



RELATÓRIO

FASE 5 | ABRIL 2020

Estudo do Regime das Ondas de Calor na Área Metropolitana 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:



Cofinanciado por:





De acordo com o **Contrato de Aquisição de Serviços Nº 18041057** designado “Aquisição de serviços para a elaboração de Estudo do Regime das Ondas de Calor na Área Metropolitana de Lisboa” estabelecido entre **Município de Lisboa** e o **Instituto do Ambiente e Desenvolvimento - IDAD** no dia 28 de novembro de 2018,

Apresenta-se o **Relatório da Fase 5** de acordo com a Cláusula 3.ª e os pontos 1. e 2. da Parte II – Especificações Técnicas do respetivo Caderno de Encargos.

Relatório

Fase 5 – Acompanhamento dos exercícios de simulação de variáveis naturais e antropogénicas em áreas críticas identificadas

Início – 1 de abril de 2020

Fim – 31 de maio de 2020

Elaborado por: Alfredo Rocha e Rui Silva

Índice

1. Introdução	1
2. Fase 1: Estudo do Regime das Ondas de Calor na Área Metropolitana de Lisboa - Clima atual e futuro	1
2.1. Enquadramento do estudo.....	1
2.2. Simulações, dados e metodologia de base	2
2.2.1. Simulações.....	2
2.2.2. Dados.....	4
2.2.3. Correção de viés aplicada aos dados simulados	6
2.2.4. Identificação das ondas de calor	6
2.3. Principais conclusões da fase 1	9
2.4. Comparação com outros estudos.....	11
3. Fase 2: Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano na Área Metropolitana de Lisboa para o Clima Atual	17
3.1. Enquadramento do estudo.....	17
3.2. Simulações, dados e metodologia de base	18
3.2.1. Simulações.....	18
3.2.2. Dados da topografia e uso do solo.....	20
3.2.3. Experiências de simulação.....	22
3.2.4. Dados de observações.....	23
3.2.5. Validação das simulações numéricas	27
3.2.6. Avaliação da Ilha de Calor Urbano	27
3.3. Principais conclusões da fase 2	28
3.4. Comparação com outros estudos existentes	30
4. Fase 3: Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano na Área Metropolitana de Lisboa para o Clima Futuro	31
4.1. Enquadramento do estudo.....	31



4.2. Simulações, dados e metodologia de base	32
4.2.1. Simulações	32
4.2.2. Calor antropogénico	32
4.2.3. Esquema de irrigação	34
4.2.4. Projeções da cidade futura	34
4.2.5. Experiências de simulação	37
4.3. Principais conclusões da fase 3	40
4.4. Comparação com outros estudos existentes	41
5. Referências	46

1. Introdução

Neste relatório é feita a compilação das principais conclusões e resultados das três primeiras fases de estudo do regime de ondas de calor e ilha de calor urbano no clima atual e futuro na cidade de Lisboa. Paralelamente, é também feita a comparação dos resultados e conclusões das várias fases com outros estudos existentes relacionados com a modelação de cenários climáticos (da temperatura) para a cidade de Lisboa.

2. Fase 1: Estudo do Regime das Ondas de Calor na Área Metropolitana de Lisboa - Clima atual e futuro

2.1. Enquadramento do estudo

O objetivo deste estudo foi o de avaliar com detalhe as projeções climáticas da temperatura e de ondas de calor no Município de Lisboa (ML), mas também em grande parte da sua área metropolitana (AML). Este estudo veio complementar e aprofundar o trabalho e análise apresentados no relatório da Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas - EMAAC (2017).

Neste trabalho são considerados três períodos climáticos que representam o clima atual recente de referência (HIST – 1986-2005) e dois cenários climáticos futuros a médio (MED – 2046-2065) e longo (LONG – 2081-2100) prazo, respetivamente. Estes períodos são os mesmos que os considerados no 5º Relatório do IPCC (IPCC, 2013), com exceção do cenário climático a curto prazo (2016-2035) que não é abordado no relatório. No entanto, o relatório da EMAAC considera períodos mais extensos (30 anos) na sua análise, nomeadamente, 1971-2000, 2041-2070 e 2071-2100.

À semelhança da EMAAC, é considerado o cenário de emissões de gases com efeito de estufa **RCP8.5** (*Representative Concentration Pathways*) (Sillmann et al. 2013). Este cenário é definido por um forçamento radiativo de 8.5 W m⁻² em 2100 e um aumento contínuo a partir desse ano Moss et al. (2008) e apresenta-se, cada vez mais, como um

dos mais prováveis face ao desentendimento político internacional em reduzir a emissão de gases com efeito de estufa.

2.2. Simulações, dados e metodologia de base

2.2.1. Simulações

O modelo usado para a obtenção das projeções climáticas deste estudo foi o WRF v3.5 (*Weather Research and Forecasting*), que é um modelo regional de previsão numérica de tempo desenvolvido para investigação e serviço operacional. O modelo foi adaptado para simulações em modo climático por Marta-Almeida et al. (2016). A configuração de domínios usada considerou três domínios aninhados, D-1, D-2 e D-3, em modo *two-way nesting*. A resolução da grelha de cada um dos domínios é de 81, 27 e 9 km, respetivamente (**Figura 1**).

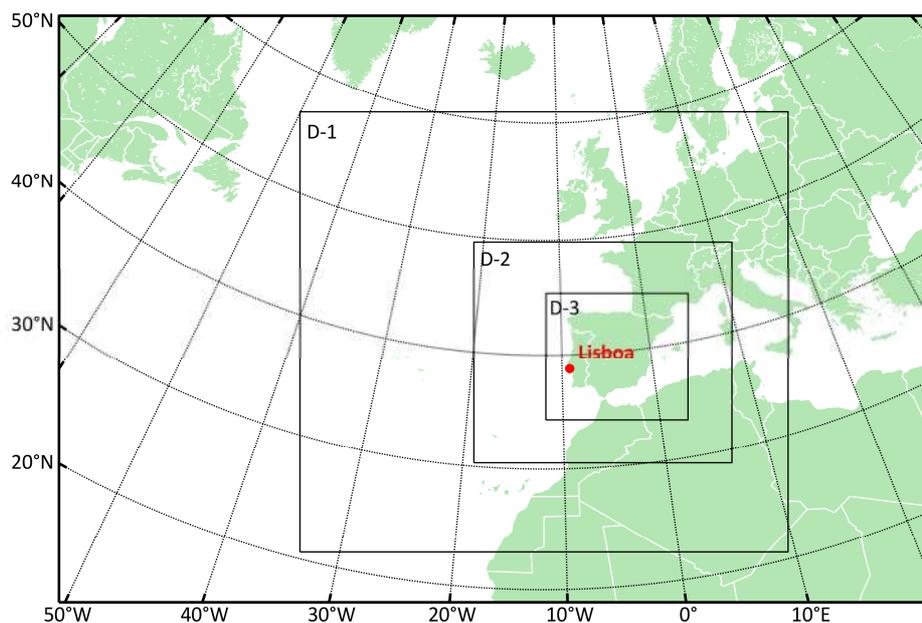


Figura 1. Configuração dos domínios usados na implementação do modelo WRF. Domínios D-1, D-2 e D-3 com resoluções horizontais de 81 km, 27 km e 9 km, respetivamente.

A partir das saídas do modelo, foi selecionado o ponto da grelha do domínio D-3 sobre o Município de Lisboa (38.8492°N, 9.1972°W) e extraídos os valores diários das temperaturas máxima (Tmax) e mínima diária (Tmin) para os períodos HIST, MED e

LONG. A partir das séries temporais destas variáveis foi calculada a amplitude térmica diária (Ampl).

Tendo em conta que as ondas de calor são fenómenos de larga escala e que o seu padrão local pode modificar-se devido a fatores como a proximidade da costa, altitude, orografia, orientação das encostas e uso do solo, introduziram-se melhoramentos na representação dos campos da topografia e uso do solo no modelo. O uso do solo nas simulações é representado por dados do CORINE 2012 (CLC 2012 - Coordination of Information on the Environment Land Cover) da Agência Europeia do Ambiente (AEA), e a topografia por dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA.

No total foram realizadas quatro simulações - duas respeitantes ao período histórico e duas aos cenários climáticos futuros:

Simulação **ERA** – esta simulação serve apenas para avaliar o comportamento da configuração base do modelo WRF quando forçado por dados das reanálises ERA-Interim para o período HIST (1986-2005). As reanálises correspondem a dados observados depois de “analisados” (i.e., interpolados/extrapolados para uma malha 3-D com recurso a modelos atmosféricos globais);

Simulação **HIST** – Simulação para o período HIST (1986-2005) forçada por dados do modelo climático global MPI-ESM-LR (*Max Planck Institute Earth System Model – low resolution*), que fez parte do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), sendo um dos melhores modelos climáticos para simulação do clima da Europa;

Simulação **MED** – Simulação para o período MED (2046-2065) e forçada por dados do MPI-ESM-LR correspondentes ao cenário RCP8.5;

Simulação **LONG** – O mesmo que a simulação MED, mas para o período LONG (2081 - 2100).

2.2.2. Dados

a. Dados de observações

Para a validação dos resultados da simulação ERA foram obtidos dados observados da base de dados E-OBS (EOBS daqui em diante) – do *European Climate Assessment & Dataset* (ECA&D) – que estão disponíveis em grelha e frequência diária para toda a Europa. Tal como foi feito para as saídas do domínio D-3 das simulações WRF, foram extraídos os dados diários da temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) para o ponto da grelha das EOBS sobre Lisboa. De seguida foi calculada a amplitude térmica diária para todo o período HIST.

De forma a enquadrar a alteração climática na temperatura média em Lisboa desde a Era pré-industrial, usaram-se dados médios mensais da temperatura da estação meteorológica de Lisboa (Geofísico), operada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), obtidos na base de dados do NOAA. Estes dados foram previamente sujeitos a um controlo de qualidade e de correção de viés.

Por fim, também se usaram dados da temperatura de 9 estações meteorológicas do IPMA (**Tabela 1**), abrangendo o período entre 27-07-2003 e 14-08-2003, para estudar o caso particular da onda de calor de 2003. Estes dados foram cedidos pelo IPMA. Esta onda de calor teve início no dia 29 de julho e fim no dia 2 de agosto, contudo, consideraram-se também os dias 27 e 28 de julho e de 3 a 14 de agosto por terem registado temperaturas elevadas.

Tabela 1. Estações meteorológicas do IPMA e respetivas coordenadas e ID.

Estação	ID	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Lisboa/Geofísico	01200535	38,71907778	-9,14972222	77
Lisboa/Gago Coutinho	01200579	38,76620278	-9,12749444	104
Amadora	01240935	38,75757778	-9,24244167	143
Cascais/Cabo Raso	01210765	38,70903056	-9,48541667	9
Lisboa/Alvalade	01240921	38,75614722	-9,14462778	90
Lisboa/Estefânia	01240924	38,72952222	-9,14332222	79

Lisboa/Baixa	01240925	38,71093333	-9,13405556	8
Lisboa/Benfica	01240931	38,74885278	9,19946944	75
Cacém	01240936	38,76960833	-9,29948611	124

b. Dados de simulações climáticas (EURO-CORDEX)

Para avaliar a incerteza das projeções climáticas do modelo WRF, obtiveram-se dados de saída de um conjunto 15 modelos regionais que participaram no programa EURO-CORDEX (**Tabela 2**). Estes dados têm uma resolução horizontal de 12 km e tal como os dados do WRF foram submetidos ao método de correção de viés que é explicado da secção seguinte. Deste conjunto de dados foram extraídos apenas os dados sobre o Município de Lisboa da temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) diárias, e calculada a amplitude térmica diária (Ampl).

Tabela 2. Modelos EURO-CORDEX. Modelo global forçador (GCM) e modelo regional (RCM).

Nome	GCM	RCM
MOD1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM4-8-17
MOD2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53
MOD3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI-RCA4
MOD4	ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM4-8-17
MOD5	ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRHAM5
MOD6	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E
MOD7	ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4
MOD8	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E
MOD11	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-INNERIS-WRF331F
MOD12	IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4
MOD17	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17
MOD18	MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009
MOD19	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4
MOD21	NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5
MOD23	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4

2.2.3. Correção de viés aplicada aos dados simulados

Por serem uma representação da realidade, os modelos climáticos contêm erros sistemáticos que geram incerteza nas projeções das diferentes variáveis meteorológicas. Assim, foi aplicado um método de correção de viés designado *Quantil Mapping* aos dados diários da temperatura mínima (Tmin) e máxima (Tmax) para todos os dias do ano. Este método assume que a função de distribuição de cada uma das variáveis possa ser diferente no clima futuro relativamente ao clima atual, e consiste em corrigir individualmente as distribuições para cada quantil dos dados simulados (i.e., dados WRF e CORDEX) de acordo com a distribuição dos dados observados (i.e., dados das EOBS). Os quantis são obtidos considerando todos os dias do ano. Este procedimento é exatamente o mesmo que o aplicado e descrito em detalhe por Amengual et al. (2011).

Neste trabalho, foi feita em primeiro lugar a correção de viés aos dados simulados para o período HIST. Os dados corrigidos foram validados por comparação com os dados observados (EOBS). De seguida, procedeu-se à correção dos dados para os períodos futuros.

Aplica-se o sufixo **NC** aos dados não corrigidos e o sufixo **BC** aos dados corrigidos.

2.2.4. Identificação das ondas de calor

Neste estudo as ondas de calor foram definidas usando o método de Russo et al. (2014). Segundo este método, onda de calor é definida como sendo um período de pelo menos 3 dias consecutivos em que a temperatura máxima diária (Tmax) de cada dia é igual ou superior a um valor crítico de temperatura máxima (Tmax_c). Este valor é determinado para cada um dos 365 dias do ano, sendo igual ao percentil 90 da temperatura máxima diária de todos os dias numa janela de 31 dias centrada no dia em questão. Foram considerados todos os 31 dias dos 20 anos do período analisado (620 dias).

As ondas de calor são identificadas em todas as simulações para o período de 1 de maio a 31 de outubro, porque considera-se que as ondas de calor de maior impacto socioeconómico são aquelas que ocorrem durante os meses mais quentes. A escolha deste período de verão alargado baseia-se no facto de as projeções de temperatura para os climas futuros mostrarem que maio e outubro irão registar valores semelhantes àqueles que se registam no clima atual nos meses considerados atualmente como meses de verão, como se pode observar na **Tabela 3**.

Tabela 3. Temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) diária e amplitude térmica diária (AMPL), média mensal para HIST, MED e LONG, sobre o concelho de Lisboa. Unidades (°C).

Mês	HIST	HIST	HIST	MED	MED	MED	LONG	LONG	LONG
	Tmax	Tmin	Ampl	Tmax	Tmin	Ampl	Tmax	TMin	Ampl
Jan	15,1	8,6	6,5	16,8	10,1	6,7	17,7	10,8	6,9
Fev	15,4	8,3	7,1	17,0	9,5	7,5	17,8	10,8	7,1
Mar	17,7	8,9	8,8	19,0	10,2	8,8	20,5	11,5	9,1
Abr	19,3	10,0	9,3	21,2	11,4	9,8	21,5	12,0	9,5
Mai	22,0	12,1	9,9	24,1	13,3	10,8	25,0	14,6	10,4
Jun	26,9	15,6	11,3	27,6	16,6	11,0	30,3	18,6	11,8
Jul	28,3	17,1	11,2	31,0	19,2	11,8	33,7	21,3	12,4
Ago	29,0	17,5	11,5	31,6	19,6	12,0	33,2	21,2	12,0
Set	27,3	16,5	10,8	30,5	18,9	11,6	32,3	20,6	11,7
Out	23,6	14,3	9,3	25,8	16,2	9,6	28,3	17,9	10,5
Nov	19,2	11,2	8,0	20,8	12,8	8,0	22,9	14,8	8,2
Dez	16,4	9,4	6,9	17,8	10,8	7,0	19,7	12,4	7,3
Ano	21,7	12,5	9,2	23,6	14,0	9,6	25,3	15,5	9,7

São consideradas todas as ondas de calor com início no período mencionado, mesmo que as mesmas terminem fora desse período. As datas das HW em simulações climáticas realizadas pelo WRF e modelos CORDEX, quando forçadas por modelos globais, não têm uma correspondência com datas reais e, por isso, não são identificadas. A correspondência com datas reais apenas acontece para o passado, quando os modelos são forçados por dados de reanálises. Para cada clima, HIST, MED

e LONG, a identificação de onda de calor é feita considerando a temperatura máxima crítica (T_{max_c}) referente ao clima HIST, pois o objetivo é identificar alterações no regime de ondas de calor considerando o clima de referência.

Cada onda de calor foi caracterizada pelas seguintes propriedades:

Duração (dias) de uma onda de calor.

Intensidade ($^{\circ}\text{C}$) – Diferença média entre T_{max} e T_{max_c} diária para os dias de uma onda de calor. A intensidade é medida relativamente a T_{max_c} . Deste modo, o mesmo valor de intensidade poderá representar situação distintas. Por exemplo, intensidade = 3°C poderá representar uma onda de calor com T_{max_med} de 35°C e T_{max_c} de 32°C ou uma onda de calor com T_{max_med} de 30°C e T_{max_c} de 27°C .

T_{max_med} ($^{\circ}\text{C}$) – Temperatura máxima média dos dias da onda de calor.

T_{min_med} ($^{\circ}\text{C}$) – Temperatura mínima média dos dias da onda de calor.

Fator de recuperação ($^{\circ}\text{C}$) - Igual à diferença média entre T_{max} e T_{min} para todos os dias de uma onda de calor. Quanto maior for este valor, maior é o alívio durante a noite em dias de onda de calor. O fator de recuperação é uma medida de T_{max} relativamente a T_{min} . Deste modo, o mesmo valor de fator de recuperação poderá representar situação distintas. Por exemplo, fator de recuperação = 10°C poderá representar uma onda de calor com Temperatura máxima média de 35°C e temperatura mínima média de 25°C ou uma onda de calor com Temperatura máxima de 30°C e temperatura mínima média de 20°C . O fator de recuperação representa a amplitude térmica diária média durante a onda de calor.

T_{max_sum} ($^{\circ}\text{C}.\text{dia}$) - Soma de T_{max} de todos os dias da onda de calor. Esta variável quantifica a quantidade de energia acumulada durante uma onda de calor (depende da duração e de temperatura máxima diária nos dias de onda de calor). Esta grandeza é semelhante à grandeza $^{\circ}\text{C}.\text{dia}$ comumente utilizada na determinação das necessidades térmicas de aquecimento. T_{max_sum} representa o somatório das diferenças positivas entre a temperatura interior de um edifício e a temperatura média

do ambiente exterior ao longo do período de aquecimento. Neste estudo Tmax_sum representa o somatório da temperatura máxima de todos os dias de uma onda de calor sem considerar uma temperatura de referência (i.e., temperatura ambiente exterior no caso de °C.dia). Podemos considerar Tmax_sum uma grandeza relacionada com a energia acumulada durante uma onda de calor e relevante para o *stress* térmico. Por exemplo, um valor de 300°C.dia de uma onda de calor pode representar uma onda de calor de 10 dias com temperatura máxima diária de 30°C em cada dia ou uma onda de calor de 8 dias com temperatura máxima diária de 37,5°C em cada dia.

Foi ainda calculado o **número de ondas de calor** e **número de dias de ondas de calor**.

2.3. Principais conclusões da fase 1

Tendo por base os períodos climáticos HIST (1986-2005), MED (2046-2065) e LONG (2081-2100) e as simulações climáticas com modelo WRF e dos 15 modelos do EURO-CORDEX resumem-se, em seguida, as principais conclusões da fase 1 para o Concelho de Lisboa. Note-se que as projeções para períodos climáticos futuros consideram o cenário de emissões RCP8.5.

Temperatura

- A temperatura média anual climatológica de Lisboa para o período 1999-2018 aumentou 1,9°C relativamente a 1855-1900 e 0,4°C relativamente a 1986-2005;
- A temperatura máxima diária média anual terá um aumento relativo a HIST de 1,6°C no clima MED e 3,6°C no clima LONG;
- A temperatura mínima diária os valores de aumento relativamente a HIST são 1,6°C e 3,1°C, respetivamente, portanto, ligeiramente inferiores aos aumentos da temperatura máxima;
- Julho regista os maiores aumentos relativamente a HIST, com 2,6°C (Tmax) e 2,1°C (Tmin) para MED, e 5,3°C (Tmax) e 4,2°C (Tmin) para LONG, respetivamente;

- A amplitude térmica diária média anual terá um aumento de 0,3°C e 0,5°C para MED e LONG, respetivamente;
- Julho, agosto, setembro e outubro registam os maiores aumentos de temperatura máxima, temperatura mínima diária e amplitude térmica diária;
- Os meses de dezembro a março registam os menores aumentos de temperatura máxima, temperatura mínima diária e amplitude térmica diária em ambos os climas futuros.

Ondas de Calor

Considera-se que as propriedades que melhor quantificam a energia térmica associada às ondas de calor, relevantes para o *stress térmico*, são o número de dias de onda de calor e Tmax_sum, porque quantificam valores acumulados e não valores médios.

- O número de dias de onda de calor médio anual irá aumentar aproximadamente 4 e 6 vezes relativamente ao valor atual para os climas MED e LONG, respetivamente. Número de dias de onda de calor médio anual HIST = 10,7 dias; MED = 38,3 dias; LONG = 63,5 dias;
- O número de ondas de calor, a intensidade, duração, temperatura máxima média, temperatura máxima absoluta e a soma da temperatura máxima média das ondas de calor irão aumentar em MED e LONG relativamente a HIST;
- A média anual da soma da temperatura máxima das ondas de calor irá aumentar de 358°C.dia para 1270°C.dia em MED e 2078°C.dia em LONG;
- Os maiores aumentos de número de dias de onda de calor e Tmax_sum ocorrem para os meses de julho a outubro, aumentando estes meses a sua contribuição relativa para as ondas de calor do período de maio a outubro;
- Os meses extremos do período considerado e, portanto, os mais frios (maio e outubro) terão em média, nos períodos MED e LONG, um número de dias de onda de calor e Tmax_sum muito superiores aos que se registam nos meses mais quentes (julho e agosto) atualmente (i.e., HIST);

- Ondas de calor extremas com temperatura máxima diária média superior ou igual a 40°C são somente observadas em LONG. Estas ondas representam 8% de número de dias de onda de calor e 10% de Tmax_sum em LONG.

2.4. Comparação com outros estudos

Nesta secção é feita a comparação entre alguns dos resultados e conclusões obtidas neste relatório com os dos relatórios da EMAAC e PMAAC. Na análise comparativa é necessário ter em consideração os seguintes aspetos:

- Tanto o relatório da EMAAC como o do PMAAC consideram séries de variáveis atmosféricas obtidas a partir das saídas de dois modelos regionais do projeto CORDEX regionalizados para a Europa a partir de dois modelos globais. Estes modelos são apresentados na **Tabela 4**.
- O relatório da EMAAC considera somente simulações para o cenário RCP8.5, enquanto o PMAAC considera o RCP4.5 e o RCP8.5. Para efeitos de comparação entre os resultados dos três relatórios, será considerado somente o cenário RCP8.5;
- Os períodos climáticos considerados pela EMAAC e pelo PMACC diferem dos usados no estudo da fase 1 (i.e., HIST – 1971-2000; MED – 2041-2070; LONG - 2071-2100), sendo parcialmente comuns para os períodos de 1986-2000, 2046-2065 e 2081-2100;
- A EMAAC apresenta a análise e resultados separadamente para o modelo 1 e 2, enquanto o PMAAC usa o ensemble dos dois modelos;
- Tanto o relatório da fase 1 como o da EMAAC aplicam a análise ao ponto da grelha dos modelos sobre o Município de Lisboa, enquanto o relatório do PMACC usa vários pontos dos modelos sobre a região da AML para depois regionalizar a análise em unidades morfoclimáticas (UMC). O PMAAC considera várias UMC dentro da AML, estando o Município de Lisboa integrado na UMC designada por Península de Lisboa (PL), onde se incluem todas as áreas

fortemente urbanizadas da AML Norte. As UMC são definidas a partir da função do relevo como fator climático, diferenciando às escalas regional e sub-regional as áreas com condições climáticas relativamente homogêneas. As UMC distinguem-se pela maior ou menor predominância de diferentes unidades de relevo que apresentam características climáticas particulares. Desta forma são aqui apresentados os resultados do PMAAC para a AML e para a PL.

- **Tabela 4.** Modelos EURO-CORDEX usados dos relatórios do PMAAC e da EMAAC. Modelo global forçador (GCM) e modelo regional (RCM) usados no relatório da fase 5.

Nome	GCM	RCM
Modelo 1	MOHC-HadGEM2	SMHI-RC4
Modelo 2	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E

De forma a sintetizar e comparar os resultados obtidos nos três relatórios, a **Tabela 5** mostra valores médios de algumas variáveis, para o clima de referência (1986-2005 neste estudo e 1971-2000 na EMACC e PMAAC).

As variáveis derivadas da temperatura, comuns aos três relatórios, são assim definidas: **Número de dias de verão** – Número de dias em que a temperatura máxima diária é igual ou superior a 25°C.

Número de dias muito quentes – Número de dias em que a temperatura máxima diária é igual ou superior a 35°C.

Número de noites tropicais – Número de dias em que a temperatura mínima diária é igual ou superior a 20°C.

O modelo WRF não corrigido e os modelos utilizados na EMAAC e PMAAC apresentam um viés frio entre -3,1°C e -0,2°C. Como consequência, o número de dias de verão, de dias muito quentes e de noites tropicais apresentam diferenças negativas relativamente às EOBS. Após a correção de viés pode verificar-se que os dados corrigidos do WRF não apresentam diferenças relativamente às EOBS. De salientar ainda o pequeno viés da temperatura média anual do relatório da PMAAC (entre -0,5°C

e $-0,2^{\circ}\text{C}$). Este pequeno viés deve-se ao facto de os dados do ensemble de modelos já conterem correção de viés por predefinição. As pequenas diferenças entre os resultados do PMAAC poderão estar relacionadas com a área geográfica abrangida pela análise da PMAAC, isto porque os resultados do PMAAC consideram vários pontos da grelha dos modelos, calculando a média dos mesmos de acordo com a região (i.e., AML ou UMC).

Tabela 5. Comparação de variáveis de temperatura apresentadas neste relatório e no EMAAC (2017) e PMAAC (2018) para a temperatura média anual e números médios anuais de dias de verão, dias muito quentes e noites tropicais. Os valores relativos a este relatório referem-se ao período de 1986-2005. Os valores do EMAAC e PMAAC referem-se ao período 1971-2000. Os valores entre parêntesis representam anomalias relativas às EOBS. NC e BC referem-se a dados não corrigidos e corrigidos, respetivamente.

Variável	Relatório da fase 5 (1986-2005) - ML			EMAAC (1971-2000) - ML		PMAAC (1971-2000) - AML/PL
	EOBS	WRF NC	WRF BC	Modelo 1	Modelo 2	Ensemble
Temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$)	17,1	14,7 (-2,4)	17,1 (0,0)	15,1 (-2,0)	14,0 (-3,1)	16,6 (-0,5)/16,9 (-0,2)
Número de dias de verão ($T_{\text{max}} \geq 25^{\circ}\text{C}$)	122	69 (-53)	122 (0)	92 (-30)	63 (-59)	102,8 (-19)/97,4 (-24,6)
Número de dias muito quentes ($T_{\text{max}} \geq 35^{\circ}\text{C}$)	8,0	2,9 (-5,1)	8,0 (0)	8,5 (+0,5)	2,0 (-6,0)	4,5 (-3,5)/2,6 (-5,4)
Número de noites tropicais ($T_{\text{min}} \geq 20^{\circ}\text{C}$)	14,0	7,1 (-6,9)	14 (0)	3,5 (-10,5)	0,8 (-13,2)	6,8 (-7,2)/11 (3)

A **Tabela 6** mostra os valores das mesmas variáveis e modelos da **Tabela 5** projetados para os climas futuros, nomeadamente, 2046-2065 e 2081-2100 deste estudo e 2041-2070 e 2071-2100 da EMAAC e PMAAC, para o cenário RCP8.5. Note-se mais uma vez que os períodos não são os mesmos, mas sobrepõem-se parcialmente.



Os valores absolutos das variáveis apresentadas são subestimados nos modelos 1 e 2 da EMAAC relativamente às EOBS e WRF corrigido, pelo facto de os dados da EMAAC não terem sido submetidos a correção de viés. Isto acontece sobretudo para o modelo 2. No entanto, a alteração climática das mesmas variáveis simuladas por estes modelos apresenta diferenças menores quando comparadas com o WRF e EOBS. No ensemble de modelos do PMAAC existe uma subestimação ligeira dos valores pelo facto de ser considerado um conjunto de pontos diferente e devido ao menor número de modelos no ensemble. De um modo geral, o número de dias de verão, o número de dias muito quentes, o número de noites tropicais e o número de dias de onda de calor são fortemente subestimados no relatório da EMAAC.

Tabela 6. Comparação de variáveis apresentadas neste relatório e nos relatórios da EMAAC (2017) e PMAAC (2018), para a temperatura média anual e números médios anuais de dias de verão, dias muito quentes e noites tropicais para o Município de Lisboa (ML). Os valores relativos a este relatório referem-se aos períodos de 1985-2005, 2046-2065 e 2081-2100. Os valores do EMAAC e PMAAC referem-se aos períodos de 1971-2000, 2041-2070 e 2071-2100. Os valores entre parêntesis representam anomalias relativas ao clima de referência de cada estudo, nomeadamente, 1986-2005 neste estudo e 1971-2000 no EMAAC e PMAAC.

Variável	Relatório fase 1 (RCP8.5)			EMAAC (RCP8.5)						PMAAC (RCP8.5)		
	WRF BC (ML)			mod1 (ML)			mod2 (ML)			Ensemble (mod1 e mod2) - AML/PL		
	1986-2005	2046-2065	2081-2100	1971-2000	2041-2070	2071-2100	1971-2000	2041-2070	2071-2100	1971-2000	2041-2070	2071-2100
Temperatura média anual (°C)	17,1	18,9 (+1,8)	20,4 (+3,3)	15,1	17,5 (+2,4)	19,1 (+4,0)	14,0	15,6 (+1,6)	17,1 (+3,1)	16,6/16,9	18,4 (+1,8)/18,7 (+1,8)	19,8 (+3,2)/20 (+3,1)
Número de dias de verão	122	156 (+34)	180 (+58)	92	135 (+43)	161 (+69)	63	97 (+34)	125 (+62)	102,8/97,4	133,9 (+31,1)/128,2 (+30,8)	167,9 (+55,1)/153,7 (+56,3)
Número de dias muito quentes	8	24 (+16)	38 (+30)	8,5	18 (+9)	33 (+24)	2	7 (+5)	14 (+12)	4,5/2,6	11,7 (+7,2)/7,5(+4,9)	20,6 (+16,1)/12,9 (+10,3)
Número de noites tropicais	14	47 (+33)	86 (+72)	3,5	26 (+22)	66(+62)	0,8	4 (+3)	19 (+18)	6,8/11	19 (+12,2)/24,2 (+13,2)	40,8 (+34,0)/44,8 (+33,8)
Número de ondas de calor	3	8 (+5)	10 (+7)	1	4 (+3)	4 (+3)	1	4 (+3)	4 (+3)	1,4/1,6	3,74 (+2,3)/5,4 (+3,8)	2,5 (+1,1)/4,6 (+3,0)
Número de dias de onda de calor	11	38 (+27)	64 (+53)	5	28 (+23)	37(+32)	7	28 (+21)	32 (+25)	6,3/7	16,4 (+10,1)/21,3 (+14,3)	29,5 (+23,2)/23,3 (+16,3)
Duração média das ondas de calor (dias)	4	5 (+1)	6 (+2)	8	8 (0)	10(+2)	8	8 (0)	9(+1)	n.d.	n.d.	n.d.

3. Fase 2: Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano na Área Metropolitana de Lisboa para o Clima Atual

3.1. Enquadramento do estudo

Os efeitos resultantes de fenómenos climáticos extremos como as ondas de calor (HW) podem ser particularmente amplificados em áreas de maior ocupação urbana.

Partindo do trabalho desenvolvido no relatório da fase 1, “Estudo do Regime das Ondas de Calor na AML – clima atual e futuro”, no estudo da fase 2 procedeu-se à elaboração de um conjunto de simulações numéricas com o modelo atmosférico de mesoescala WRF acoplado a dois modelos de canópia urbana (UCM) distintos. O relatório teve como principal objetivo o estudo e mapeamento da ilha de calor urbano (ICU) na Área Metropolitana de Lisboa (AML) e Município de Lisboa (ML) para o clima atual.

O efeito de ICU é manifestado pela existência de excesso de temperatura nas áreas urbanas em comparação com as áreas rurais envolventes. Esta diferença resulta do facto de os aglomerados urbanos apresentarem superfícies e estruturas com propriedades radiativas, termodinâmicas e aerodinâmicas distintas das áreas rurais. De entre os fatores que potenciam a ocorrência de ICU estão a redução do fator de visibilidade do céu (svf – sky view factor), aumento do comprimento de rugosidade e redução da velocidade do vento junto à superfície, aumento da turbulência e da absorção da radiação solar de curto comprimento de onda pelas superfícies e materiais urbanos, e diminuição da cobertura vegetal e impermeabilização por superfícies urbanas o que levam à redução da evapotranspiração. Para além destes fatores, acrescem ainda os efeitos da libertação de calor devido ao tráfego, metabolismo humano, e calor rejeitado pelos edifícios resultante do consumo de energia elétrica ou da queima de combustíveis fósseis.

A ilha de calor urbano (ICU) é mais visível durante o período noturno e perante condições sinóticas de vento fraco, mas também pode ocorrer durante o dia com menor intensidade.

Devido aos elevados requisitos computacionais necessários para executar simulações com acoplamento online entre o modelo WRF e modelos de canópia urbana, as simulações aqui apresentadas restringem-se a um episódio de HW que ocorreu entre os dias 29 de julho e 3 de agosto de 2003, e que foi identificado e estudado no relatório da fase 1 durante as simulações climáticas do clima atual. A escolha deste episódio de HW para o estudo da ICU na AML, e particularmente na cidade de Lisboa, deve-se ao facto de que é durante estes eventos que a ICU poderá ter maior impacto socioeconómico.

3.2. Simulações, dados e metodologia de base

3.2.1. Simulações

Tal como no estudo da fase 1, o estudo da ICU no clima atual foi feito com recurso a simulações numéricas com o modelo WRF, mas usando uma versão mais recente – v3.9. O modelo foi forçado por dados das reanálises ERA-Interim, com resolução horizontal de $0.75 \times 0.75^\circ$, frequência temporal de 6h e 37 níveis isobáricos. De forma a manter a configuração básica de domínios das simulações climáticas, optou-se por adicionar a essa configuração dois domínios de resolução de 1 km (D-4: 145x154 pts) e 333 m (D-5: 181x160 pts) centrados no Município de Lisboa. A esquematização dos

cinco domínios aninhados usados nas simulações da ICU é mostrada na

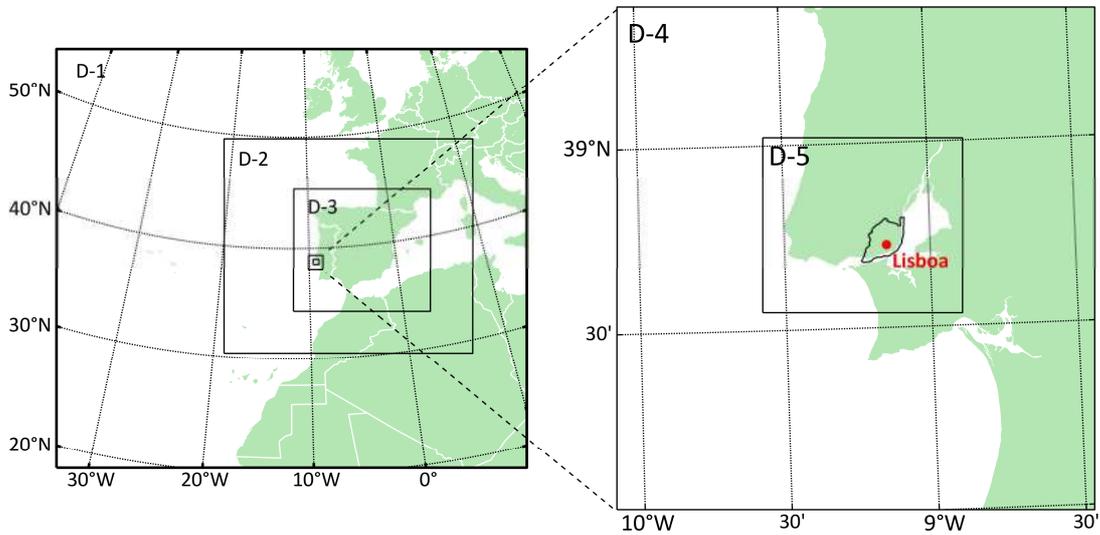


Figura 2.

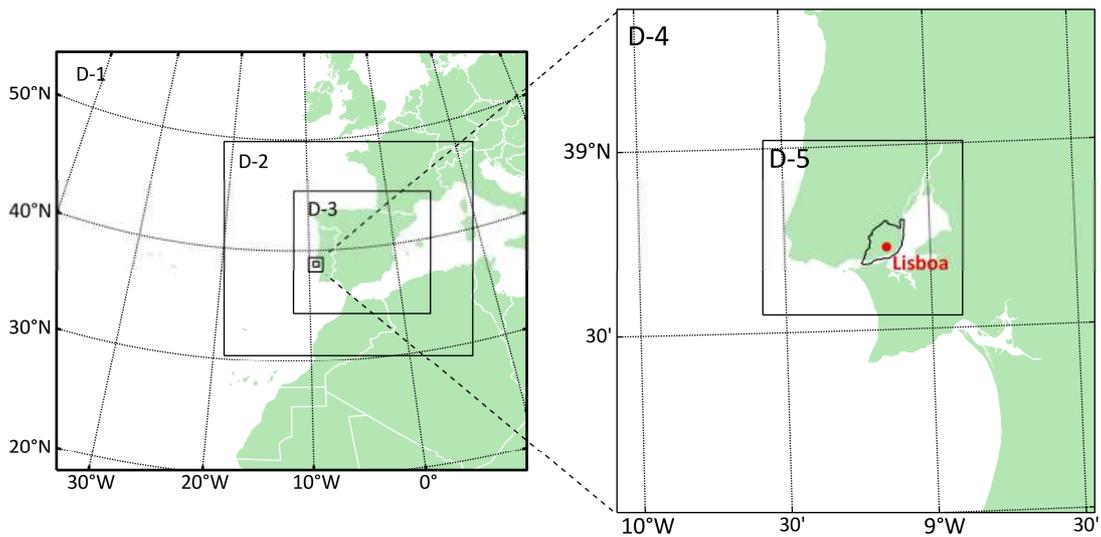


Figura 2. Configuração de domínios usada nas simulações WRF da ICU.

Todas a experiências de simulação decorreram para o período das 00 UTC do dia 28 de julho às 00 UTC do dia 4 de agosto de 2003, tendo sido descartadas as primeiras 24h por pertencerem ao período de spin-up do modelo.

Para a representação dos processos físicos que ocorrem na canóia urbana usaram-se, em diferentes experiências de simulação (descritas na secção 2.1.3 do relatório da fase

2) os modelos de canópia urbana simples e multicamada, SLUCM (Single-layer Urban Canopy Model, (Kusaka et al. 2001; Kusaka and KIMURA 2004) e BEP (Building Environment Parameterization, (Martilli, Clappier, and Rotach 2002), respetivamente. Estes foram acoplados ao modelo atmosférico WRF através do modelo de superfície, Noah Land Surface Model.

Simulações com o modelo SLUCM usaram 46 níveis eta na vertical, estando o primeiro nível acima da superfície, que define o limite superior da canópia urbana, a ~54 m. As simulações com modelo BEP foram configuradas com 49 níveis eta verticais, tendo-se definido três níveis abaixo do limite superior da canópia urbana aos ~40 m, ~24 m e ~12 m.

As restantes opções de parametrizações físicas usadas em todas as simulações bem como os parâmetros térmicos e dinâmicos definidos para cada um dos UCM, podem ser consultados no relatório da fase 2 (secções 2.1 e 2.1.1).

3.2.2. Dados da topografia e uso do solo

Tal como nas simulações climáticas do estudo da fase 1 a representação da topografia no modelo foi melhorada com dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA, com uma resolução de ~90 m.

Para a melhor representação da heterogeneidade do uso do solo pelo modelo WRF nas escalas mais pequenas, os dados de uso do solo predefinidos no modelo, dados do USGS (USGS de 24 categorias – U.S. Geographical Service), com resolução de 1 km, foram substituídos pelos do CORINE 2012 (CLC 2012 - Coordination of Information on the Environment Land Cover) da Agência Europeia do Ambiente (AEA), com 100 m de resolução e 44 categorias de uso do solo.

Este procedimento obrigou à reclassificação das 44 classes de uso do solo do CLC2012 para a nomenclatura de classificação do USGS. A representação do uso do solo no modelo WRF para o domínio D-5 é mostrada na **Figura 4** e a da topografia é mostrada na **Figura 3**.

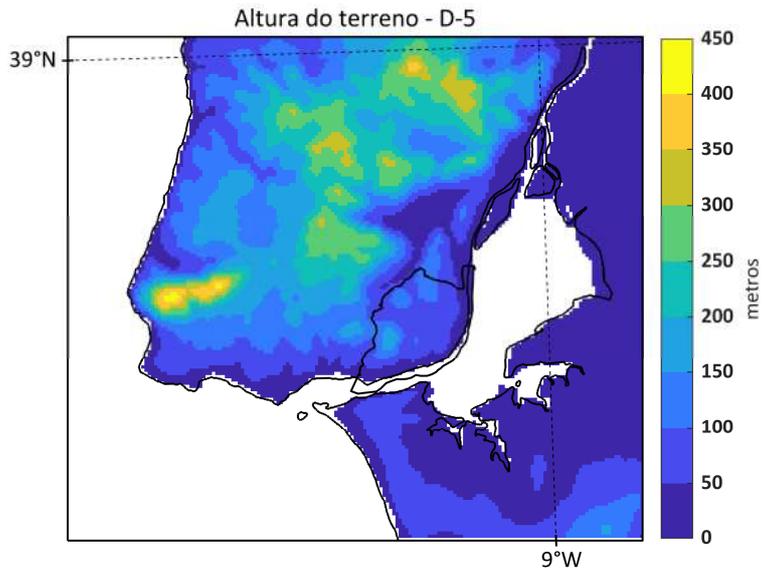


Figura 3. Mapa da topografia no domínio D-5.

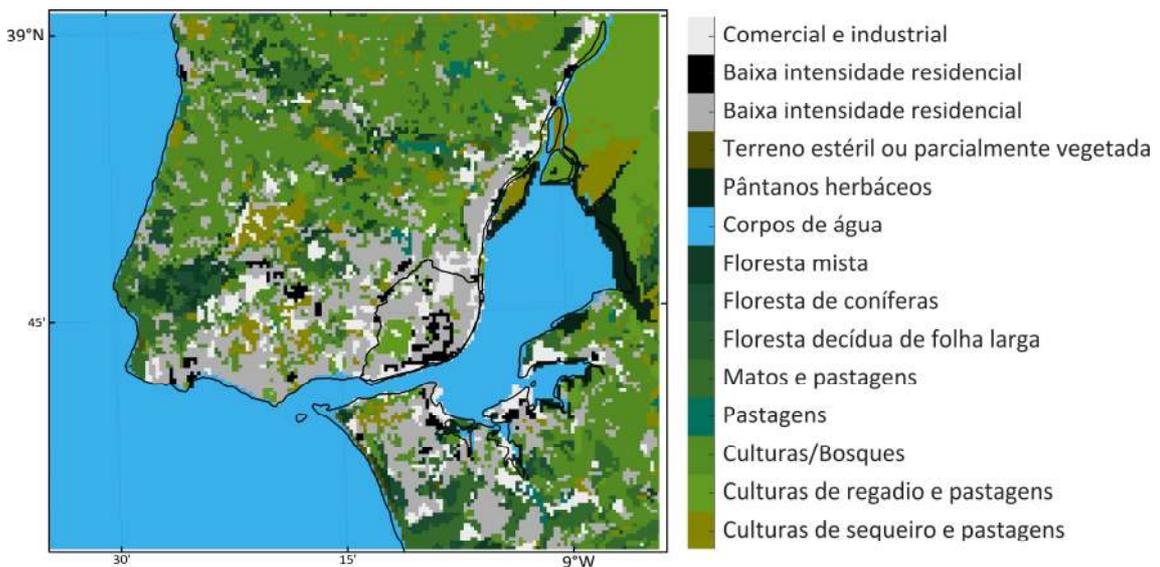


Figura 4. Mapa de uso do solo CORINE 2012 no D-5 reclassificado para as categorias USGS33.

Apesar dos dados de uso do solo definidos no modelo serem do USGS24, o modelo WRF consegue identificar categorias do USGS33 (com 33 categorias). O USGS 33 dispõe de três tipos de superfícies urbanas (Baixa densidade residencial, alta densidade residencial, comercial e industrial) ao invés de uma só categoria disponível nos dados USGS24. Assim, foi possível obter um maior detalhe e diferenciação das diferentes

classes urbanas, relativamente à classificação USGS24. As equivalências usadas no processo de reclassificação encontram-se descritas na Tabela 3 do relatório da fase 2.

Na **Tabela 7** são mostrados os principais parâmetros geométricos atribuídos às diferentes categorias urbanas de uso do solo para cada um dos modelos de canópia urbana. Apenas o modelo BEP permite a distribuição das alturas dos edifícios em percentagem de ocupação.

Tabela 7. Parâmetros geométricos atribuídos às diferentes categorias urbanas de uso do solo dentro do modelo WRF, nos modelos de canópia urbana SLUCM e BEP.

Caraterística	Classe urbana	Modelo urbano	
		SLUCM	BEP
Altura dos edifícios (m)	Baixa intensidade residencial (31)	10	5 (15%)
			10 (70%)
			15 (15%)
	Alta intensidade residencial (32)	15	10 (20%)
			15 (60%)
			20 (20%)
Comercial e industrial (33)	24	15 (10%)	
		20 (25%)	
		25 (40%)	
		30 (25%)	
Largura dos telhados (m)	31	8.3	
	32	9.4	
	33	10	
Largura das ruas (m)	31	8.3	
	32	9.4	
	33	10	
Fração de vegetação (%)	31	50	
	32	10	
	33	5	

3.2.3. Experiências de simulação

Com o intuito de se testar a influência do uso dos diferentes UCM ou da substituição das classes urbanas de uso do solo por classes rurais, procedeu-se à execução de várias experiências de simulação sumarizadas na **Tabela 8**. As iniciais URB, NURB e CTRL, representam simulações com UCM e categorias de uso de solo urbanas, com UCM e sem categorias de uso do solo urbanas, e de controle (i.e., sem UCM), respetivamente. O número que se segue às iniciais representa o número de níveis verticais de cada simulação.

Nas simulações NURB as classes de uso do solo urbanas (alta intensidade residencial, baixa intensidade residencial, comercial e industrial) foram substituídas pela classe “culturas ou bosques” (categoria 6 do USGS - ver Tabela 3 do relatório da fase 2).

Tabela 8. Sumário das experiências de simulação WRF realizadas para o estudo a ICU da cidade de Lisboa.

Nome da simulação	Níveis verticais	Parametrização urbana	Categorias urbanas de uso do solo
URB46		Sim (SLUCM)	Sim
CTRL46	46	não	Sim
NURB46		Sim (SLUCM)	Não
URB49		Sim (BEP)	Sim
CTRL49	49	não	Sim
NURB49		Sim (BEP)	Não

3.2.4. Dados de observações

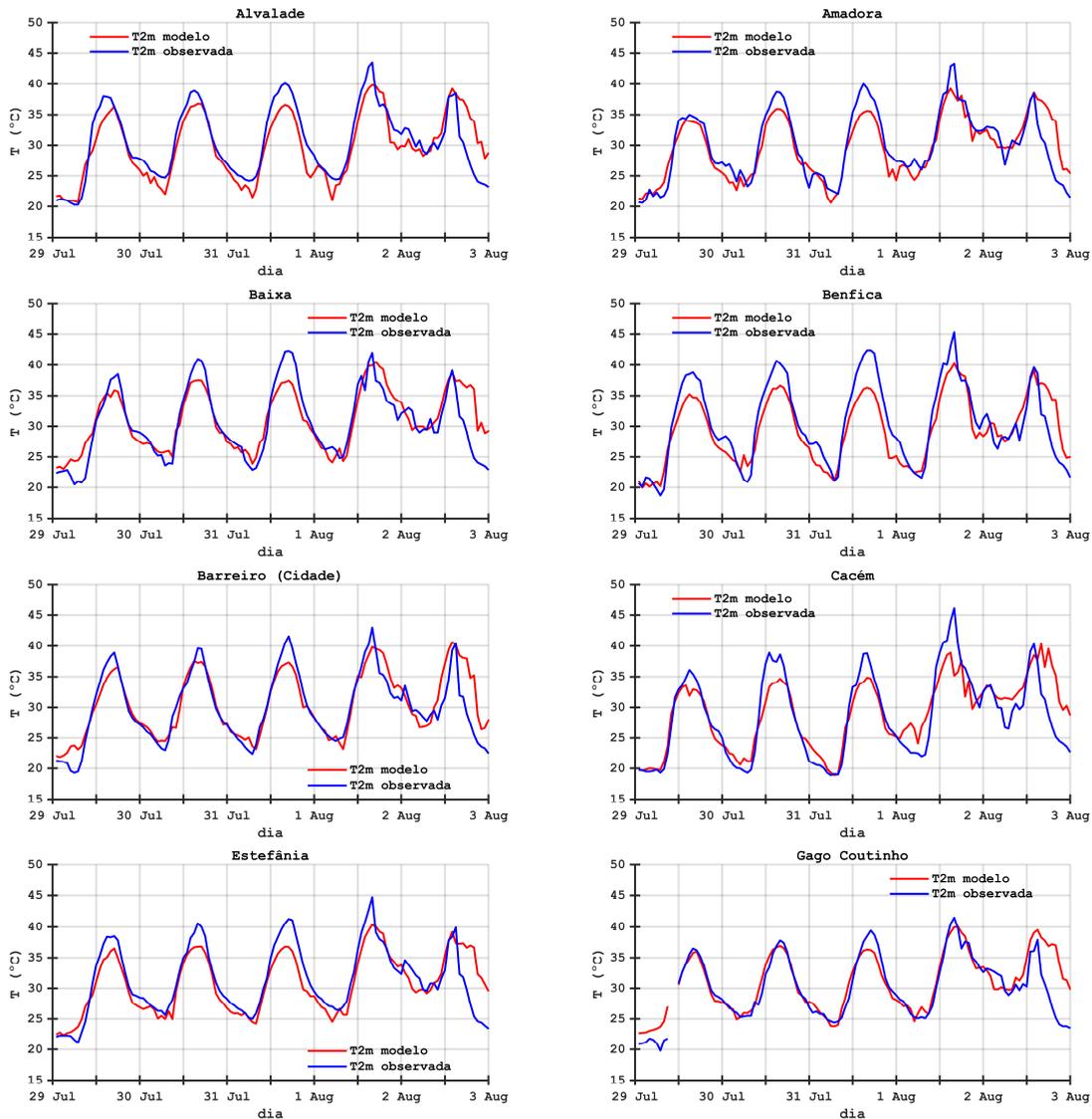
Para a validação dos resultados do modelo nas diferentes experiências de simulação, foram utilizados dados médios horários da temperatura a 2 metros, fornecidos IPMA. Na **Tabela 9** é mostrado o número de identificação de cada estação, localização, altitude, bem como as coordenadas cartesianas do ponto do modelo mais próximo de cada uma das estações.

Tabela 9. Estações meteorológicas do IPMA com respetivas coordenadas geográficas, altitude, e coordenadas nos pontos do modelo.

Nº	Estação	ID	Latitude (°)	Longitude (°)	Ponto do domínio D-5		Altitude (m)
					x	y	
1	Lisboa/Alvalade	01240921	38,75614722	-9,14462778	113	73	90
2	Amadora	01240935	38,75757778	-9,24244167	87	73	143
3	Lisboa/Baixa	01240925	38,71093333	-9,13405556	116	58	8
4	Lisboa/Benfica	01240931	38,74885278	-9,19946944	98	70	75
5	Barreiro (cidade)	01240928	38,65435000	-9,06719722	134	40	15
6	Cacém	01240936	38,76960833	-9,29948611	72	77	124
7	Lisboa/Estefânia	01240924	38,72952222	-9,14332222	113	64	79
8	Lisboa/Gago Coutinho	01200579	38,76620278	-9,12749444	117	77	104
9	Lisboa/Geofísico	01200535	38,71907778	-9,14972222	112	61	77

Nas **Figura 5** e **Figura 6** são mostrados os gráficos da comparação entre a temperatura a 2 metros simulada (simulações URB46 e URB49, respetivamente) e observada nas nove estações meteorológicas da **Tabela 9**. A análise das **Figura 5** e **Figura 6** permite

verificar uma boa concordância entre a temperatura a 2 metros observada e modelada nas diferentes estações meteorológicas do IPMA e para as simulações com modelo de canóia urbana simples e multicamada. A análise estatística e medidas de erro associadas a cada simulação e estação meteorológica podem ser consultados no relatório da fase 2.



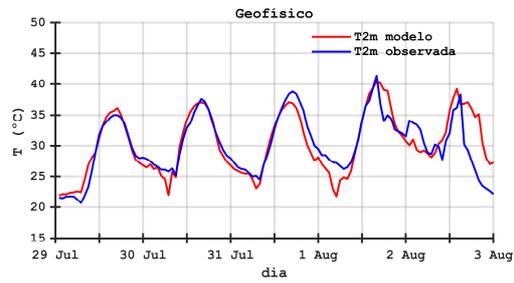


Figura 5. Comparação para o período de HW entre a temperatura a 2 metros obtida com a simulação URB46 e a observada nas estações do IPMA descritas na Tabela 9.

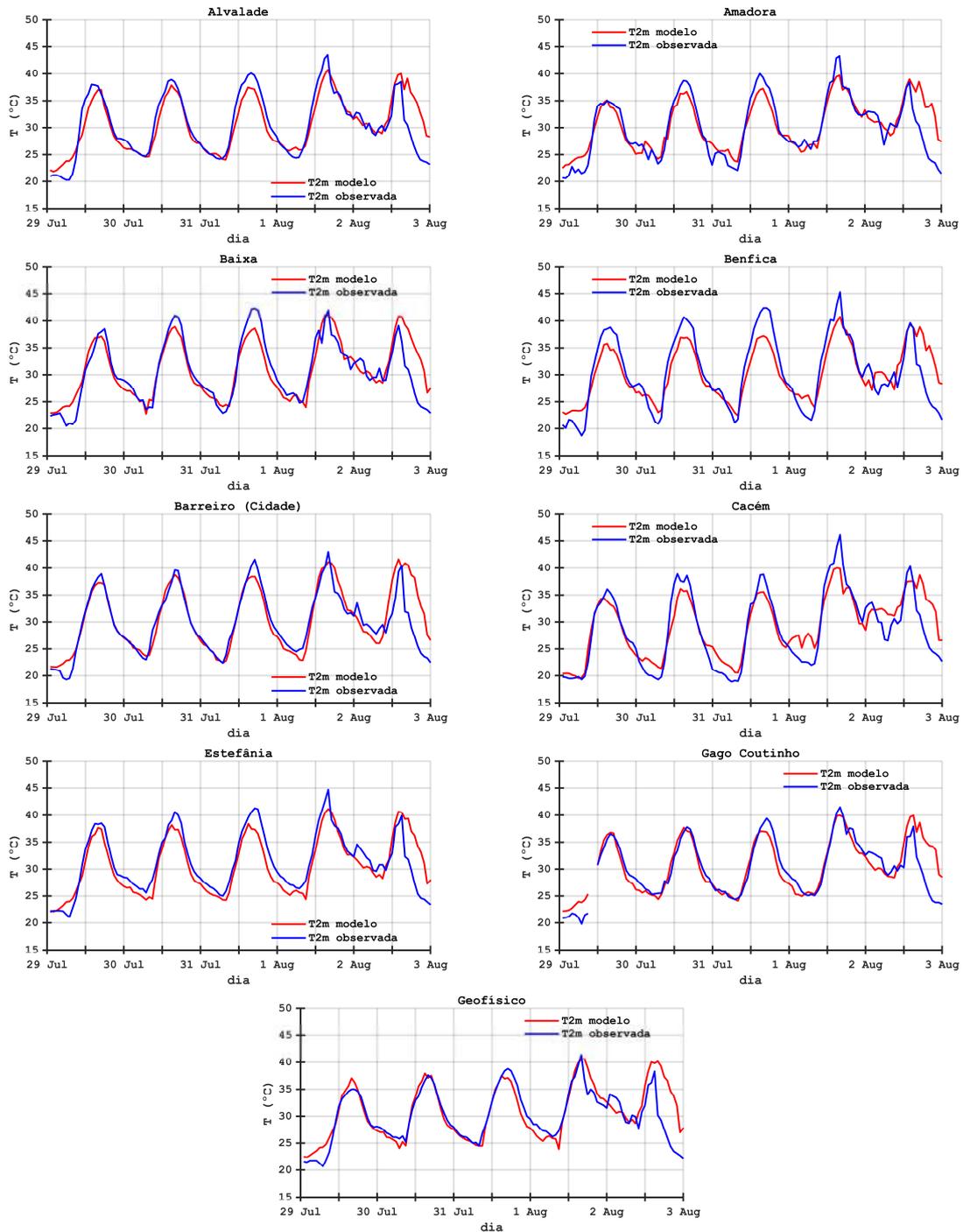


Figura 6. O mesmo que a Figura 5, mas para a simulação URB49.

3.2.5. Validação das simulações numéricas

Para averiguar qual a melhor configuração do modelo para o estudo da ICU na AML, fez-se uma análise estatística e das medidas de erro referentes a cada uma das experiências de simulação, por comparação da temperatura a 2 metros modelada com a observada nas nove estações do IPMA. As estatísticas e medidas de erro foram calculadas com base nos trabalhos de Keyser e Anthes (1977), e Pielke (2002).

Esta última análise permitiu perceber uma melhoria nas estatísticas e medidas de erro relativas à temperatura a 2 metros quando são usados os modelos de canópia urbana. Os dois modelos têm uma performance semelhante quando comparados com os dados de observações, mas toda a análise e resultados do relatório da fase 2 centra-se nas simulações com o modelo SLUCM.

3.2.6. Avaliação da Ilha de Calor Urbano

Na avaliação e análise da ICU consideram-se duas metodologias distintas:

Método 1 - Avaliação clássica da ICU: através da comparação da média da temperatura (a 2 metros ou da superfície) nos pontos urbanos e rurais, ou através da comparação da temperatura de cada ponto urbano com a média da temperatura de todos os pontos rurais do domínio D-5. A ICU avaliada em cada ponto tem contribuição de dois fatores, nomeadamente, a localização, topografia, e o tipo de superfície (urbano ou rural). Este método é aplicado porque permite a comparação com outros estudos previamente realizados e que utilizam esta definição de ICU. No entanto, o método não permite avaliar exclusivamente a contribuição do tipo de superfície (urbano/não urbano) num determinado local urbano.

Método 2 - Avaliação local da ICU: através da comparação da temperatura de cada ponto urbano no caso em que o ponto está ocupado por classes urbanas e no caso em que está ocupado por classes rurais. Este método permite avaliar a ICU em cada ponto e depende exclusivamente do tipo de superfície (urbano ou

rural). Ou seja, permite comparar a temperatura de um local urbano com a temperatura do mesmo local se o mesmo fosse não urbano.

3.3. Principais conclusões da fase 2

Considerando a análise das simulações da ICU durante a HW de agosto de 2003 (clima atual), podemos retirar as seguintes conclusões (para ML e AML) usando o modelo SLUCM:

- A ICU em Lisboa é altamente condicionada por fatores locais, nomeadamente a topografia, e presença do Oceano Atlântico a oeste e estuário do Tejo a sul e oeste da cidade;
- Para além dos fatores locais, a ICU é também influenciada pelas condições sinóticas do vento, que juntamente com a turbulência nos níveis mais baixos da camada limite planetária pode transportar o excesso de temperatura (advecção de temperatura) sobre a cidade para regiões na direção contrária ao mesmo, diminuindo assim a temperatura local;
- A avaliação da intensidade da ICU aplicando dois métodos distintos – método clássico e método local – mostrou resultados coerentes entre as duas abordagens, mas com intensidades diferentes. No entanto, os dois métodos mostram que para este episódio de HW a ICU é um fenómeno noturno, uma vez que durante o dia as temperaturas (a 2 metros e da superfície) nos pontos urbanos são inferiores às dos pontos rurais, exceto quando se compara a temperatura a 2 metros nos pontos urbanos do ML com a média dos pontos rurais no domínio D-5. Neste último caso, é possível concluir-se que a média da temperatura urbana no ML é superior à média da temperatura urbana em todo o domínio D-5;
- A intensidade da ICU obtida pelo método clássico foi superior à do método local, tanto nos perfis do ciclo diário como nos campos médios e máximos absolutos temporais;

- Para a ICU noturna, contribuíram com maior intensidade absoluta (i.e., independentemente da área que ocupam) as classes de alta intensidade residencial e a classe comercial e industrial;
- A classe de baixa intensidade residencial é aquela que teve menor impacto na ICU noturna e é também a que mais contribuiu para a “ilha de frio” verificada nos pontos urbanos durante o período diurno desta HW;
- Na avaliação pelo método clássico, obtiveram-se valores para a temperatura a 2 metros e da superfície $\sim 2^{\circ}\text{C}$ e $\sim 3^{\circ}\text{C}$ superiores à rural, respetivamente, enquanto pelo método local estes valores foram de $\sim 0.7^{\circ}\text{C}$ e $\sim 2^{\circ}\text{C}$;
- Nas classes de alta intensidade residencial, e comercial e industrial a temperatura da superfície foi em média, em alguns pontos, 6°C superior (3.5°C para a temperatura a 2 metros) à rural, segundo o método de avaliação clássico;
- Durante o período diurno, todas as classes urbanas apresentaram valores inferiores aos rurais, com diferenças semelhantes e de sinal contrário às do período noturno. Para o método de avaliação local, estes valores foram em relação ao método clássico cerca de 1°C e 2°C na temperatura a 2 metros e da superfície, respetivamente;
- As diferenças noturnas e diurnas entre as temperaturas dos pontos urbanos e rurais devem-se à maior capacidade térmica das superfícies e materiais urbanos, que no balanço dos fluxos de calor sensível usando o método local, mostram valores diurnos menores na simulação em que as classes urbanas estão presentes do que na simulação em que estas foram removidas;
- Durante a noite, como seria de esperar, o excesso de calor acumulado nas zonas urbanas é libertado levando à formação da ICU noturna. Na simulação com as classes urbanas de uso do solo, os fluxos de calor latente são superiores aos da simulação em que as classes urbanas foram removidas, mas isso deve-se apenas à classe de baixa intensidade residencial, sendo esta classe a única a mostrar uma diferença positiva relativamente à simulação NURB46; as restantes classes, contribuem para a diminuição dos fluxos de calor latente;

- A comparação da altura da camada limite planetária das simulações URB46 e NURB46 para um ponto do domínio pertencente à classe comercial e industrial, mostra que a presença desta classe urbana diminui a altura da camada limite. O mesmo acontece para outros pontos e classes urbana. Isto deve-se à menor contribuição da temperatura sobre a cidade para a geração de energia cinética turbulenta;
- A energia cinética turbulenta aumenta durante o período noturno quando as classes urbanas estão presentes, sendo que o contrário ocorre durante o período noturno;
- Por fim, nos perfis da temperatura potencial não se verificam diferenças significativas na estabilidade atmosférica entre as duas simulações em análise.

3.4. Comparação com outros estudos existentes

Para a comparação dos resultados e conclusões deste trabalho com outros estudos existentes, o leitor é remetido para a secção 4.4 deste documento.

4. Fase 3: Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano na Área Metropolitana de Lisboa para o Clima Futuro

4.1. Enquadramento do estudo

A urbanização modifica o balanço energético e hidrológico à superfície, gerando impactos climáticos locais e regionais.

No seguimento do relatório da fase 2, “Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano para o Clima Atual na AML”, o estudo da fase 3 teve como principal objetivo a avaliação da ilha de calor urbano (ICU) em Lisboa para cenários futuros tendo em conta a evolução espectável da cidade dentro dos limites do Concelho, através da inclusão no uso do solo das áreas urbanas a consolidar até 2050 e 2100. Para além da evolução espectável da cidade, o estudo considera ainda os efeitos do calor antropogénico e da irrigação na fração verde das classes urbanas de uso do solo. Deste modo, procedeu-se à realização de simulações com o modelo WRF acoplado ao modelo de canópia urbana SLUCM para dois períodos de HW identificados nas simulações climáticas do clima atual recente (**HIST** – 1986-2005) e do cenário climático a longo prazo (**LONG** – 2081-2100). Neste relatório não se considerou o período climático MED, porque se pretendia avaliar a ICU num cenário futuro de temperatura mais extrema, tornando a inclusão desse período redundante. Todas as simulações foram forçadas por dados do modelo climático global MPI-ESM-LR (*Max Planck Institute Earth System Model – Low Resolution*) e usaram a mesma configuração de domínios o estudo da fase 2.

4.2. Simulações, dados e metodologia de base

4.2.1. Simulações

Como condições iniciais e de fronteira, forçou-se o modelo WRF a cada 6 horas com dados do modelo climático global, MPI-ESM-LR, do Instituto Meteorológico Max-Plank (dados disponíveis em: <https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/cersearch/q>). Os dados correspondem à inicialização r1i1p1 e cenário RCP8.5 (Representative Concentration Pathways) Russo et al. (2014), com 1.9° de resolução horizontal e 47 níveis híbridos pressão-sigma Giorgetta et al. (2013).

Os parâmetros térmicos, dinâmicos, altura e largura dos edifícios, largura das ruas e edifícios associados ao modelo SLUCM, também são os mesmos definidos no estudo da fase 2.

4.2.2. Calor antropogénico

No modelo de canópia urbana SLUCM está disponível a opção de inclusão do efeito do calor antropogénico no cálculo do balanço energético da superfície.

Segundo Sailor and Lu (2004), a magnitude do calor antropogénico, Q_f , pode ser dividida em três componentes que representam as maiores fontes de libertação de calor em ambientes urbanos:

$$Q_f = Q_V + Q_E + Q_M$$

Onde os índices na equação anterior correspondem a veículos (V), edifícios (E), e metabolismo humano (M).

Neste estudo foi usada a metodologia de Sailor et al. (2016), baseada na densidade de população, para calcular cada uma das componentes do calor antropogénico. O cálculo destas componentes e os valores do calor antropogénico em Lisboa são explicados em detalhe no relatório deste estudo, nas secções 2.1 e 2.2.

A cada classe urbana de uso do solo (i.e., baixa intensidade residencial, alta intensidade residencial, e comercial ou industrial) corresponde uma fração do calor

antropogénico total, Q_{fmax} (em unidades de $W m^{-2}$), que serviu como fator de multiplicação para o perfil adimensional horário mostrado na **Figura 7** e que corresponde ao máximo da curva negra da **Figura 8**.

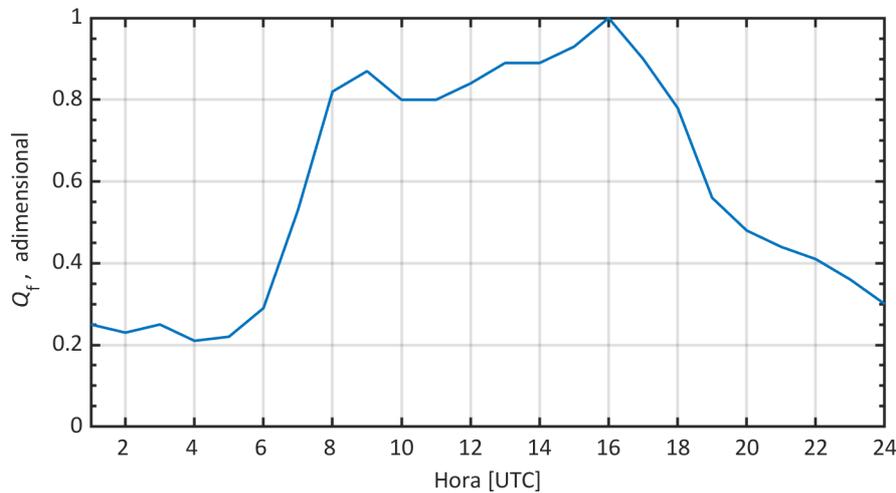


Figura 7. Perfil diário adimensional, da fração horária do calor antropogénico.

Para a densidade de população na região do domínio D-5, assumiu-se o valor constante de $\rho_{população} = 5062 \text{ hab km}^{-2}$ (INE, IGP 2018), isto porque o modelo WRF calcula os fluxos de calor antropogénico apenas para as células classificadas como urbanas. Uma vez que na região do ML a maior parte da área está ocupada por classes urbanas de uso do solo, assumiu-se que o valor de densidade de população nas restantes células urbanas do domínio D-5 é a mesma que a do ML. É também de realçar que não se consideraram variações diurnas de densidade de população dentro de cada uma das células urbanas e que o seu valor não varia entre as três classes urbanas de uso do solo. Os perfis associados a cada uma das componentes do calor antropogénico e ao calor antropogénico total para a cidade de Lisboa são mostrados na **Figura 8**.

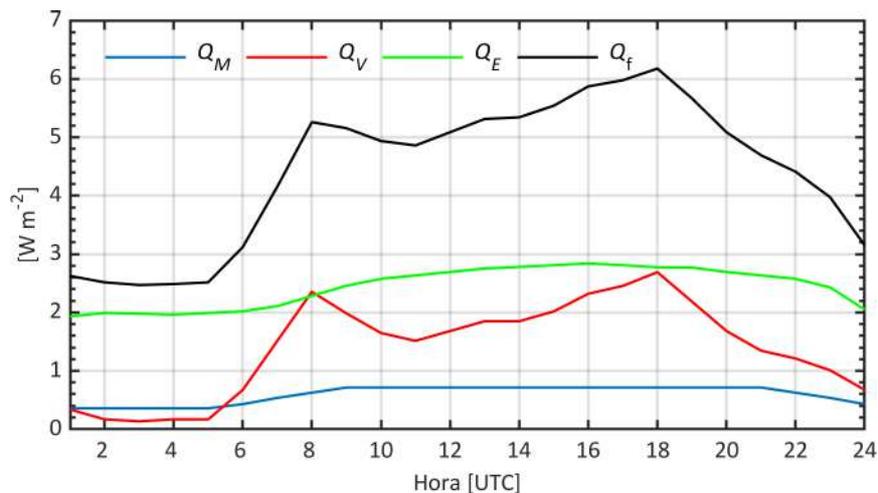


Figura 8. Perfis do ciclo diário calor de origem antropogénica devido ao metabolismo humano (curva azul), veículos (curva vermelha), consumo elétrico (curva verde), e o calor antropogénico total (curva negra) considerado como entrada no modelo de canópia urbana. Unidades: $W m^{-2}$.

O valor máximo diário de $Q_f = 6.2 W m^{-2}$ (i.e., Q_{fmax}), foi usado em cada uma das classes urbanas de uso do solo e multiplicado pelo perfil adimensional da **Figura 7** para se obter o ciclo diário do calor antropogénico total.

4.2.3. Esquema de irrigação

Durante o período de verão é comum o uso de irrigação nos espaços verdes urbanos. Para além dos benefícios que esta prática traz para a manutenção destes espaços, ela contribui para um aumento do arrefecimento evaporativo junto à superfície e, consequentemente, para uma maior eficiência energética dos edifícios adjacentes.

O modelo de canópia urbana SLUCM inclui a opção para irrigação da vegetação e telhados verdes na fração verde das áreas urbanas durante os meses de maio a setembro, todos os dias, entre as 21 e as 22 UTC Shiguang and Fei (2014). No modelo, o efeito da irrigação é reproduzido através da introdução de humidade no primeiro metro de profundidade do solo, até que se atinja a capacidade de campo. Deste modo, a opção de irrigação nos espaços verdes urbanos foi considerada neste estudo.

4.2.4. Projeções da cidade futura

Para a inclusão das áreas urbanas a consolidar até 2050 e 2100 nos dados de uso do solo do modelo WRF, as *shapefiles* das áreas a consolidar em cada período, fornecidas

pela CML, foram projetadas para o sistema de coordenadas do modelo (WGS84) e convertidas para o formato *ascii* com tamanho do pixel igual ao dos dados do CORINE 2012 (~100 m de resolução).

Os pixels dos ficheiros *ascii* das áreas a consolidar até 2050 e 2100 classificados como *Espaços Centrais e Residenciais* foram reclassificados para a categoria 32 do sistema de classificação interna do modelo WRF (categorias do USGS), que corresponde à classe de *Alta Intensidade Residencial*. Pixels classificados como *Espaços de Atividades Económicas* e de *Uso Especial de Equipamentos* foram reclassificados para a classe 33 do sistema de classificação do USGS, correspondente à classe *Comercial ou Industrial*.

Após a conversão e reclassificação dos ficheiros *ascii* das áreas urbanas a consolidar, estes ficheiros foram sobrepostos ao ficheiro *ascii* com os dados do CORINE 2012. Os pixels do ficheiro CORINE coincidentes com o das áreas a consolidar foram reclassificados para as categorias dos ficheiros com as áreas a consolidar.

Criaram-se dois ficheiros distintos: o primeiro ficheiro inclui as áreas a consolidar até 2050, e o segundo ficheiro inclui as áreas a consolidar até 2100. Os ficheiros *ascii* resultantes, foram convertidos em formato binário para serem lidos e interpolados para a grelha dos domínios do modelo WRF.

Na **Figura 9a)** é mostrado o ortofotomapa do Concelho de Lisboa na atualidade; b) e c), as *shapefiles* das áreas urbanas a consolidar até 2050 e 2100 no ML; d), e), e f), a representação na grelha do domínio D05 do uso do solo atual considerando as áreas a consolidar em b), e as áreas a consolidar em c), respetivamente.

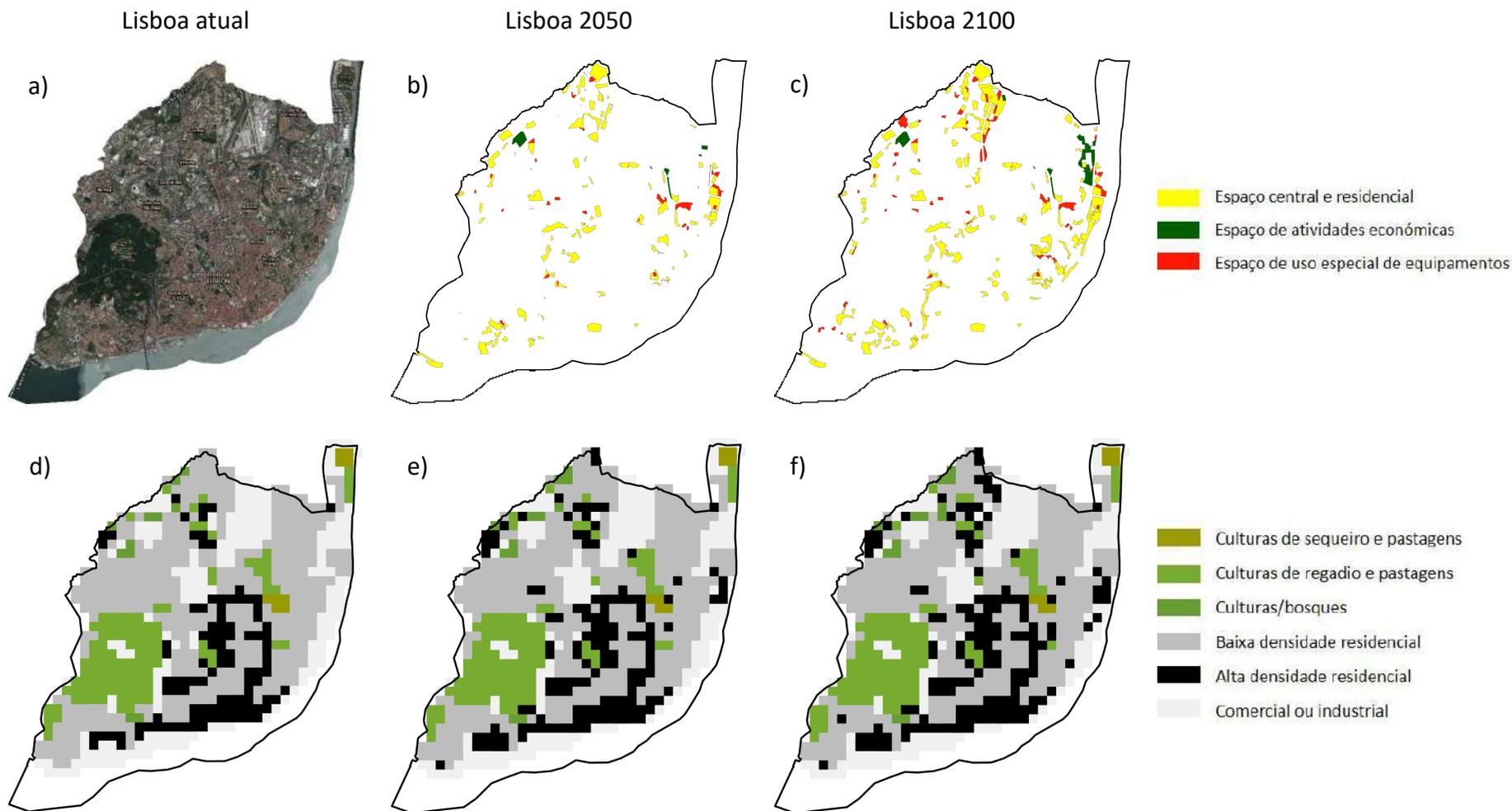


Figura 9. a) Ortofotomapa do Município de Lisboa atual; b) e c), áreas a urbanas a consolidar (evolução espectável) até 2100, respetivamente; d), e), e f), representação do uso do solo do Corine 2012 (d) e a sua atualização tendo em conta as áreas da cidade a consolidar até 2050 (e) e 2100 (f) na grelha de 333 m do modelo WRF. Espaços Centrais e Residenciais das figuras b) e c), foram reclassificados para Alta Intensidade Residencial nas figuras e) e f); Espaços de Atividades Económicas e de Uso Especial de Equipamentos foram reclassificados para a classe Comercial ou Industrial do Corine 2012. As áreas a branco dentro dos limites do ML correspondem a zonas pertencentes ao Domínio Público Hídrico.

4.2.5. Experiências de simulação

As simulações WRF do estudo da fase 3 correspondem a 2 períodos de HW distintos: um para uma HW típica do período HIST com 4 dias de duração, e outra para o período LONG, que corresponde à HW mais intensa identificada nas simulações climáticas deste período.

Os períodos de simulação e de HW simulados são descritos na **Tabela 10**, bem como as opções de uso do solo, calor antropogénico e esquema de irrigação utilizados. Os períodos de simulação indicados na **Tabela 10** incluem um intervalo de 24 horas de “spin-up” do modelo que foi descartado da análise.

Tabela 10. Sumário das experiências de simulação realizadas. ¹Categorias urbanas de uso do solo substituídas pela categoria 6 do USGS (Culturas/Bosques).

Nome da simulação	Período de simulação/ () Período de HW	Categorias urbanas de uso do solo	Calor antropogénico	Esquema de irrigação
NURB_HIST	00 UTC de 17(18)/06/2000 - 00 UTC de 22/06/2000	Não ¹	Não	Não
URB_HIST_1	00 UTC de 17(18)/06/2000 - 00 UTC de 22/06/2000	Sim (Lisboa atual)	Não	Não
URB_HIST_2	00 UTC de 17(18)/06/2000 - 00 UTC de 22/06/2000	Sim (Lisboa atual)	Sim	Sim
URB2050_HIST	00 UTC de 17(18)/06/2000 - 00 UTC de 22/06/2000	Sim (Lisboa 2050)	Sim	Sim
URB2100_HIST	00 UTC de 17(18)/06/2000 - 00 UTC de 22/06/2000	Sim (Lisboa 2100)	Sim	Sim

NURB_FUT	00 UTC de 09(10)/07/2098 - 00 UTC de 20/07/2098	Não ¹	Não	Não
URB2100_FUT	00 UTC de 09(10)/07/2098 - 00 UTC de 20/07/2098	Sim (Lisboa 2100)	Sim	Sim

As simulações da HW do período HIST serviram para estudar o impacto na intensidade da ICU resultante do crescimento da cidade, calor antropogénico, e irrigação na fração verde das classes urbanas de uso do solo.

As simulações não consideraram eventuais alterações demográficas, de tráfego e de avanço/recuo dos corpos de água circundantes ao município, que possam ocorrer no futuro.

Seguindo o **Método 2** de avaliação da ICU do relatório da fase 2 e com base nas simulações descritas na **Tabela 10**, definem-se os seguintes campos de ICU e o que se pretendeu com a análise de cada um deles:

- **ICU1_HIST** (diferença entre os pontos urbanos da simulação URB_HIST_1 e NURB_HIST) – permitiu estudar o impacto da cidade atual sem considerar os efeitos da introdução do calor antropogénico e do esquema de irrigação.;
- **ICU2_HIST** (diferença entre os pontos urbanos da simulação URB_HIST_2 e NURB_HIST) – permitiu avaliar impacto conjunto do calor antropogénico e do esquema de irrigação na ICU;
- **ICU3_HIST** (diferença entre os pontos urbanos da simulação URB2050_HIST e NURB_HIST) – permitiu avaliar o impacto que a introdução das áreas a consolidar até 2050 no ML tem na intensidade e distribuição da ICU;
- **ICU4_HIST** (diferença entre os pontos urbanos da simulação URB2100_HIST e NURB_HIST) – permitiu avaliar o impacto que a introdução das áreas a consolidar até 2100 no ML tem na intensidade e distribuição da ICU;
- **ICU_FUT** (diferença entre os pontos urbanos da simulação URB2100_FUT e NURB_FUT) – permitiu comparar com a ICU4_HIST e estabelecer a relação entre a variação de intensidade da HW e a intensidade da ICU.

Nas **Tabela 11** e **Tabela 12** é mostrado um sumário das intensidades das diferentes ICUs obtidas para a temperatura a 2 metros e da superfície, respetivamente. É também mostrado o aumento relativo entre cada uma das ICUs, para aceder ao impacto da introdução do crescimento da cidade, calor antropogénico, e irrigação dos espaços verdes urbanos.

Tabela 11. Sumário das intensidades das diferentes ICUs obtidas para a temperatura a 2 metros. ΔT_D e ΔT_N representam a variação de temperatura relativa à média da ICU diurna e noturna anterior, respetivamente. Unidades: °C.

ICU	Média diurna	ΔT_D	Média noturna	ΔT_N	Total		
					Mínimo	Média	Máximo
ICU1_HIST	0.54	-	1.39	-	0.22	0.96	1.78
ICU2_HIST	0.58	0.04	1.26	-0.13	0.32	0.92	1.62
ICU3_HIST	0.48	-0.1	1.33	0.07	0.16	0.90	1.99
ICU4_HIST	0.60	0.12	1.74	0.41	0.29	1.17	2.34
ICU_FUT	0.27	-	1.03	-	0.02	0.65	1.32

Tabela 12. O mesmo que a Tabela 11, mas para as ICUs obtidas a partir da temperatura da superfície. Unidades: °C.

ICU	Média diurna	ΔT_D	Média noturna	ΔT_N	Total		
					Mínimo	Média	Máximo
ICU1_HIST	2.58	-	3.65	-	1.63	3.11	3.95
ICU2_HIST	2.89	0.31	3.61	-0.04	2.35	3.25	3.88
ICU3_HIST	2.75	-0.14	3.71	0.10	2.22	3.23	4.26
ICU4_HIST	3.06	0.31	4.11	0.40	2.56	3.59	4.64
ICU_FUT	2.01	-	3.58	-	1.27	2.80	3.90

Nas **Tabela 13** e **Tabela 14** é mostrada a decomposição das ICUs das **Tabela 11** e **Tabela 12** nas diferentes classes urbanas de uso do solo.

Tabela 13. Sumário da decomposição das diferentes ICUs obtidas a partir da temperatura a 2 metros, para as várias classes de uso do solo urbanas. Unidades (°C).

ICU	Baixa Intensidade Residencial		Alta Intensidade Residencial		Comercial/Industrial	
	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna
ICU1_HIST	0.34	0.75	0.60	2.47	0.49	2.49
ICU2_HIST	0.40	0.62	0.67	2.28	0.55	2.28
ICU3_HIST	0.31	0.59	0.62	2.44	0.49	2.50
ICU4_HIST	0.41	0.79	0.73	2.77	0.61	2.84
ICU_FUT	0.10	0.14	0.36	2.24	0.25	2.43

Tabela 14. O mesmo que a **Tabela 13**, mas referente às ICUs obtidas a partir da temperatura da superfície. Unidades °C.

ICU	Baixa Intensidade Residencial		Alta Intensidade Residencial		Comercial/Industrial	
	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna
ICU1_HIST	1.90	2.37	4.70	5.19	4.42	5.51
ICU2_HIST	2.17	2.31	5.06	5.13	4.77	5.44
ICU3_HIST	1.97	2.27	4.93	5.27	4.61	5.61
ICU4_HIST	2.09	2.47	5.06	5.57	4.72	5.90
ICU_FUT	0.76	1.81	3.68	5.09	3.35	5.63

4.3. Principais conclusões da fase 3

Neste trabalho avaliaram-se os efeitos do calor antropogénico, irrigação da fração verde nas classes urbanas, alterações ao uso do solo tendo em conta os espaços urbanos a consolidar até 2050 e 2100, e a relação entre a intensidade das HWs com a intensidade e distribuição da ICU no ML. As principais conclusões do relatório são:

- Os efeitos do calor antropogénico na intensidade da ICU no ML são muito reduzidos, porque o calor antropogénico representa uma fração muito pequena de alteração nos fluxos de calor sensível comparativamente ao efeito no calor sensível devido à urbanização;
- A aplicação de irrigação sobre a fração verde das classes urbanas de uso do solo permite um aumento dos fluxos de calor latente equivalente ao aumento do calor sensível gerado por fontes de calor antropogénico, porque o calor sensível é consumido no processo de evapotranspiração;
- A introdução de classes urbanas de alta intensidade residencial e da classe comercial/industrial correspondentes às áreas a consolidar até 2050 gerou um aumento da ICU noturna e diminuição da ICU diurna de amplitude aproximadamente igual. No entanto, os valores máximos de ICU a 2 metros aumentam da ICU1_HIST até à ICU4_HIST;

- A introdução das classes urbanas de uso do solo para as áreas a consolidar até 2100 geraram o maior impacto na ICU, aumentando a sua intensidade nos períodos diurno e noturno. No entanto é a intensidade da ICU do período noturno que mais aumenta;
- Tal como se verificou para a HW do estudo da fase 2, as classes urbanas de uso do solo que mais contribuem para o aumento da ICU à superfície e a 2 metros são as que têm menor percentagem de fração verde;
- O aumento da intensidade da ICU no ML não é diretamente proporcional ao aumento da intensidade da HW, porque para a mesma configuração de simulação a ICU_FUT tem menor intensidade do que a ICU4_HIST (HW mais intensa identificada no período LONG) durante os períodos noturno e diurno. Esta conclusão também pode ser obtida pela comparação dos resultados da ICU da simulação URB46 da HW de 2003 (do relatório da fase 2), com os resultados da ICU1_HIST;
- No seguimento do ponto anterior, um dos fatores que mais influencia a intensidade da ICU no ML é a direção e intensidade média do vento junto à superfície durante os períodos diurno e noturno. Vento do quadrante norte resulta numa diminuição da intensidade da ICU, principalmente nas classes de baixa intensidade residencial, enquanto as simulações com vento médio do quadrante Leste (simulação do período MPI_HIST) têm uma intensidade de ICU maior. Quanto maior é a intensidade do vento, maior é a redução da ICU, principalmente da ICU a 2 metros, porque o excesso de temperatura das zonas urbanas é advetado pelo vento.

4.4. Comparação com outros estudos existentes

A comparação dos resultados e conclusões obtidas nos estudos das fases 2 e 3 com outros estudos está limitada pelos períodos de análise, dados, modelos e metodologias de avaliação usadas. Assim, é difícil a comparação direta com outros estudos. No entanto, alguns aspetos e resultados poderão ser comparados.

Durante os períodos de HW considerados nos estudos da fase 2 e 3, a intensidade da ICU no ML variou de -0.88 a 2.34°C a 2 metros e de -3.61 a 4.6°C à superfície, tendo os valores máximos sido atingidos durante a noite e os valores mínimos durante o dia.

Nas classes de alta intensidade residencial e comercial/industrial, os valores médios de intensidade da ICU chegaram, durante o período noturno, aos 2.8°C a 2 metros e 5 a 6°C à superfície, respetivamente. Durante o período diurno estes valores reduziram-se bastante na temperatura a 2 metros. Estes resultados encontram-se dentro dos intervalos propostos Alcoforado et al. (2005) no relatório “Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa”.

Tal como é referido nesse relatório, durante o dia alternam situações de “ilha de frescura” com ilhas de calor dependendo da HW e do local em causa.

Quanto à distribuição da ICU verifica-se um padrão semelhante ao representado na Figura 3 do relatório (Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa), com o padrão da ICU a assumir forma tentacular, propagando-se ao longo dos principais eixos de crescimento da cidade.

As áreas de maior intensidade da ICU dependem muito das condições do vento, mas são no geral a zona da Baixa e bairros ribeirinhos, mas também a zona do Aeroporto, embora este último seja considerado um dos pontos onde a ICU é menos intensa no estudo de Alcoforado et al. (2005). A origem desta diferença em relação ao Aeroporto é explicada mais abaixo.

As áreas mais frescas são principalmente o parque de Monsanto, os bairros circundantes ao Bairro de Chelas (região de baixa intensidade residencial) e o Parque Eduardo VII – os dois últimos com menor intensidade, devido à menor área de vegetação e aos aspetos locais da topografia.

Nas simulações WRF não se verifica um gradiente térmico da ICU tão acentuado em direção às áreas mais periféricas da cidade como no relatório de Alcoforado et al. (2005), existindo uma notória diminuição da ICU para além dos limites do município.

A presença do estuário do Tejo parece contribuir para a minimização do efeito de ICU junto à superfície quando o vento tem forte componente do quadrante sul ou leste, principalmente nas áreas mais próximas do Tejo. Este é também um aspeto destacado por Alcoforado et al. (2005). No entanto, é também nestas áreas que se verificaram temperaturas mais elevadas, bem como na zona mais urbanizada que se estende da Baixa da cidade até ao Aeroporto.

O vento é assim um dos fatores que mais influência a intensidade e distribuição da ICU. A relação entre os regimes de vento e a intensidade e distribuição da ICU em Lisboa foi estudada em detalhe por Lopes et al. (2013) para o período de 2012 a 2012, através da análise de dados observacionais de uma rede de estações meteorológicas distribuídas pelo município. Segundo Lopes et al. (2013), os regimes de vento típicos durante o verão são em 45% dos dias de norte (“nortada”), e em 30% dos dias de verão ocorrem brisas do estuário do Tejo ou do Oceano.

Tanto a HW de 2003, estudada no relatório da fase 2, como a HW identificada nas simulações climáticas do período LONG (relatório da fase 3), têm presente uma forte componente do vento de norte, com a exceção do período diurno da HW do clima LONG. No caso da HW de 2003, o vento mais intenso (superior a $6 \text{ m s}^{-1} \approx 21 \text{ km h}^{-1}$) do quadrante norte causou a inibição da ICU diurna. Este resultado também está em acordo com o obtido por Lopes et al. (2013) e reforça a importância de se considerar as condições de ventilação da cidade no planeamento urbano, principalmente na parte norte da cidade.

No estudo de Alcoforado et al. (2005) são identificados os principais corredores de ventilação da cidade. Segundo este estudo, um dos principais corredores de ventilação encontra-se na zona do Aeroporto. No entanto, no relatório da fase 2 e 3, parte desta área está identificada nas simulações WRF pela categoria de uso do solo “comercial/industrial”, o que faz com que haja uma sobrestimação da altura média dos edifícios e eliminação deste corredor de ventilação nas simulações. Por outro lado, existe outra região a este do Aeroporto, onde a maior parte do uso do solo é ocupado pela classe de baixa intensidade comercial e que nas simulações com vento do

quadrante norte funciona como corredor de ventilação, enquanto no estudo de Alcoforado et al. (2005) esta região não é considerada corredor de ventilação. No primeiro caso a sobrestimação da altura dos edifícios deve-se à impossibilidade de atribuir diferentes alturas para a mesma classe urbana de uso do solo no modelo SLUCM, enquanto o segundo deve-se à subestimação das percentagens de ocupação atribuídas a cada classe urbana de uso do solo. Por exemplo, no relatório de Alcoforado et al. (2005) a fração de ocupação urbana por classe é:

- Baixa densidade – 10%
- Média densidade – 30%
- Elevada densidade – 50%

Embora a denominação das classificações sejam diferentes, no caso dos estudos da fase 2 e 3 as frações de ocupação urbana por classe são:

- Baixa intensidade residencial – 50%
- Alta intensidade residencial – 90%
- Comercial/Industrial – 95%

No relatório de Alcoforado et al. (2005), as percentagens de ocupação parecem conservadoras, principalmente na zona a este do Aeroporto (classificada como baixa densidade/intensidade), onde a densidade de ocupação urbana parece ser superior a 10%, pela análise de imagens de satélite.

Com o aumento da frequência, intensidade e duração das HWs em cenários climáticos futuros, é espectável um agravamento dos impactos da ICU nos níveis de stress térmico, uma vez que os efeitos cumulativos entre as HWs e a ICU deverão aumentar, principalmente durante o período noturno.

No estudo da fase 2, explorou-se a aplicação de irrigação nos espaços verdes urbanos entre as 21 e as 22 UTC. Os resultados da aplicação deste esquema mostram uma redução significativa da temperatura, equivalente ao aumento de temperatura devido ao calor de origem antropogénica (tráfego, consumo elétrico para aquecimento/arrefecimento, e metabolismo humano). No entanto, os benefícios desta

medida serão maiores nas áreas onde existe maior fração verde. Para além disso, como é referido nos relatórios da fase 1 e 2 da Lisboa E-Nova – Agência de Energia e Ambiente de Lisboa, este tipo de medidas poderá ter implicações negativas relacionadas com a gestão dos recursos hídricos. No entanto, a manutenção dos espaços verdes urbanos depende da irrigação, e por isso, esta é uma medida que serve dois propósitos.

Para as zonas de maior intensidade de urbanização (Alta Intensidade residencial, Comercial/Industrial), a principal medida a tomar para a redução da ICU, seria o aumento da refletividade dos telhados (albedo), quer pelo reduzido svf destas áreas, quer pela limitação em termos de área para espaços verdes. Note-se que os principais parâmetros e propriedades térmicas associadas a cada classe nas simulações WRF são os mesmos, variando apenas a altura dos edifícios, largura das ruas e telhados, tendo estes maior impacto nos aspetos dinâmicos do que nos aspetos térmicos da ICU.

As restantes medidas de redução e mitigação da ICU a aplicar são semelhantes às apresentadas por Alcoforado et al. 2005 (secções 4.2 e 4.3).

5. Referências

Alcoforado, Maria-João, António Lopes, Henrique Andrade, and Joao Vasconcelos. 2005. "Orientações Climáticas Para o Ordenamento Em Lisboa." In .

Amengual, A, V Homar, R Romero, S Alonso, and C Ramis. 2011. "A Statistical Adjustment of Regional Climate Model Outputs to Local Scales: Application to Platja de Palma, Spain." *Journal of Climate* 25 (3): 939–57. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-10-05024.1>.

Desenvolvimento dos registos de variáveis antropogénicas, simulações microclimáticas para 2 áreas críticas atuais e clima atual, com simulação de medidas de mitigação. Relatório da Fase 1 - Lisboa E-Nova - Agência de Energia e Ambiente de Lisboa. 2020.

Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas de Lisboa (EMAAC) 2017

Giorgetta, Marco A, Johann Jungclaus, Christian H Reick, Stephanie Legutke, Michael Bo, Victor Brovkin, Traute Crueger, et al. 2013. "Climate and Carbon Cycle Changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM Simulations for the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5" 5: 572–97. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>.

INE, IGP, PORDATA. 2018. "N.º Médio de Indivíduos Por Km²." 2018. <https://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional-452>.

Keyser, Daniel, and Richard A Anthes. 1977. "The Applicability of a Mixed–Layer Model of the Planetary Boundary Layer to Real-Data Forecasting." *Monthly Weather Review* 105 (11): 1351–71. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<1351:TAOAMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<1351:TAOAMM>2.0.CO;2).

Kusaka, Hiroyuki, and Fujio KIMURA. 2004. *Coupling a Single-Layer Urban Canopy Model with a Simple Atmospheric Model: Impact on Urban Heat Island Simulation for an Idealized Case. Journal of the Meteorological Society of Japan*. Vol. 82. <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.67>.

- Kusaka, Hiroyuki, Hiroaki Kondo, Yokihiko Kikegawa, and Fujio Kimura. 2001. "A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models." *Boundary-Layer Meteorology* 101 (3): 329–58. <https://doi.org/10.1023/A:1019207923078>.
- Lopes, António, Elis Alves, Maria João Alcoforado, and Raquel Machete. 2013. "Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes." Edited by Marialena Nikolopoulou. *Advances in Meteorology* 2013: 487695. <https://doi.org/10.1155/2013/487695>.
- Marta-Almeida, Martinho, João C. Teixeira, Maria J. Carvalho, Paulo Melo-Gonçalves, and Alfredo M. Rocha. 2016. "High Resolution WRF Climatic Simulations for the Iberian Peninsula: Model Validation." *Physics and Chemistry of the Earth* 94: 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.010>.
- Martilli, Alberto, Alain Clappier, and Mathias W Rotach. 2002. "An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models." *Boundary-Layer Meteorology* 104 (2): 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>.
- Moss, Richard, Mustafa Babiker, Sarah Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, James Edmonds, Ismail Elgizouli, et al. 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary. IPCC Expert Meeting Rep.*
- Pielke, R A. 2002. *Mesoscale Meteorological Modeling*. International Geophysics Series. Academic Press. <https://books.google.pt/books?id=hyUEI7NK7bUC>.
- Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas (PMAAC) 2018, Volume I
- Russo, Simone, Alessandro Dosio, Rune G Graversen, Jana Sillmann, Hugo Carrao, Martha B Dunbar, Andrew Singleton, Paolo Montagna, Paulo Barbola, and Jürgen V Vogt. 2014. "Magnitude of Extreme Heat Waves in Present Climate and Their Projection in a Warming World." <https://doi.org/10.1002/2014JD022098>. Received.



- Sailor, David J, Matei Georgescu, Jeffrey M Milne, and Melissa A Hart. 2016. "Development of a National Anthropogenic Heating Database with an Extrapolation for International Cities" 118 (2015): 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.016>.
- Sailor, David J, and Lu Lu. 2004. "A Top – down Methodology for Developing Diurnal and Seasonal Anthropogenic Heating Profiles for Urban Areas" 38: 2737–48. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.034>.
- Shiguang, Miao, and Chen Fei. 2014. "Enhanced Modeling of Latent Heat Flux from Urban Surfaces in the Noah / Single-Layer Urban Canopy Coupled Model" 57 (10): 2408–16. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4829-0>.
- Sillmann, J, V V Kharin, F W Zwiers, X Zhang, and D Bronaugh. 2013. "Climate Extremes Indices in the CMIP5 Multimodel Ensemble: Part 2. Future Climate Projections." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118 (6): 2473–93. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>.
- Simulações microclimáticas para 2 áreas críticas atuais e clima futuro, com simulação de medidas de mitigação. Relatório da Fase 2 - Lisboa E-Nova - Agência de Energia e Ambiente de Lisboa. 2020.