1,11	2,02	0,75
Campo de Ourique	1,96	0,95	1,26	0,48	0,14 ²	0,54 ²
Carnide	0,56	0,20	0,91	0,28	1,17	0,29
Monsanto	0,92	-0,65	0,20	-0,64	1,07	-0,10
Parque das Nações	2,41	0,99	1,64	0,90	2,02	-0,20
Restauradores	3,15	1,68	2,21	1,42	4,15	1,49
Saldanha	2,03	1,20	1,69	0,76	2,28	0,92
V. de Alcântara	1,42	0,50	1,38	0,12	0,41 ²	0,39 ²

¹Estação de Referência para cálculo da ICU

²Dados estimados

4.1.2. Variáveis Explicativas Consideradas

As variáveis explicativas testadas na modelação pretendem caracterizar adequadamente a diversidade geográfica natural e a ocupação do solo: (i) por um lado, foram considerados fatores geográficos como topografia ou a distância ao Tejo; (ii) por outro, utilizaram-se os vários índices de geometria e densidade do tecido urbano construído, calculados no âmbito dos “Mapas Climáticos Urbanos” (Correia, 2019); e por último, (iii) quantificaram-se características sazonais das superfícies, tais como o estado da vegetação ou as componentes do balanço energético e radiativo urbano, obtidas a partir de imagens de satélite de dias representativos das condições medianas identificadas.

No caso das características geográficas do território, os estudos prévios (Alcoforado et al., 2006, 2009, 2013 e 2014; Lopes et al., 2003 e 2013) relevaram a influência da topografia, da distância à margem do Tejo, bem como da longitude (que espelha a distância ao oceano). Neste estudo, utilizou-se o modelo digital de terreno *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 3 (GDEMv3)*, da responsabilidade do *Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI)* do Japão e da *United States National Aeronautics and Space Administration (NASA)* dos Estados Unidos da América; este *dataset* de cobertura internacional apresenta uma resolução espacial horizontal de 30 metros. O cálculo da distância à

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

margem do Tejo e da latitude/longitude teve por base uma grelha de 100 metros, ajustada ao polígono dos limites do concelho, fazendo corresponder a cada célula o valor calculado para o seu centroide.

Para se considerar a influência da morfologia urbana, foi utilizada a cartografia desenvolvida no âmbito dos “Mapas Climáticos Urbanos - Geometria e densidade urbana atual” (Correia, 2019) a qual caracteriza aspetos distintos, mas complementares entre si, designadamente: (i) rugosidade aerodinâmica, a quantificação objetiva do efeito barreira do edificado para a ventilação em meio urbano; (ii) compacidade do edificado, a razão entre a largura dos eixos viários e a altura do edificado limítrofe; (iii) índice volumétrico, a razão entre o volume edificado contido na unidade de análise e o volume máximo da mesma; e (iii) densidade urbana, uma síntese dos parâmetros anteriores que categoriza o espaço urbano em 3 classes de densidade (Alta, Média, Baixa). Complementando estes dados, utilizaram-se ainda os parâmetros morfométricos que corresponderam a passos intermédios para o cálculo dos índices cartografados, cuja metodologia pode ser consultada no relatório que a acompanha (Correia, 2019).

Considerando o caráter estático dos parâmetros anteriores, uma vez que representam condições intrínsecas à cidade que não se alteram sazonalmente, introduziram-se variáveis representativas da modificação do comportamento radiativo das superfícies, face aos *inputs* de radiação solar. Atualmente, e na mesoescala, o método mais usado para o cálculo das componentes do balanço energético e radiativo corresponde ao seu cálculo com recurso a imagens térmicas e multiespectrais adquiridas remotamente através de sensores instalados em satélites. Uma das dificuldades, particularmente no uso de imagens térmicas das temperaturas das superfícies, reside no facto das imagens obtidas com maior resolução horizontal (neste estudo, sensor ETM+ a bordo do Landsat7) não apresentarem uma resolução temporal adequada: não só existe um intervalo de tempo alargado entre revisitas (16 dias no caso do Landsat7), como a hora em que a aquisição da imagem ocorre na área de Lisboa (cerca das 11h00 no Tempo Universal Coordenado, UTC) é desfavorável ao estudo, já que as superfícies ainda não se encontram notoriamente aquecidas. O contrário é também verdade, ou seja, satélites que disponibilizam 2 ou mais imagens diárias da região, apresentam resoluções espaciais demasiado grosseiras (1km, ou mais).

Em todo o caso, atualmente são vários os métodos que, usando imagens de satélite diurnas de maior resolução espacial, calculam o volume de radiação acumulada durante o dia no tecido

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

urbano como indicador do calor sensível libertado no final do dia e durante a noite. Este ritmo diário de acumulação e libertação de calor, que reporta não só àquele proveniente da radiação solar, mas também ao que é produzido pelas atividades antrópicas em meio urbano, é a condição que explica o desfasamento temporal entre o pico de radiação solar recebida e o pico máximo de temperatura do ar registada. De forma sintética, o estudo do balanço energético e radiativo urbano considera grandezas físicas que representam simplificações dos fluxos verticais, e é descrito conforme Equação 3:

$$Q_{net} = Q_H + Q_E + Q_G \quad \text{Equação 3}$$

onde Q_{net} é o balanço radiativo, Q_H e Q_E são os fluxos turbulentos de calor sensível e latente, e Q_G é o fluxo de calor armazenado. Durante o dia, esse balanço de radiação pode também ser calculado pelo somatório das componentes de grande e pequeno comprimento de onda, conforme a Equação 4:

$$Q_{net} = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad \text{Equação 4}$$

, onde K_{\downarrow} corresponde à radiação solar global incidente, K_{\uparrow} , a radiação incidente que é refletida pelas superfícies (em função do seu albedo), L_{\downarrow} , a radiação de grande comprimento de onda emitida pela atmosfera (depende da temperatura e da emissividade atmosféricas), e L_{\uparrow} a radiação emitida pelas superfícies em grande comprimento de onda (depende da temperatura e emissividade das superfícies).

Muito embora o balanço energético seja a energia disponível num sistema, num determinado momento ou período, considerando o momento do registo das imagens ETRS+/Landsat7 disponíveis, são as componentes Q_H , Q_E e Q_G que nos informam sobre o padrão espacial do desempenho térmico das superfícies. A componente Q_G é o principal objeto de interesse (bem como a razão entre Q_G e Q_{net}) para se prever a ICU atmosférica noturna, e são vários os métodos disponíveis para a calcular. Considerando a informação disponível, optou-se pelo método de cálculo baseado no Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (Lopes, 2003; Rigo et al., 2006; Rigo & Parlow, 2007; Wicki et al., 2018; Wicki & Parlow, 2017), um rácio entre a diferença e a soma das bandas vermelha e infravermelho próximo, que mede a intensidade da atividade clorofilina da vegetação e que apresenta uma relação inversa com a densidade de fluxo de calor armazenado nas superfícies. A formulação do cálculo do Q_G

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

depende do tipo de superfície, o que exige uma classificação prévia das características de ocupação do solo. Para este estudo, usou-se a Cartografia biodiversidade, v. 4. – CM Lisboa (2019) para a classificação do solo como ocupação florestal (manchas arbóreas densas), espaços de vegetação rasteira ou esparsa (não impermeabilizados) ou urbana (espaços impermeabilizados). Para cada uma destas classes usou-se, respetivamente, as seguintes formulas de calculo (Equações 5, 6 e 7) (Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007):

$$QGr = (0,3673 - 0,3914 \cdot NDVI) \cdot K^* \cdot (-0,8826 \cdot \ln(K^*) + 5,0967) \quad \text{Equação 5}$$

$$QGu = -(0,3673 - 0,3914 - NDVI) \cdot Qnet \quad \text{Equação 6}$$

$$QGf = -0,5 \cdot (0,3673 - 0,3914 - NDVI) \cdot Qnet \quad \text{Equação 7}$$

Atendendo a que as imagens de satélite disponíveis representam condições específicas do momento em que são registadas, para os TTLD foram selecionadas as imagens de dias cujo ritmo diário de intensidade da ICU é o mais aproximado das condições medianas previamente calculadas e, desprovidas de cobertura nebulosa. As três imagens selecionadas encontram-se listadas na Tabela 6. Detalhes pormenorizados da metodologia aplicada relativa à correção atmosférica, cálculo do NDVI, da temperatura e do albedo das superfícies, bem como das componentes do balanço radiativo e energético podem ser consultados em Lopes (2003) e Rigo & Parlow (2007).

Tabela 5 – Listagem de Imagens ETRS+/Landsat 7 utilizadas no presente estudo

Tipo de Tempo	Referência (Landsat_Scene_ID)	Órbita/Ponto (Path/Row)	Data de Aquisição	Sensor	Satélite
TTLD Inverno	LE72040332014342ASN00	204/033	08/12/2014	ETRS+	Landsat 7
TTLD Verão	LE72040332012257ASN00	204/033	13/09/2012	ETRS+	Landsat 7
Onda de Calor	LE72040332010187EDC03	204/033	06/07/2010	ETRS+	Landsat 7

Foram ainda consideradas as *layers* de alta resolução disponibilizadas pelo *Copernicus Land Monitoring Service* que representam as percentagens de impermeabilização e de coberto arbóreo (EEA 2018a e b). A listagem e descrição sintética de todos os parâmetros considerados na modelação pode ser consultada na Tabela 6. As variáveis explicativas consideradas foram todas reamostradas para uma resolução em grelha de 100x100m, concordante com os “Mapas Climáticos Urbanos - Geometria e densidade urbana atual” (Correia, 2019), e convertidas em formato de

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

matriz digital (*geotiff*), de forma a uniformizar os inputs do modelo geoestatístico, e a respeitar os requisitos de introdução de variáveis.

Tabela 6 –Variáveis Explicativas testadas na modelação

Tipo	Variável Explicativa	Fontes de Dados:
Fatores Geográficos de Mesoescala	Latitude	Cálculo da posição vertical do centroide de cada célula da grelha de 100x100m, sistema de referência ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763), ArcGIS Pro versão 2.4.0
	Longitude	Cálculo da posição horizontal do centroide de cada célula da grelha de 100x100m, sistema de referência ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763), ArcGIS Pro versão 2.4.0
	Altitude	Modelo Digital de Terreno ASTER GDEMv3 (Team, 2009)
	Orientação da encosta	Cálculo da orientação através da ferramenta Aspect disponível no módulo 3D Analyst Tools do software ArcGIS Pro versão 2.4.0
	Distância à Margem	Cálculo da orientação através da ferramenta Euclidean Distance disponível no módulo Spatial Analyst do software ArcGIS Pro versão 2.4.0
Áreas Verdes e Permeabilidade	NDVI	Imagens ETRS+/Landsat7 ² , formulação conforme (António Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007)
	Imperviousness Degree	(European Environment Agency (EEA), 2018a)
	Tree Cover Density	(European Environment Agency (EEA), 2018b)
Geometria e Densidade Urbanas	Altura do Edificado	Edificado (planimetria e altimetria) – CM Lisboa (2019)
	Índice de Compacidade (HW)	(Correia, 2019)
	Comprimento da Rugosidade Aerodinâmica (Z0)	(Correia, 2019)
	Altura do Plano de Deslocamento (Zd)	(Correia, 2019)
	Índice Volumétrico (IV)	(Correia, 2019)
	Densidade de Edificado (λ_p)	(Correia, 2019)
	Densidade de Área Frontal (λ_f)	(Correia, 2019)
	Densidade Urbana (DU)	(Correia, 2019)
Balanço Energético e Radiativo das Superfícies ¹	Fluxo de Calor Latente QE	Imagens ETRS+/Landsat7 ² , formulação conforme (António Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007)
	Fluxo de Calor Sensível QH	Imagens ETRS+/Landsat7 ² , formulação conforme (António Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007)
	Fluxo de Calor Armazenado QG	Imagens ETRS+/Landsat7 ² , formulação conforme (António Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007)
	Rácio QG/Qnet	Imagens ETRS+/Landsat7 ² , formulação conforme (António Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007)
	Albedo das Superfícies	Imagens ETRS+/Landsat7 ² , formulação conforme (António Lopes, 2003; Rigo & Parlow, 2007)

¹ e variáveis intermédias ao seu cálculo

² as imagens usadas na modelação de cada TTLD constam da Tabela 5

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

4.1.3. Modelo Geoestatístico

Para a interpolação espacial dos resultados, foi utilizado o método *Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction* (EBKRP), implementado no módulo *Geo statistical Analyst Tools* do software ArcGIS Pro, versão 2.4.0 (Krivoruchko, 2012; Krivoruchko & Gribov, 2019). Trata-se de um modelo híbrido entre uma regressão linear e uma interpolação bayesiana que, por um lado, prevê os valores médios como soma ponderada das variáveis explicativas, e por outro, modela os erros em função de um variograma/semivariograma. A vantagem deste tipo de modelação em relação ao método de regressão linear múltipla utilizado nos estudos anteriores consiste na sua robustez para inferir padrões espaciais em contextos de reduzida densidade de pontos de observação da variável a explicar (dependente), pela utilização do fator proximidade na previsão dos desvios dos erros. Por outro lado, retém o proveito de se testarem as variáveis explicativas ao aferir a relevância para os resultados da modelação. Este método reduz as variáveis introduzidas através de uma Análise de Componentes Principais produzindo, internamente, combinações lineares das matrizes introduzidas como variáveis explicativas. Cada componente resultante é uma matriz que captura uma parte da variabilidade dos dados, resolvendo o problema da colinearidade entre variáveis. Por outro lado, sendo essas variáveis preditivas, abrangentes de toda a área de estudo, permitem assim interpolar/prever os valores de interesse em locais onde os mesmos não foram medidos, com base numa relação previamente aferida com as componentes principais detetadas.

No presente estudo, testaram-se múltiplas combinações das variáveis anteriormente listadas (Tabela 6), considerando o contributo dos estudos anteriores e avaliando iterativamente o desempenho de cada resultado. Considerando os valores típicos de intensidade de ICU calculados, bem como a variabilidade de intensidades demonstrada em cada local, procurou-se que os erros máximos absolutos não ultrapassassem os 0,50°C. Selecionaram-se os modelos com os menores valores de erro, considerando-se: o erro médio absoluto (EMA), a raiz do erro médio quadrático (REMQ) e o *continuous ranked probability score* (CRPS) médio (desvio entre a integral dos quadrados das diferenças entre as funções de probabilidades acumuladas empíricas das previsões e observações). De um modo geral, a modelação do período de pico de intensidade da ICU ao entardecer revelou-se mais desafiante, exigindo a introdução de um maior número de variáveis explicativas para se reproduzir a maior amplitude de valores que caracterizam este período.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Tabela 7 – Erros dos Modelos de Interpolação EBKRP selecionados

Modelo	EMA (°C)	REMQ	CRPS
Inverno Entardecer	0,01	0,28	0,19
Inverno Noite	-0,01	0,23	0,13
Verão Entardecer	-0,03	0,27	0,16
Verão Noite	0,01	0,20	0,12
Onda de Calor Entardecer	0,07	0,48	0,33
Onda de Calor Noite	0,04	0,11	0,05

4.2. MAPAS DA ILHA DE CALOR URBANO TÍPICA

Os estudos anteriores inferiram de forma simplificada o padrão espacial da ICU durante condições de vento de Norte, direção identificada como a mais frequente, e que foi considerada como requisito para a classificação dos TTLD de Verão e Inverno utilizados neste estudo. Esses estudos assinalavam já a existência da ICU de maior intensidade na zona da Baixa (valor máximo de 2,5°), existindo um padrão tentacular com intensidade inferior (de 1,0°C a 1,5°C) que se desenvolve quer ao longo de toda faixa ribeirinha, desde Belém até ao Parque das Nações, quer ao longo dos principais eixos de desenvolvimento da cidade, designadamente da Avenida da Liberdade ao Campo Grande, da Avenida Almirante Reis ao Areeiro, e na zona de Sul, na Avenida de Ceuta. De acordo com esses mesmos estudos, Monsanto apresenta-se como uma Ilha de Frescura, com valores até 1,5°C inferiores aos do Aeroporto, e a área setentrional da cidade (de Carnide à Alta de Lisboa) não apresenta diferenças significativas.

Os modelos agora produzidos confirmam este padrão geral, mas acrescentam detalhe nas áreas de maior intensidade e identificam novos núcleos, confirmando a existência de um mosaico ou “arquipélago” de “ilhas”, ainda que de dimensões e/ou intensidades distintas. Nas figuras 8 a 13 apresentam-se os mapas de intensidade da ICU para os tipos de tempo identificados no Capítulo 2, e para os períodos de ICU positiva descritos no Capítulo 3 e calculados na secção 4.1.1.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

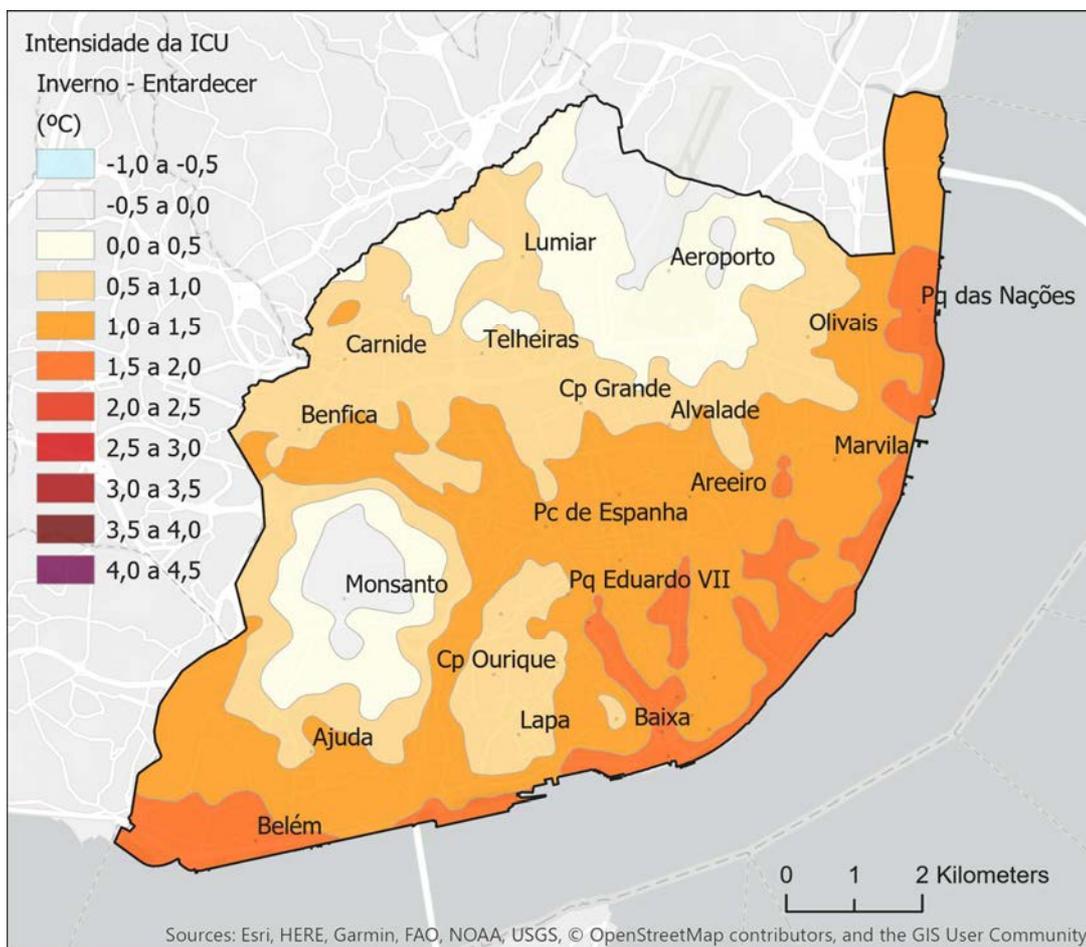


Figura 9 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Inverno - Entardecer.

No Inverno - Entardecer (Figura 9), a intensidade máxima da ICU atinge valores entre 1,5°C e 2,0°C. O padrão espacial da classe de intensidade mais elevada desenvolve-se, por um lado, numa faixa estreita ao longo da frente ribeirinha, desde Santos até ao Parque das Nações; por outro, estende-se de forma tentacular para o interior da cidade, designadamente: (i) a partir da Baixa, ao longo da Avenida da Liberdade até Picoas, e ao longo da Avenida Almirante Reis até à Alameda; e (ii) a partir de Xabregas ao longo da Avenida Mouzinho de Albuquerque e da Estrada de Chelas. Na continuidade deste último eixo, surge ainda no Bairro do Armador um núcleo com intensidades de ICU da mesma grandeza. Verificam-se, ainda, dois núcleos mais alargados do que os anteriores junto à margem do Tejo: no Parque das Nações, que se estende para o interior até ao eixo ferroviário; e na área de Belém, que se estende desde a frente ribeirinha até ao Restelo.

A restante área urbana apresenta uma mancha mais homogénea, com intensidade inferior a 1,5°C, em que a intensidade da ICU diminui progressivamente para o norte da cidade, interrompida pelo

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Parque Florestal de Monsanto, onde se verifica uma “ilha de frescura” (ICU de intensidade negativa), e pela área mais elevada que se desenvolve da Madragoa-Estrela até Campo de Ourique e Alto de Campolide. Este nível de intensidade mais moderada prolonga-se para Sete Rios-Laranjeiras, e ao longo da Estrada de Benfica.

Durante o Inverno - Noite (Figura 10), a intensidade da ICU diminui, quer em magnitude, quer na sua extensão, recuando no sentido da frente ribeirinha. Os principais eixos que se prolongavam para o interior da cidade ao Entardecer (Figura 9) contraem-se, persistindo apenas núcleos isolados de intensidade de ICU máxima na Baixa, Alcântara, Belém, na frente ribeirinha em Marvila e no Parque das Nações. No interior da cidade mantém-se uma área de ICU positiva, mas com intensidade inferior a 1°C, até à Avenida Estados Unidos da América, bem como alguns pequenos núcleos remanescentes dos eixos da zona Norte de Lisboa anteriormente identificados.

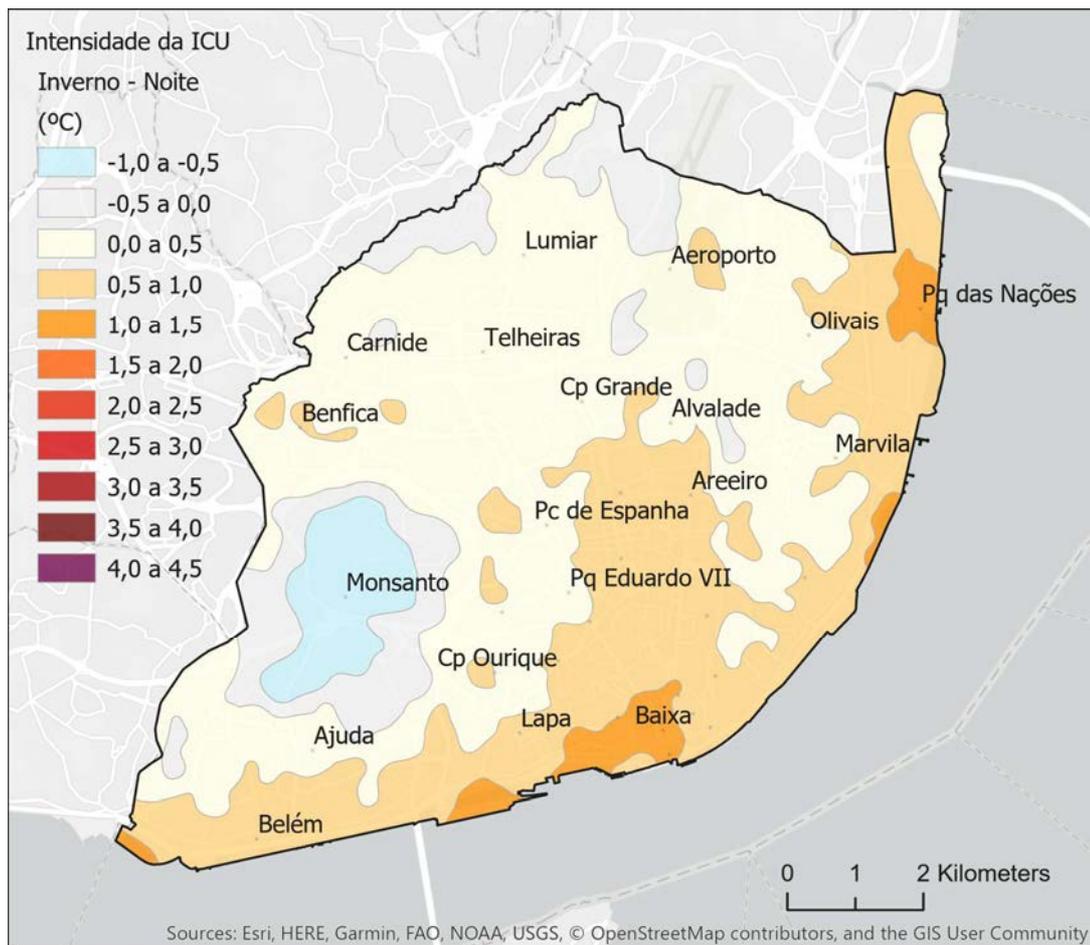


Figura 10 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Inverno - Noite.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Durante o Entardecer de Verão (Figura 11), a ICU apresenta um padrão mais heterogéneo e com um maior gradiente de intensidade. A intensidade máxima da ICU é superior à de Inverno, e o contorno tentacular da classe de intensidade superior a 1,5°C transforma-se numa mancha contínua, interrompida apenas por alguns núcleos de menor intensidade que coincidem com parques urbanos de maior dimensão, tais como o Parque da Belavista, a Mata de Alvalade, ou o Corredor Verde de Monsanto. Existe também um aumento da intensidade em toda a frente ribeirinha, que chega a ser superior a 3°C em alguns núcleos, nomeadamente em Belém/Algés, de Alcântara/Santos ao Cais do Sodré, na Baixa e, com maior dimensão, na área mais densa do Parque das Nações.

Destaca-se ainda a existência de diversos núcleos interiores com intensidades até 2,5°C, coincidentes com edificado de altura e volumetria mais elevadas, sobretudo no limite norte do Bairro da Encarnação, Chelas, Avenida José Malhoa e Laranjeiras, e Telheiras/Lumiar.

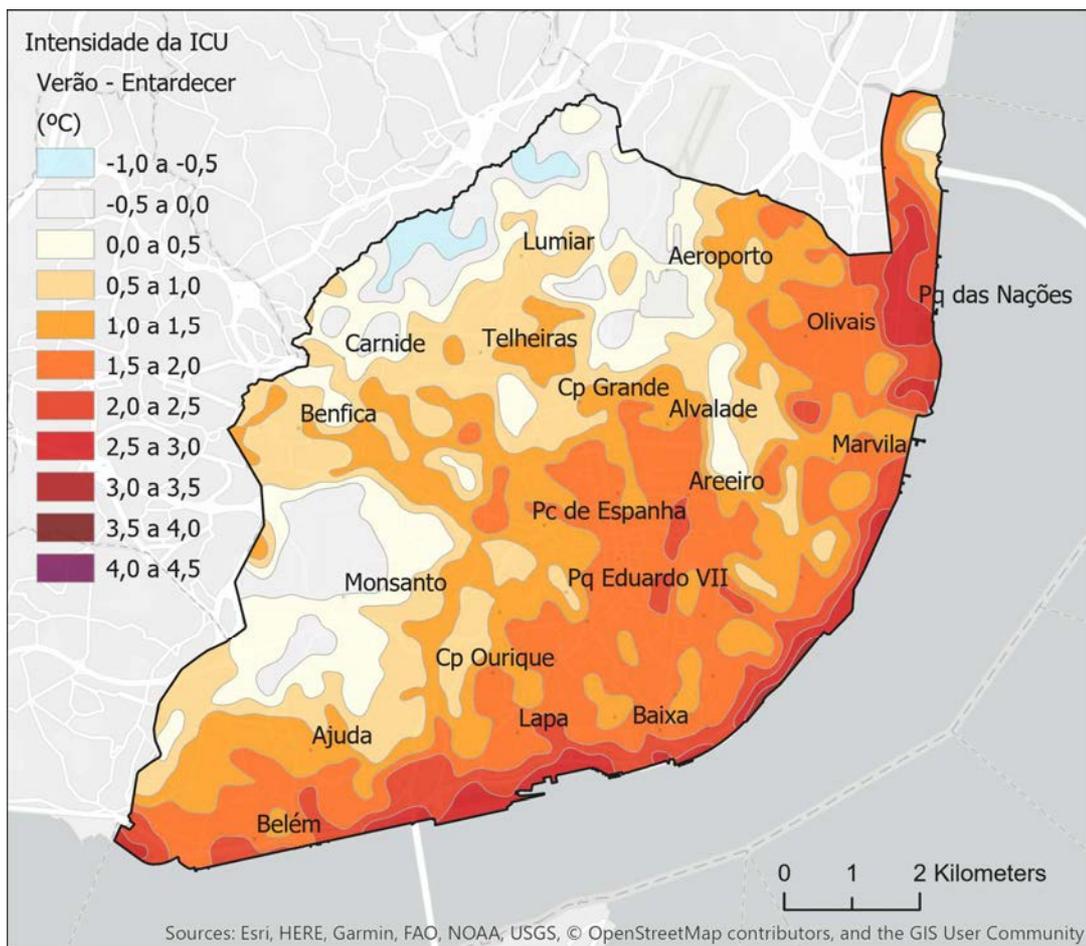


Figura 11 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Verão - Entardecer.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Já durante o período noturno (Figura 9), a maior intensidade da ICU deixa de ocorrer junto à margem do Tejo, isolando-se dois núcleos, um na Baixa, e outro no Parque das Nações. Contudo, o padrão tentacular mantém-se, prolongando-se pela Avenida Almirante Reis até ao Areeiro, e da Avenida da Liberdade/Avenida Fontes Pereira de Melo até Entrecampos. O núcleo na Avenida José Malhoa mantém-se.

Destaca-se ainda a persistência de uma mancha de intensidade entre 0,5°C e 1°C que abrange de forma uniforme quase toda a cidade até à 2ª Circular, e que se prolonga por dois eixos até aos limites da cidade: um ao longo do eixo Campo Grande – Lumiar, e outro ao longo da Estrada de Benfica.

Quanto aos padrões espaciais durante a Onda de Calor registada no dia 06/07/2010, é necessário considerar que estes representam condições específicas durante este evento. Acresce referir que o dia escolhido resultou das restrições mencionadas anteriormente, sendo este o último dia da Onda de Calor, e durante o qual ocorreu um significativo arrefecimento noturno (ver Figura 8).

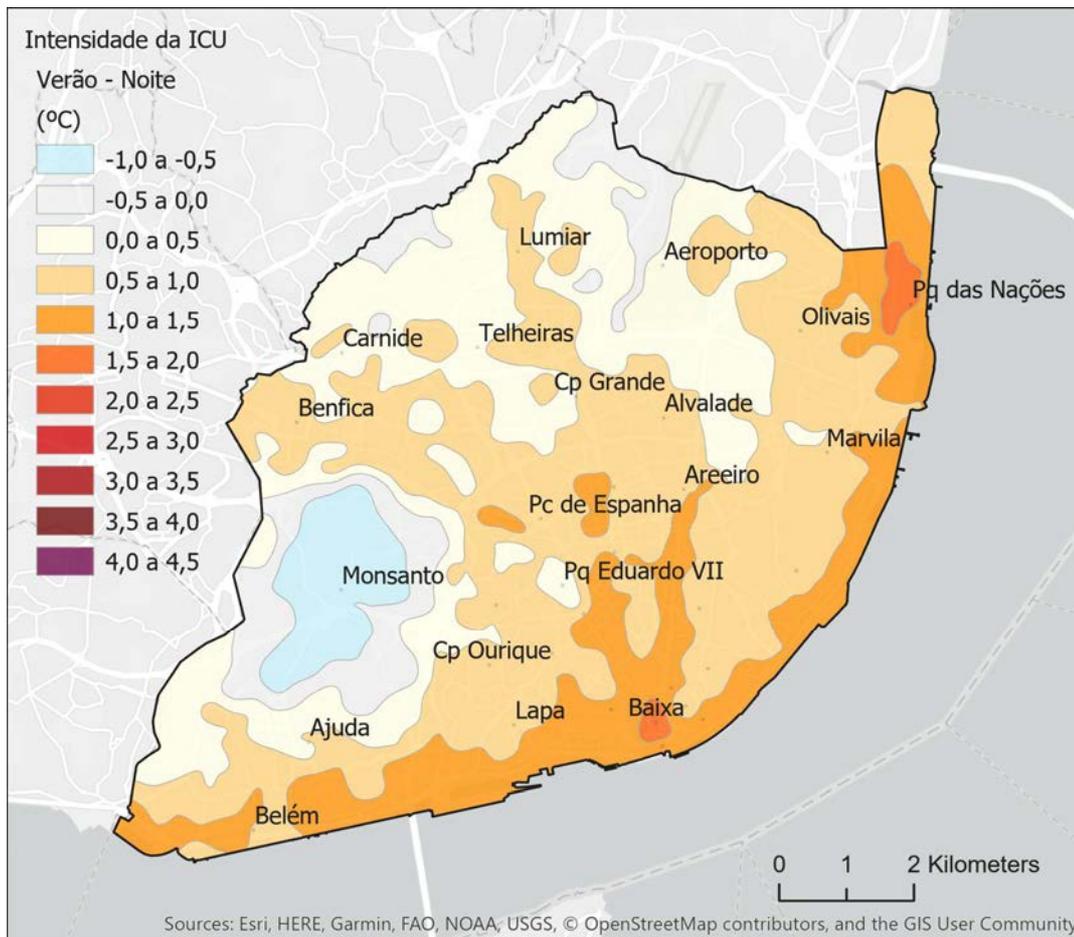


Figura 12 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Verão - Noite.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Não obstante, os resultados são coerentes com os padrões anteriores, nomeadamente o agravamento da intensidade da ICU ao entardecer, quando ocorrem temperaturas do ar mais elevadas. De resto, o padrão espacial da ICU ao Entardecer (Figura 9), revela um exacerbar das intensidades máximas, do gradiente de temperaturas entre “ilhas de frescura” e núcleos mais aquecidos e, conseqüentemente, uma heterogeneidade espacial ainda maior. Este facto torna mais evidente a presença e impacto das principais estruturas verdes urbanas, que permanecem como “ilhas de frescura” isoladas. Destas estruturas, destacam-se parques e grandes jardins tais como o da Gulbenkian, o Jardim Tropical, o Parque Eduardo XVII e o Corredor Verde de Monsanto, a Mata de Alvalade ou o Parque da Belavista. Chama-se ainda a atenção para o efeito de atenuação da intensidade da ICU ao longo do Vale de Chelas

Simultaneamente, as áreas de intensidade superior a 1,5°C surgem com uma incidência espacial semelhante àquela que ocorre no Verão – Entardecer (Figura 13); contudo, surge desse padrão subliminar um rendilhado heterogéneo de núcleos sobreaquecidos no interior da cidade, designadamente na Avenida José Malhoa, Laranjeiras, Telheiras e Alta de Lisboa.

Os núcleos da Baixa e do Parque das Nações são novamente os mais aquecidos, com intensidades de ICU superiores a 4°C. Existe ainda uma faixa contínua de intensidade bastante elevada que se estende ao longo da frente ribeirinha entre Alcântara e o Parque das Nações.

Por contraste, a ICU da Onda de Calor – Noite (Figura 9) atenua-se para valores máximos idênticos aos do Verão – Noite (Figura 14), dissipando-se a ICU nos extremos oriental e ocidental da frente ribeirinha. Permanece sobreaquecida a parte central da cidade, com uma intensidade de 1,5°C, quer ao longo da faixa ribeirinha adjacente, quer estendendo-se desde a Baixa até à Avenida Almirante Reis. Persistem também alguns núcleos isolados, designadamente na Avenida José Malhoa, e na Avenida Fontes Pereira de Melo / Saldanha.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

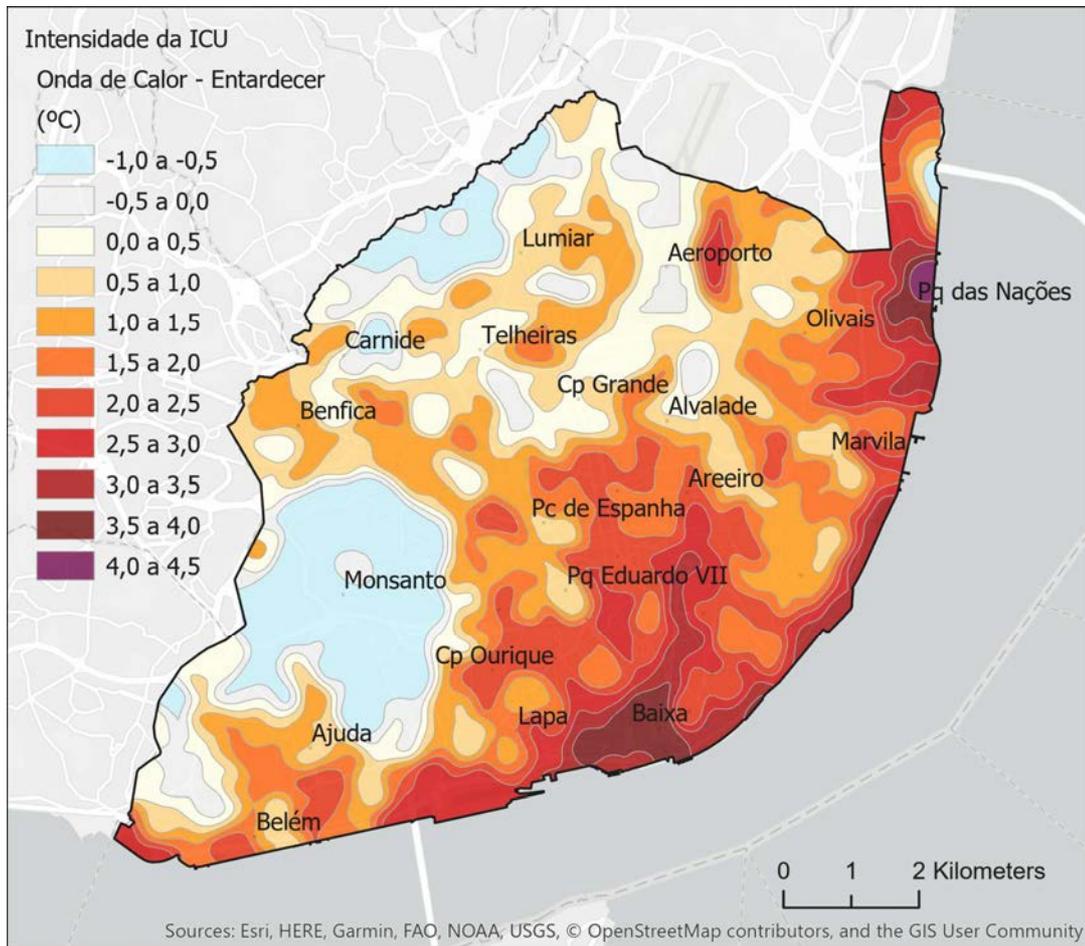


Figura 13 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Onda de Calor - Entardecer.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

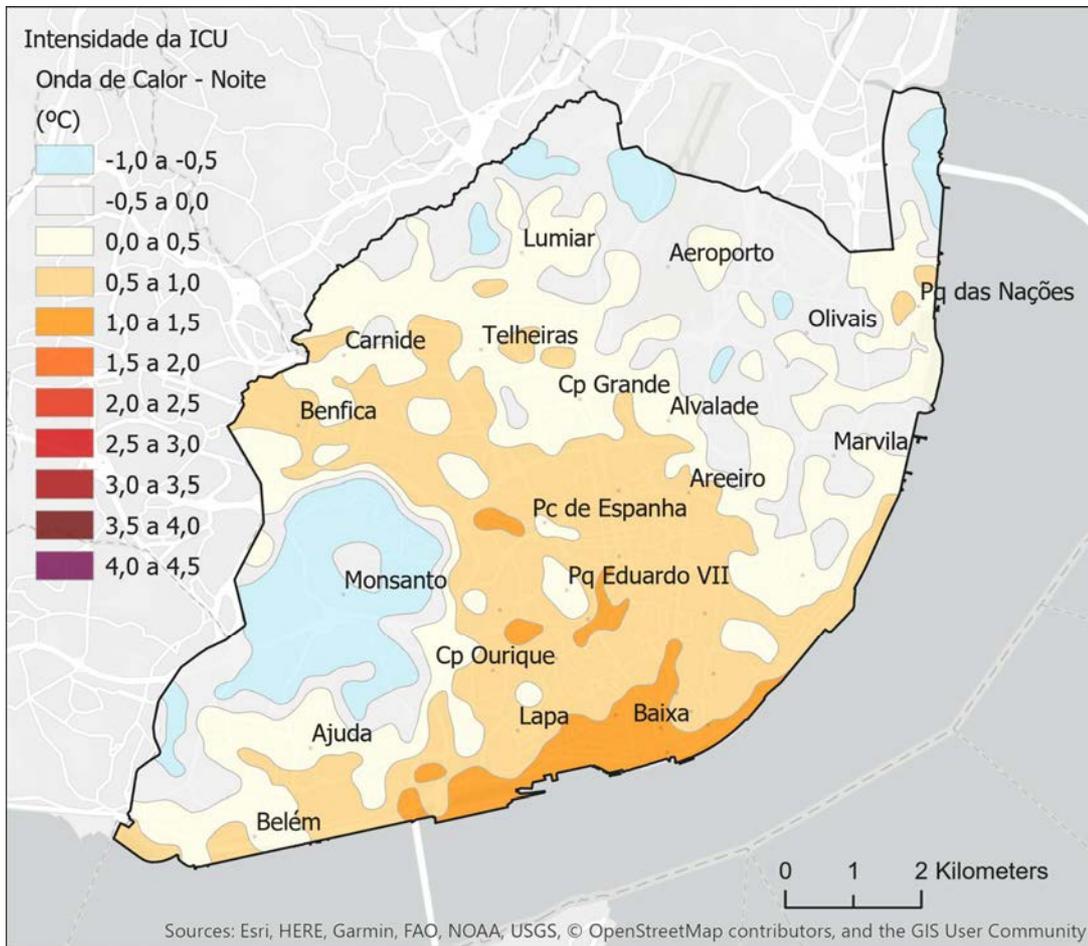


Figura 14 – Mapa da intensidade da ICU de Lisboa: Onda de Calor – Noite.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

5. CONCLUSÕES

Como outros aglomerados urbanos de média e grande dimensão, em Lisboa verifica-se a ocorrência do efeito de Ilha de Calor Urbano durante todo o ano, particularmente intensa durante o período mais quente. Com uma intensidade mediana que frequentemente se situa entre os 2^oC e os 3^oC, chega a ultrapassar os 4^oC.

O ritmo diário revela que, em algumas zonas da cidade de Lisboa, a ICU é uma ocorrência permanente designadamente na Baixa, no Saldanha, em Campo de Ourique e no Parque das Nações ou em Belém. É precisamente na Baixa, no Saldanha e no Parque das Nações que se registam os ciclos diários com resultados mais evidentes: todas as curvas horárias da intensidade da ICU, do percentil 10 ao 90, têm valores positivos desde a tarde até ao amanhecer, seja no Verão ou Inverno. E se, por um lado, é no período do crepúsculo da tarde que se registam os picos diários, é durante a noite que este efeito se revela mais consistente, com amplitudes de variação da intensidade da ICU iguais ou inferiores 2^oC, e diferenças entre o perfil de Verão e o de Inverno inferiores a 0,2^oC.

Ainda que a rede de mesoescala do CEG/IGOT seja constituída por um reduzido número de estações, é possível captar esses ritmos diários com bastante clareza. Destaca-se a consistência do perfil de intensidades dos ciclos diários nas estações situadas no centro de Lisboa e zonas ribeirinhas oriental e ocidental, que revela sucessivos estádios: (i) um período diurno, após o amanhecer, de ICU negativa; (ii) um período diurno de aquecimento rápido, passando a existir anomalias positivas após o momento de maior altura do sol; (iii) um momento de pico de intensidade, ao entardecer, mais intenso no Verão; (iv) um período estável de ICU positiva noturna, de intensidade menor do que ao entardecer, com variações estacionais mínimas.

Comparando a intensidade ICU típica (percentil 50) com a que se regista durante eventos de calor extremo, verifica-se que existe um marcado aumento da intensidade durante o pico máximo ao entardecer, ainda que a intensidade noturna se seja idêntica.

Apesar das limitações decorrentes de uma rede de mesoescala com um número de sensores insuficiente para traduzir toda a diversidade de contextos que se verifica em Lisboa, os dados permitem inferir alguns padrões espaciais deste ciclo diário da ICU. Observando-se os vários mapas, tornam-se evidente algumas particularidades:

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

1. existe um aumento da intensidade e incidência espacial da ICU com o aumento da temperatura, notório entre os padrões de Verão e Inverno, e ainda na Onda de Calor entardecer
2. a ICU noturna, durante todos os TTLD de vento Norte, não diminui apenas de intensidade máxima face às horas do crepúsculo da tarde que a antecede; em todos os casos, a sua extensão espacial contrai-se em direção à margem do Tejo, persistindo núcleos sobreaquecidos na Baixa (todos os casos), Belém e Parque das Nações (Verão e Inverno), e ainda em alguns núcleos interiores de edificado mais denso e/ou compacto (Verão e Onda de Calor);
3. o impacto dos espaços verdes, como “ilhas de frescura”, torna-se mais relevante em situação de temperatura mais elevada, quando o gradiente da intensidade da ICU é maior, em relação à sua envolvente;
4. inversamente, alguns núcleos interiores da cidade também se agravam com o aumento da temperatura do ar, tornando-se o padrão de ICU geral da cidade mais heterogéneo e pontuado por esta constelação de “ilhas” que coincidem com edificado de maior altura, compacidade e/ou densidade.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Tabela 8 – Valores Médios da Intensidade da ICU, por Freguesias¹

Freguesia	Inverno		Verão		Onda de Calor (06/07/2010)	
	Entardecer	Noite	Entardecer	Noite	Entardecer	Noite
Ajuda	1.0	0.3	1.3	0.5	1.2	0.3
Ajuda (Monsanto)	0.3	-0.6	0.1	-0.6	-0.3	-0.7
Alcântara	1.1	0.5	1.5	0.8	0.9	0.4
Alcântara (Monsanto)	0.3	-0.4	0.5	-0.3	-0.9	-0.6
Alvalade	0.8	0.3	1.1	0.6	0.7	0.2
Areeiro	1.3	0.5	1.6	0.8	1.8	0.5
Arroios	1.5	0.7	1.8	1.0	2.6	0.8
Avenidas Novas	1.2	0.5	1.5	0.8	1.7	0.7
Beato	1.5	0.6	1.7	0.9	1.9	0.3
Belém	1.5	0.6	1.6	0.8	1.1	0.3
Belém (Monsanto)	1.2	0.0	0.7	0.2	-0.2	-0.5
Benfica	0.8	0.2	0.6	0.3	0.6	0.3
Benfica (Monsanto)	0.3	-0.5	0.1	-0.5	-0.9	-0.8
Campo de Ourique	0.8	0.4	1.3	0.7	1.8	0.7
Campolide	1.1	0.4	1.1	0.6	1.4	0.7
Campolide (Monsanto)	0.5	-0.2	0.7	-0.1	-0.5	-0.3
Carnide	0.7	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2
Estrela	1.1	0.7	2.0	1.0	2.0	0.8
Lumiar	0.5	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
Marvila	1.2	0.4	1.3	0.7	1.6	0.0
Misericórdia	1.3	1.0	1.9	1.2	3.3	1.1
Olivais	0.5	0.4	1.3	0.6	1.3	-0.1
Parque das Nações	1.4	0.8	1.9	1.1	2.6	0.0
Penha de França	1.5	0.5	1.7	0.8	2.2	0.5
Santa Clara	0.1	0.0	-0.1	0.1	0.2	-0.3
Santa Maria Maior	1.6	1.0	2.0	1.3	3.4	1.1
Santo António	1.3	0.7	1.7	1.0	2.3	0.9
S. Domingos de Benfica	1.1	0.4	1.1	0.7	1.0	0.6
S. Domingos de Benfica (Monsanto)	0.5	-0.3	0.3	-0.2	-0.8	-0.6
São Vicente	1.4	0.6	1.9	1.0	2.5	0.7

¹ no caso das freguesias que abrangem o Parque Florestal de Monsanto, a intensidade média da ICU encontra-se descrita separadamente para as áreas que nele se incluem

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

BIBLIOGRAFIA

- Alcoforado, M.J. (1986). Contribution to the Study of Lisbon's Urban Heat Island: Analysis from an Infra-Red Image. International Symposium of Urban and Local Climatology, Universität Freiburg (BR), February 20-21.
- Alcoforado, M.J. (2010). Assessing and Modeling the Urban Climate in Lisbon. In Carrega, P. (ed.) *Geographical Information and Climatology*. London, ISTE, 125-158.
- Alcoforado, M.J. & Andrade, H. (2006). Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1-3), 151–159.
- Alcoforado M.J., Lopes, A., Andrade, H. & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa*. Lisboa, Centro de Estudos Geográficos (Área de Investigação em Geo-Ecologia, Relatório 4)
- Alcoforado, M.J., Andrade, H., Lopes, A. & Vasconcelos, J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning. The example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning*, 90 (1-2), 56-65.
- Alcoforado, M.J., Lopes, A., Alves, E. D. & Canário, P. (2014). Lisbon heat Island statistical study (2004-2012). *Finisterra*, 49(98), 61-80.
- AML (2018). Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas (PMAAC-AML). Volume 1 - Definição do cenário base de adaptação para a AML. Área Metropolitana de Lisboa.
- Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., et al (2007). Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71-95.
- Bouzarovski, S. (2014). Energy poverty in the European Union: Landscapes of vulnerability. *Wires Energy Environ*, 3, 276-289.
- Casimiro, E., Calheiros, J., Santos, F.D. & Kovats, S. (2006). National assessment of human health effects of climate change in Portugal: Approach and key findings. *Environ. Health Perspect.*, 114(12), 1950-1956.
- Correia, E. (2019). *Mapas Climáticos Urbanos - Geometria e densidade urbana atual. Relatório*. In, "Cartografia de Vulnerabilidade Térmica – Mapeamento dos efeitos das Ondas de Calor em Lisboa, face às projecções climáticas", Câmara Municipal de Lisboa.
- European Environment Agency (EEA) (2005). Vulnerability and adaptation to climate change in Europe. EEA Technical report No 7
- European Environment Agency (EEA) (2012). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: An indicator-based report. EEA Report No 12
- European Environment Agency (EEA) (2018a). *Imperviousness Density*. <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/status-maps/2015>
- European Environment Agency (EEA) (2018b). *Tree Cover Density*. <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density>
- EUROSTAT (2017) Eurostat Database. Online Stat. database.
- Fonseca, D., Carvalho, M.J., Marta-Almeida, M. et al (2016). Recent trends of extreme temperature

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

- indices for the Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94, 66-76.
- Giorgi, F. (2005). Climate change prediction. *Climatic Change*, 73, 239–265.
- Gouveia, J.P., Seixas, J. & Long, G. (2018). Mining households' energy data to disclose fuel poverty: Lessons for Southern Europe. *Journal of Cleaner Production*, 178 (290), 534-550.
- Hidalgo, J., & Jougl, R. (2018). On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. *PLoS One*, 13(12), e0208138.
- IDAD (2019). Estudo do regime das Ondas de Calor na AML – clima atual e futuro. In, “Cartografia de Vulnerabilidade Térmica – Mapeamento dos efeitos das Ondas de Calor em Lisboa, face às projeções climáticas”, Câmara Municipal de Lisboa.
- Kent, C. W., Grimmond, S., Barlow, J., Gatey, D., Kotthaus, S., Lindberg, F., & Halios, C. H. (2017). Evaluation of urban local-scale aerodynamic parameters: implications for the vertical profile of wind speed and for source areas. *Boundary-Layer Meteorology*, 165, 183–213.
- Krivoruchko, K. (2012). Empirical Bayesian Kriging. *ESRI Press*.
- Krivoruchko, K. (2012). Empirical Bayesian Kriging Implemented. in *ArcGIS Geostatistical Analyst. ArcUser*.
- Krivoruchko, K. & Gribov, A. (2019). Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32
- Lopes, A. (2003). Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano. Ilha de calor de superfície e balanço energético. Lisboa, FLUL (Dissertação de Doutoramento em Geografia Física).
- Lopes, A., Saraiva, J. & Alcoforado, M.J. (2011). Urban boundary layer wind speed reduction in summer due to urban growth and environmental consequences in Lisbon. *Environmental Modelling and Software*, 26 (2), 241-243.
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M.J. & Machete, R. (2013). Lisbon urban heat island updated: New highlights about the relationships between thermal patterns and wind regimes. *Advances in Meteorology*. Article ID 487695, 11 p.
- Lowry, W.P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: problem analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 16(2), 129-135.
- Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd edition). Routledge.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Rigo, G., & Parlow, E. (2007). Modelling the ground heat flux of an urban area using remote sensing data. *Theoretical and Applied Climatology*, 90, pages185–199
- Rigo, G., Parlow, E., & Oesch, D. (2006). Validation of satellite observed thermal emission with in-situ measurements over an urban surface. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), 201-210.
- Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A.H., García-Casado, L.A. & Nieto, S. (2010). Trends in warm days and cold nights over the Iberian Peninsula: Relationships to large-scale variables. *Climatic Change*, 100(3):667-684.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Hammer, S. & Mehrotra, S. (2011). *Urban Climate Change in Context*.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network. Cambridge University Press, Cambridge.

Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ibrahim, S. (2018). *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network.* Cambridge University Press. Cambridge.

Team, A. (2009). *ASTER Global DEM Validation. Lpdaac Usgs Gov4 Accessed 28 July 2009.*

Thomson, H., Snell, C. & Bouzarovski, S. (2017). Health, well-being and energy poverty in Europe: A comparative study of 32 European countries. *Int J Environ Res Public Health*, 14(6):584, 20p.

Vasconcelos J (2012) *Bioclima, saúde e qualidade da habitação em Portugal : papel da exposição ao frio na incidência de doenças coronárias agudas.* Universidade Nova de Lisboa

Weston, K. J. (2007). *Boundary layer climates (Second edition).* By T. R. Oke. Methuen. 1987.

Wicki, A., & Parlow, E. (2017). Multiple regression analysis for unmixing of surface temperature data in an urban environment. *Remote Sensing*, 9(7):684, 23 p.

Wicki, A., Parlow, E., & Feigenwinter, C. (2018). Evaluation and Modeling of Urban Heat Island Intensity in Basel, Switzerland. *Climate*, 6(55), 25p.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

ANEXO A

MAPAS DA ILHA DE CALOR URBANA ATUAL METADADOS

De acordo com o **Contrato de Aquisição de Serviços nº 19042458**, designado “Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para as Áreas Críticas na Cidade de Lisboa”, apresentam-se as fichas de metadados dos Mapas das Ilhas de Calor Atual (ICU) elaborados em formato digital, cuja fundamentação científica é apresentada no relatório elaborado para o efeito.

A – Lista de mapas

- a) Mapa da Ilha de Calor Atual no Inverno, ao entardecer
- b) Mapa da Ilha de Calor Atual no Inverno, durante o período noturno
- c) Mapa da Ilha de Calor Atual no Verão, ao entardecer
- d) Mapa da Ilha de Calor Atual no Verão, durante o período noturno
- e) Mapa da Ilha de Calor Atual durante um dia de Onda de Calor, ao entardecer
- f) Mapa da Ilha de Calor Atual durante um dia de Onda de Calor, durante o período noturno

B – Unidade elementar de análise

Indo ao encontro das diferentes escalas de análise do projeto “Cartografia de Vulnerabilidade Térmica – Mapeamento dos efeitos das ondas de calor em Lisboa, face às projeções climáticas”, onde esta operação se enquadra, e às eventuais necessidades no âmbito das ações de ordenamento e/ou de planeamento, os mapas foram elaborados com base num modelo contínuo geoestatístico de interpolação espacial e apresentado em:

- a) Grelha regular com uma resolução horizontal de 100x100 metros;
- b) Isolinhas com os valores de ICU classificados.

Os mapas são acompanhados de ficheiros de simbologia para visualização em ArcGIS, v. 10.3.

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A.1 - Mapas da Ilha de Calor Urbana no Inverno – Entardecer

Designação	G100_ICU_INV_TRD.shp
Descrição	ICU mediana no Inverno, durante o crepúsculo da tarde (entardecer)
Unidade de análise	Grelha regular com resolução horizontal de 100 x 100m
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i>
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	ID_Cel100: código identificador de cada célula da grelha ICUinv_tar: valor das diferenças em °C

Designação	ISL_ICU_INV_TRD.shp
Descrição	ICU mediana no Inverno, durante o crepúsculo da tarde (entardecer)
Unidade de análise	Modelo contínuo, discretizado em classes
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i> Divisão em classes dos valores das diferenças de temperatura: amplitude de 0,5°C Isolinhas correspondentes aos limiares das classes
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	Classe: identificação dos intervalos das classes Intervalos: limiares das classes das diferenças de temperatura

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A.2 – Mapas da Ilha de Calor Urbana no Inverno – Noite

Designação	G100_ICU_INV_NT.shp
Descrição	ICU mediana no Inverno, durante o período noturno
Unidade de análise	Grelha regular com resolução horizontal de 100 x 100m
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i>
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	ID_Cel100: código identificador de cada célula da grelha ICUinv_noir: valor das diferenças em °C

Designação	ISL_ICU_INV_NT.shp
Descrição	ICU mediana no Inverno, durante o período noturno
Unidade de análise	Modelo contínuo, discretizado em classes
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i> Divisão em classes dos valores das diferenças de temperatura: amplitude de 0,5°C Isolinhas correspondentes aos limiares das classes
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	Classe: identificação dos intervalos das classes Intervalos: limiares das classes das diferenças de temperatura

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A.3 – Mapas da Ilha de Calor Urbana no Verão – Entardecer

Designação	G100_ICU_VER_TRD.shp
Descrição	ICU mediana no Verão, durante o crepúsculo da tarde (entardecer)
Unidade de análise	Grelha regular com resolução horizontal de 100 x 100m
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i>
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	ID_Cel100: código identificador de cada célula da grelha ICUver_tar: valor das diferenças em °C

Designação	ISL_ICU_VER_TRD.shp
Descrição	ICU mediana no Verão, durante o crepúsculo da tarde (entardecer)
Unidade de análise	Modelo contínuo, discretizado em classes
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i> Divisão em classes dos valores das diferenças de temperatura: amplitude de 0,5°C Isolinhas correspondentes aos limiares das classes
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	Classe: identificação dos intervalos das classes Intervalos: limiares das classes das diferenças de temperatura

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A.4 – Mapas da Ilha de Calor Urbana no Verão – Noite

Designação	G100_ICU_VER_NT.shp
Descrição	ICU mediana no Verão, durante o período noturno
Unidade de análise	Grelha regular com resolução horizontal de 100 x 100m
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i>
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	ID_Cel100: código identificador de cada célula da grelha ICUver_noi: valor das diferenças em °C

Designação	ISL_ICU_VER_NT.shp
Descrição	ICU mediana no Verão, durante o período noturno
Unidade de análise	Modelo contínuo, discretizado em classes
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i> Divisão em classes dos valores das diferenças de temperatura: amplitude de 0,5°C Isolinhas correspondentes aos limiares das classes
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	Classe: identificação dos intervalos das classes Intervalos: limiares das classes das diferenças de temperatura

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A.5 – Mapas da Ilha de Calor Urbana num dia de Onda de Calor (06/07/2010) – Entardecer

Designação	G100_ICU_OC_TRD.shp
Descrição	ICU mediana no dia de Onda de Calor, durante o crepúsculo da tarde (entardecer)
Unidade de análise	Grelha regular com resolução horizontal de 100 x 100m
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i>
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	ID_Cel100: código identificador de cada célula da grelha ICUoc_tar: valor das diferenças em °C

Designação	ISL_ICU_OC_TRD.shp
Descrição	ICU mediana no de Onda de Calor, durante o crepúsculo da tarde (entardecer)
Unidade de análise	Modelo contínuo, discretizado em classes
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i> Divisão em classes dos valores das diferenças de temperatura: amplitude de 0,5°C Isolinhas correspondentes aos limiares das classes
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	Classe: identificação dos intervalos das classes Intervalos: limiares das classes das diferenças de temperatura

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 1 – Caracterização e cartografia das ilhas de calor atuais

A.6 – Mapas da Ilha de Calor Urbana num dia de Onda de Calor – Noite

Designação	G100_ICU_OC_NT.shp
Descrição	ICU mediana no dia de Onda de Calor, durante o período noturno
Unidade de análise	Grelha regular com resolução horizontal de 100 x 100m
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i>
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	ID_Cel100: código identificador de cada célula da grelha ICUoc_noi: valor das diferenças em °C

Designação	ISL_ICU_OC_NT.shp
Descrição	ICU mediana no dia de Onda de Calor, durante o período noturno
Unidade de análise	Modelo contínuo, discretizado em classes
Método analítico	Diferença mediana entre a temperatura do ar registada nos pontos de observação da rede do CEG/IGOT e a estação meteorológica do Aeroporto Interpolação espacial através de método geoestatístico: <i>Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction</i> Divisão em classes dos valores das diferenças de temperatura: amplitude de 0,5°C Isolinhas correspondentes aos limiares das classes
Fontes de dados	Rede CEG/IGOT Estação meteorológica do Aeroporto
Sistema de referência	ETRS89/ PT-TM06 (EPSG:3763)
Formato	Esri Shapefile
Representação espacial	Vetorial
Geometria	Polígono
Atributos	Classe: identificação dos intervalos das classes Intervalos: limiares das classes das diferenças de temperatura

ANEXO B

DESVIOS DE TEMPERATURA MÉDIA DE CADA FREGUESIA EM RELAÇÃO AO AEROPORTO DE LISBOA

Freguesia	Inverno		Verão		Onda de Calor (06/07/2010)	
	Entardecer	Noite	Entardecer	Noite	Entardecer	Noite
Ajuda	1.0	0.3	1.3	0.5	1.2	0.3
Ajuda (Monsanto)	0.3	-0.6	0.1	-0.6	-0.3	-0.7
Alcântara	1.1	0.5	1.5	0.8	0.9	0.4
Alcântara (Monsanto)	0.3	-0.4	0.5	-0.3	-0.9	-0.6
Alvalade	0.8	0.3	1.1	0.6	0.7	0.2
Areeiro	1.3	0.5	1.6	0.8	1.8	0.5
Arroios	1.5	0.7	1.8	1.0	2.6	0.8
Avenidas Novas	1.2	0.5	1.5	0.8	1.7	0.7
Beato	1.5	0.6	1.7	0.9	1.9	0.3
Belém	1.5	0.6	1.6	0.8	1.1	0.3
Belém (Monsanto)	1.2	0.0	0.7	0.2	-0.2	-0.5
Benfica	0.8	0.2	0.6	0.3	0.6	0.3
Benfica (Monsanto)	0.3	-0.5	0.1	-0.5	-0.9	-0.8
Campo de Ourique	0.8	0.4	1.3	0.7	1.8	0.7
Campolide	1.1	0.4	1.1	0.6	1.4	0.7
Campolide (Monsanto)	0.5	-0.2	0.7	-0.1	-0.5	-0.3
Carnide	0.7	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2
Estrela	1.1	0.7	2.0	1.0	2.0	0.8
Lumiar	0.5	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
Marvila	1.2	0.4	1.3	0.7	1.6	0.0
Misericórdia	1.3	1.0	1.9	1.2	3.3	1.1
Olivais	0.5	0.4	1.3	0.6	1.3	-0.1
Parque das Nações	1.4	0.8	1.9	1.1	2.6	0.0
Penha de França	1.5	0.5	1.7	0.8	2.2	0.5
Santa Clara	0.1	0.0	-0.1	0.1	0.2	-0.3
Santa Maria Maior	1.6	1.0	2.0	1.3	3.4	1.1
Santo António	1.3	0.7	1.7	1.0	2.3	0.9
São Domingos de Benfica	1.1	0.4	1.1	0.7	1.0	0.6
São Domingos de Benfica (Monsanto)	0.5	-0.3	0.3	-0.2	-0.8	-0.6
São Vicente	1.4	0.6	1.9	1.0	2.5	0.7