



RELATÓRIO

FASE 3 | DEZEMBRO 2019

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:



Cofinancado 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 3** de acordo com a Cláusula 3.ª e o ponto 3. da Parte II – Especificações Técnicas do respetivo Caderno de Encargos.

Relatório

Fase 3 – Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano para o Clima futuro

Início – 25 de junho de 2019

Fim – 16 de dezembro de 2019

Elaborado por: Alfredo Rocha e Rui Silva

Índice

1. Introdução.....	9
2. Dados e métodos	11
2.1. Calor antropogénico.....	11
a. Metabolismo humano.....	13
b. Edifícios - Calor resultante do consumo elétrico	13
c. Veículos - Calor libertado por veículos.....	14
2.2. Calor antropogénico no modelo WRF.....	15
2.3. Esquema de irrigação.....	17
2.4. Projeções da cidade futura	18
2.5. Experiências de simulação	21
3. Resultados.....	23
3.1. Impacto do calor antropogénico, irrigação e crescimento da cidade na ICU	23
3.2. A ICU para uma HW do futuro longínquo	47
4. Conclusões.....	57
5. Referências.....	59

Lista de Figuras

FIGURA 1. PERFIL DIÁRIO DO CALOR LIBERTADO PELO METABOLISMO HUMANO. UNIDADES: $W\ hab$ — 1. DADOS DO PERFIL DISPONÍVEIS EM: GEOPLAN.ASU.EDU/RESEARCH-AND-OUTREACH/PROJECTS/AHDATA.....	13
FIGURA 2. PERFIL DIÁRIO ADIMENSIONAL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.	14
FIGURA 3. PERFIL HORÁRIO DA FRAÇÃO DE TRÁFEGO.	15
FIGURA 4. PERFIL DIÁRIO ADIMENSIONAL, DA FRAÇÃO HORÁRIA DO CALOR ANTROPOGÉNICO.	15
FIGURA 5- PERFS 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.	16
FIGURA 6 - A) ORTOFOTOMAPA DO MUNICÍPIO DE LISBOA ATUAL; B) E C), ÁREAS A URBANAS A CONSOLIDAR (EVOLUÇÃO ESPECTÁVEL) ATÉ 2100, RESPECTIVAMENTE; 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.....	20
FIGURA 7 — CICLO DIÁRIO DA TEMPERATURA A 2 METROS PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES DA HW DO PERÍODO HIST.	24
FIGURA 8 — O MESMO QUE A FIGURA 7, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	24
FIGURA 9 — CICLO DIÁRIO DAS ICUS DA HW OBTIDAS PARA A TEMPERATURA A 2 METROS.	26
FIGURA 10 — O MESMO QUE A FIGURA 9, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	26
FIGURA 11 — DECOMPOSIÇÃO DO CICLO DIÁRIO DAS DIFERENTES ICUS OBTIDAS COM A TEMPERATURA A 2 METROS, PARA AS DIFERENTES CLASSES URBANAS DE USO DO SOLO.	29
FIGURA 12 - O MESMO QUE A FIGURA 11, MAS PARA A ICU OBTIDA COM A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	30
FIGURA 13 - CAMPOS MÉDIOS E MÁXIMOS ABSOLUTOS TEMPORAIS DA ICU1_HIST E ICU2_HIST PARA A TEMPERATURA A 2 METROS NO MUNICÍPIO DE LISBOA, DURANTE O PERÍODO DIURNO (ESQUERDA) E NOTURNO (DIREITA) DA HW. VALORES APRESENTADOS EM °C. OS CAMPOS DAS MÉDIAS TEMPORAIS TÊM SOBREPOSTOS OS CAMPOS DA MÉDIA TEMPORAL DO VENTO A 10 METROS DA SIMULAÇÃO URBANA EM RELAÇÃO À QUAL SE DETERMINOU A ICU. $5\ m\ s^{-1} = 18\ km\ h^{-1}$	32
FIGURA 14- O MESMO QUE A FIGURA 13, MAS PARA AS ICU3_HIST E ICU4_HIST. $5\ m\ s^{-1} = 18\ km\ h^{-1}$	34
FIGURA 15- O MESMO QUE A FIGURA 13, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE. $5\ m\ s^{-1} = 18\ km\ h^{-1}$	35
FIGURA 16 - O MESMO QUE A FIGURA 14, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE. $5\ m\ s^{-1} = 18\ km\ h^{-1}$	36
FIGURA 17 — CAMPOS MÉDIOS TEMPORAIS DIURNOS E NOTURNOS DAS DIFERENÇAS ENTRE: ICU2_HIST E ICU1_HIST (EM CIMA); ICU3_HIST E ICU3_HIST (NO MEIO); ICU4_HIST E ICU2_HIST (EM BAIXO). VALORES EM °C.	39
FIGURA 18 — O MESMO QUE A FIGURA 17, MAS PARA OS CAMPOS DAS DIFERENÇAS DE ICUS OBTIDAS COM A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.....	40
FIGURA 19 — COMPARAÇÃO ENTRE OS FLUXOS DE CALOR SENSÍVEL (CS), CALOR LATENTE (CL), CALOR DO SOLO (FS), E BALANÇO TOTAL À SUPERFÍCIE (BAL.), DAS SIMULAÇÕES URB2100_HIST E NURB_HIST.	43
FIGURA 20- DIFERENÇAS NO BALANÇO ENERGÉTICO DA SUPERFÍCIE ENTRE AS SIMULAÇÕES URB2100_HIST E NURB_HIST NAS VÁRIAS CLASSES URBANAS DE USO DO SOLO. UNIDADES: Wm^{-2}	46
FIGURA 21 - CICLO DIÁRIO DA TEMPERATURA A 2 METROS PARA AS SIMULAÇÕES DA HW DO PERÍODO MPI-FUT.	48
FIGURA 22 — O MESMO QUE A FIGURA 21, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	48
FIGURA 23 - CICLO DIÁRIO DAS ICU PARA A HW DO FUTURO LONGÍNQUO, OBTIDA PARA A TEMPERATURA A 2 METROS.....	49
FIGURA 24 — O MESMO QUE A FIGURA 23, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	49
FIGURA 25 — DECOMPOSIÇÃO DO CICLO DIÁRIO DA ICU DA HW DO FUTURO LONGÍNQUO, OBTIDA A PARTIR DA TEMPERATURA A 2 METROS, PARA AS DIFERENTES CLASSES URBANAS DE USO DO SOLO.....	51
FIGURA 26 — O MESMO QUE A FIGURA 25, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	52
FIGURA 27 -- CAMPOS MÉDIOS E MÁXIMOS ABSOLUTOS TEMPORAIS DA ICU OBTIDA PARA A HW DO CLIMA FUTURO, OBTIDA A PARTIR DOS CAMPOS DA TEMPERATURA A 2 METROS NO MUNICÍPIO DE LISBOA, DURANTE O PERÍODO DIURNO	

(ESQUERDA) E NOTURNO (DIREITA). VALORES APRESENTADOS EM °C. OS CAMPOS DAS MÉDIAS TEMPORAIS TÊM SOBREPOSTOS OS CAMPOS DA MÉDIA TEMPORAL DO VENTO A 10 METROS DA SIMULAÇÃO URBANA COM A QUAL SE DETERMINOU A ICU. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$ 54

FIGURA 28 - O MESMO QUE A FIGURA 27, MAS PARA A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$ 55

Lista de Tabelas

TABELA 1. SUMÁRIO DAS EXPERIÊNCIAS DE SIMULAÇÃO REALIZADAS. ¹ CATEGORIAS URBANAS DE USO DO SOLO SUBSTITUÍDAS PELA CATEGORIA 6 DO USGS (CULTURAS/BOSQUES).....	21
TABELA 2 – SUMÁRIO DAS INTENSIDADES DAS DIFERENTES ICUS OBTIDAS PARA A TEMPERATURA A 2 METROS. UNIDADES: °C.	26
TABELA 3 – O MESMO QUE A TABELA 2, MAS PARA AS ICUS OBTIDAS A PARTIR DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE. UNIDADES: °C.....	27
TABELA 4 -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)	31
TABELA 5 -O MESMO QUE A TABELA 4, MAS REFERENTE ÀS ICUS OBTIDAS A PARTIR DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE. UNIDADES °C.....	31
TABELA 6 -SUMÁRIO DOS VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DOS FLUXOS DE CALOR SENSÍVEL PARA AS VÁRIAS SIMULAÇÕES DA HW DO PERÍODO MPI-HIST. UNIDADES: $W m^{-2}$	44
TABELA 7 – O MESMO QUE A TABELA 6, MAS PARA OS FLUXOS DE CALOR LATENTE.....	44
TABELA 8 - O MESMO QUE A TABELA 6, MAS PARA OS FLUXOS DE CALOR DO SOLO.	44
TABELA 9 - O MESMO QUE A TABELA 6, MAS PARA OS BALANÇOS RADIATIVOS À SUPERFÍCIE.....	44
TABELA 10 - SUMÁRIO DAS INTENSIDADES DA ICU OBTIDA A PARTIR DA TEMPERATURA A 2 METROS. UNIDADES: °C. VALORES ENTRE PARÊNTESES CORRESPONDEM AOS DADOS DA ICU4_HIST.	49
TABELA 11 – O MESMO QUE A TABELA 10, MAS PARA A ICU OBTIDA A PARTIR DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	49
TABELA 12 - SUMÁRIO DA DECOMPOSIÇÃO DA ICU OBTIDA A PARTIR DA TEMPERATURA A 2 METROS, PARA AS VÁRIAS CLASSES DE USO DO SOLO URBANAS. UNIDADES (°C). VALORES ENTRE PARÊNTESES CORRESPONDEM AOS DADOS DA ICU4_HIST.	52
TABELA 13 – O MESMO QUE A TABELA 13, MAS PARA A ICU OBTIDA A PARTIR DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE.	53



Lista de Acrónimos

AML – Área Metropolitana de Lisboa

HW – Onda de Calor

ICU – Ilha de calor urbano

ML – Município de Lisboa

MPI-ESM-LR – Max Planck Institute - Earth System Model - Low Resolution

RCP - Representative Concentration Pathways

SLUCM – Single-layer urban canopy model

UTC – Tempo universal coordenado

WRF – Weather Research and Forecasting model

1. Introdução

A urbanização modifica o balanço energético e hidrológico à superfície, gerando impactos climáticos locais e regionais (Yang et al. 2015).

Segundo Oke (1987), a libertação de calor por fontes antropogénicas é uma das principais causas do efeito de ICU. O calor de origem antropogénica tem maior impacto na temperatura da canóia urbana, mas os seus efeitos podem estender-se verticalmente em toda a camada limite planetária (Liu and Han 2016). São consideradas como fontes principais de calor antropogénico, o calor libertado pelo metabolismo humano, o calor proveniente dos veículos, e o calor interno dos edifícios - que inclui o calor libertado por equipamentos elétricos (ex.: equipamentos de ar condicionado), bem como o calor proveniente da queima de combustíveis fósseis para aquecimento. A libertação de calor antropogénico, está dependente da densidade populacional, do clima de cada região, da estação do ano e hora do dia.

Usando simulações com o modelo WRF acoplado a um modelo de canóia urbana, Feng et al. (2012), estudou os impactos resultantes de alterações na urbanização, bem como da libertação de calor antropogénico em cinco das regiões mais populosas da China durante um período de dois anos (de dezembro de 2006 a dezembro de 2008). Os resultados mostram que o efeito combinado das alterações na urbanização e do calor antropogénico podem levar a um aumento de temperatura até 2°C em algumas regiões da China, originando uma diminuição do albedo e da humidade do solo consideráveis. Num outro estudo realizado por Yang and Wang (2015), para a cidade de Phoenix, EUA, testou-se o impacto de vários esquemas de irrigação acoplados a um modelo de canóia urbana. O estudo conclui que a aplicação dos diferentes esquemas de irrigação leva ao aumento da humidade disponível para evapotranspiração, e a um aumento da temperatura junto à superfície que pode ultrapassar os 3°C durante o período de verão, comparativamente ao caso em que não é utilizado nenhum esquema de irrigação.

No seguimento do relatório da fase 2, “Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano para o Clima Atual na AML”, o presente trabalho pretende avaliar a ilha de calor urbano (ICU) em Lisboa para cenários futuros tendo em conta a evolução espectável da cidade dentro dos limites do Concelho de Lisboa, 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 de irrigação na fração verde das classes urbanas de uso do solo. Deste modo, procedeu-se à realização de simulações com o modelo

meteorológico WRF v3.9.1 (Weather Research and Forecasting version 3.9.1) para dois períodos de onda de calor (HW) identificados nas simulações climáticas do clima atual recente (**HIST** – 1986-2005) e do cenário climático a longo prazo (**LONG** – 2081-2100). Todas as simulações foram forçadas por dados do modelo climático global MPI-ESM-LR (*Max Planck Institute Earth System Model – Low Resolution*). A simulação para a HW do cenário climático a longo prazo considera o cenário de emissões de gases de efeito de estufa RCP8.5 (Representative Concentration Pathways) (Russo et al. 2014).

2. Dados e métodos

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-Planck (dados disponíveis em: <https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/cersearch/q>). Os dados correspondem à inicialização r1i1p1 e cenário RCP8.5, com 1.9° de resolução horizontal e 47 níveis híbridos pressão-sigma (Giorgetta et al. 2013). A escolha de dados de forçamento para o cenário RCP8.5, prende-se com o facto de este ser o mais extremo de entre os RCPs (Representative Concentration Pathways), correspondente a um aumento nas emissões e concentrações de gases de efeito de estufa que estima um forçamento radiativo no final do século de 8.5 W m⁻². Os domínios de simulação são os mesmos que os usados no relatório da fase 2, bem como as parametrizações físicas. Para uma melhor representação dos processos físicos característicos da canópia urbana usou-se, em todas as simulações, o modelo de canópia urbana simples, SLUCM (Single-layer Urban Canopy Model, [Kusaka et al. 2001; Kusaka e KIMURA 2004]), acoplado ao modelo de superfície Noah Land-surface model. Os parâmetros térmicos, dinâmicos, altura e largura dos edifícios, largura das ruas e edifícios, associados ao modelo SLUCM, também são os mesmos definidos nas Tabelas 2 e 3 do relatório da fase 2.

2.1. Calor antropogénico

A magnitude do calor antropogénico está correlacionada com a densidade de população das cidades.

Segundo Sailor e 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:

$$Q_f = Q_V + Q_E + Q_M$$

Os índices na equação anterior correspondem a veículos (V), edifícios (E), e metabolismo humano (M). A componente dos edifícios pode ser ainda dividida em calor rejeitado diretamente do consumo de energia elétrica e calor libertado pela queima de combustíveis para aquecimento. Este último pode ser desprezado durante o período de verão. Estas componentes podem ser definidas em função da densidade de população e, por isso, basta

calcular a sua intensidade per capita e multiplicar o valor resultante pela densidade de população.

a. Metabolismo humano

De todas as componentes do calor antropogénico, o calor proveniente do metabolismo humano é aquela que tipicamente representa a menor percentagem do total.

Por dependerem do nível de atividade física de cada indivíduo, as taxas metabólicas variam ao longo do dia. Segundo Fanger (1970) e Hall (2015), a taxa metabólica de um adulto de 70 kg durante o sono é de cerca de 70 W ($1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$). Durante o dia, com o aumento da actividade física, a taxa metabólica atinge os 115 W hab^{-1} em repouso e os 230 W hab^{-1} a caminhar. Neste trabalho considerou-se uma taxa metabólica diurna média de 140 W hab^{-1} . Como se pode verificar pela análise da Figura 1, o perfil diário do calor proveniente do metabolismo humano considera um período de transição linear de 3 horas entre os valores da taxa metabólica diurna e noturna descritos anteriormente.

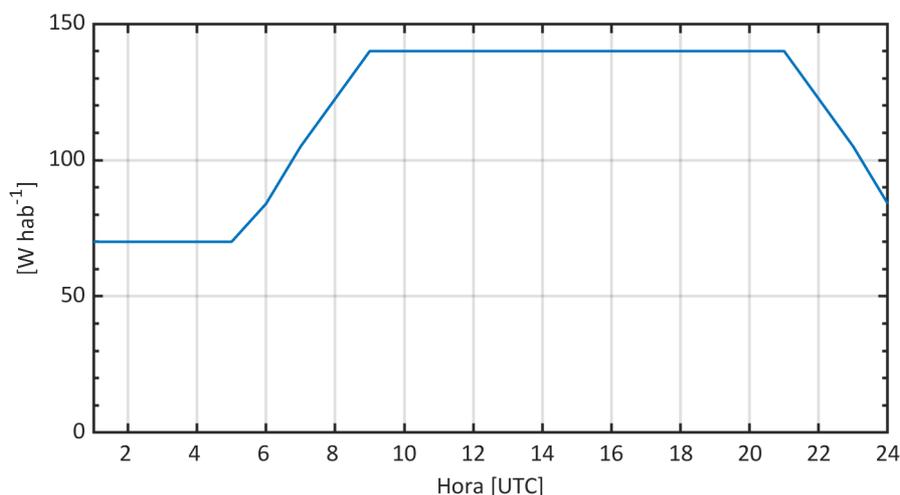


Figura 1. Perfil diário do calor libertado pelo metabolismo humano. Unidades: $W \text{ hab}^{-1}$. Dados do perfil disponíveis em: geoplan.asu.edu/research-and-outreach/projects/AHdata

b. Edifícios - Calor resultante do consumo elétrico

O consumo de energia elétrica por eletrodomésticos, equipamentos de ar condicionado, e iluminação resulta numa percentagem variável de energia desperdiçada sob a forma de calor que, dependendo do nível de isolamento térmico de cada edifício, temperatura do interior do edifício, e localização do equipamento (i.e., no interior ou exterior do edifício), é desperdiçado para o espaço exterior.

Segundo Sailor et al. 2016, o consumo de eletricidade (E_{HR}) para qualquer cidade pode ser escrito como $E_{HR} = E_{DPC}f(hora)$, em que E_{DPC} é a magnitude diária de energia elétrica consumida per capita e onde

$$\sum_1^{24} f(hora) = 1.0$$

Para o período de verão $f(hora)$ é representado pela curva da Figura 2. Este perfil assume máximos de consumo elétrico durante o período diurno e mínimos durante o período noturno.

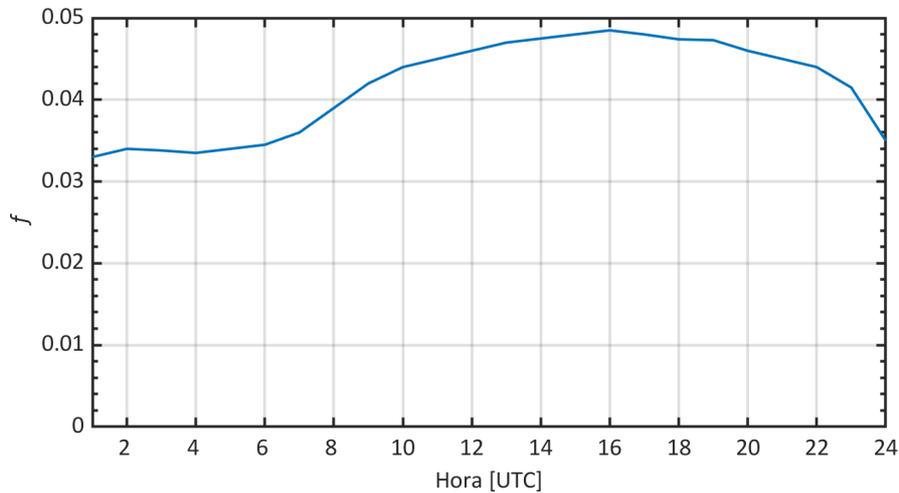


Figura 2. Perfil diário adimensional do consumo de energia elétrica.

c. Veículos - Calor libertado por veículos

Assumindo que a distância percorrida per capita em veículos tem pouca variação sazonal, o perfil horário de emissões por veículos pode ser estimado usando dados horários de tráfego. Com o perfil da fração de tráfego horária (F_t) mostrado na Figura 3 e os valores de distância percorrida per capita em veículo (DVD), é possível calcular o calor antropogénico libertado pelos veículos em qualquer hora do dia através de:

$$Q_V(h) = DVD \cdot F_t(h) \cdot \rho_{população}(h) \cdot EV$$

onde $\rho_{população}(h)$ é a densidade de população horária (assumida constante neste trabalho) e EV é a energia libertada por veículo, por quilómetro percorrido, e dada por:

$$EV = \frac{NHC \cdot \rho_{combustível}}{FE}$$

onde NHC é o calor libertado pela combustão da gasolina/gasóleo ($J\ kg^{-1}$), $\rho_{combustível}$ é a densidade do combustível ($kg\ l^{-1}$), e FE é a economia média de combustível ($km\ l^{-1}$).

O perfil da Figura 3 corresponde à média do perfil diário de tráfego de várias cidades dos Estados Unidos da América, sendo a variação entre os perfis de cada cidade relativamente

pequeno. Assim, assumimos que o perfil diário de tráfego para a AML assume aproximadamente a mesma forma que o perfil diário médio das cidades americanas.

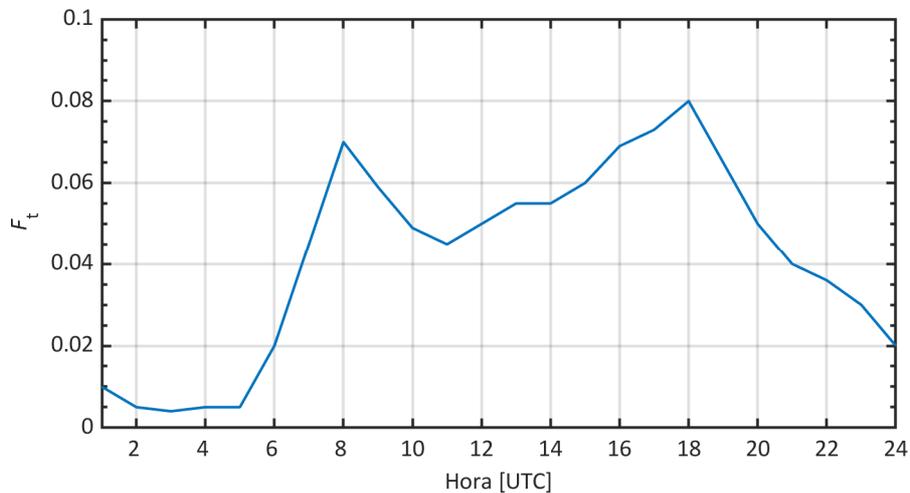


Figura 3. Perfil horário da fração de tráfego.

2.2. Calor antropogénico no modelo WRF

No modelo de canópis urbana SLUCM está disponível a opção de inclusão do efeito do calor antropogénico no cálculo do balanço energético da superfície. A cada classe urbana de uso do solo (i.e., baixa intensidade residencial, alta intensidade residencial, e comercial ou industrial) é atribuído um valor de intensidade de calor antropogénico, Q_{fmax} (em unidades de $W m^{-2}$), que é depois multiplicado pelo perfil adimensional horário mostrado na Figura 4.

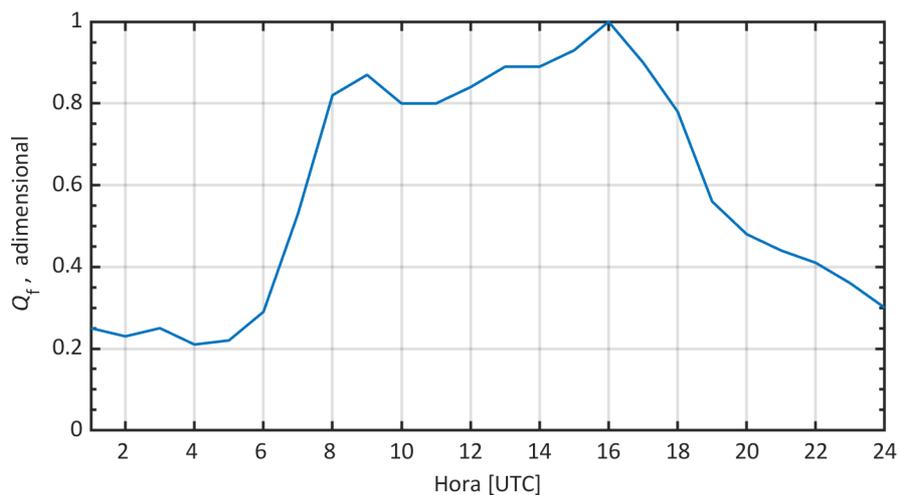


Figura 4. Perfil diário adimensional, da fração horária do calor antropogénico.

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 de que o seu valor não varia entre as três classes urbanas de uso do solo. Para a aplicação das formulações e perfis das diferentes componentes do calor antropogénico definidas nas subsecções anteriores, assumiu-se que $FE = 16.6 \text{ km l}^{-1}$ (equivalente a um consumo médio de $6 \text{ l } 100 \text{ km}^{-1}$), $\rho_{combustível} = 0.85 \text{ kg l}^{-1}$ (valor aproximadamente igual para diesel e gasolina), $DVD = 10.3 \text{ km h}^{-1} \text{ di}^{-1}$ (INE 2018) $NHC = 4.5 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$, e $E_{DPC} = 11.4767 \text{ kWh di}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (DGEG/MEc 2017).

Na Figura 5 são mostrados os perfis do ciclo diário de cada uma das componentes do calor antropogénico descritas anteriormente, bem como o seu total.

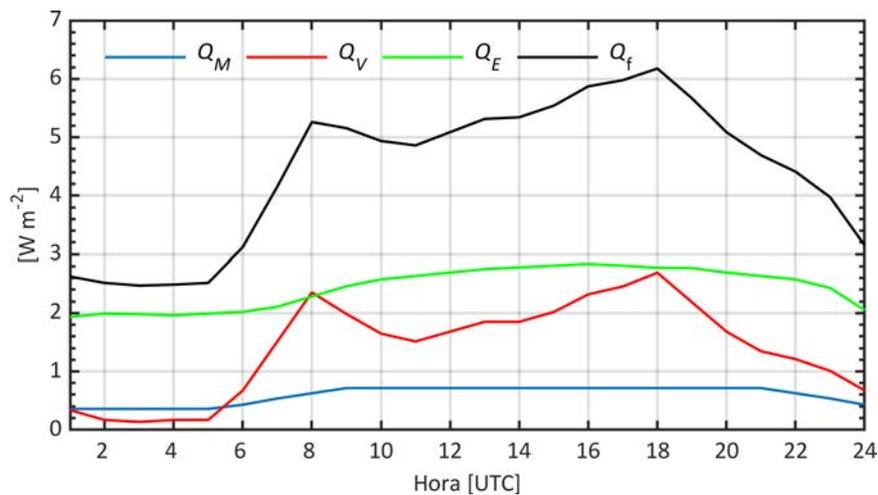


Figura 5- Perfis do ciclo diário calor de origem antropogénica devido ao metabolismo humano (curva azul), veículos (curva vermelha), consumo elétrico (curva verde), e o calor antropogénico total (curva negra) considerado como entrada no modelo de canóia urbana. Unidades: W m^{-2} .

O valor máximo diário de $Q_f = 6.2 \text{ W m}^{-2}$ (i.e., Q_{fmax}), foi usado em cada uma das classes urbanas de uso do solo e multiplicado pelo perfil adimensional da Figura 4 para se obter o ciclo diário do calor antropogénico total.

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, conseqüentemente, para uma maior eficiência energética dos edifícios adjacentes (Yang and Wang 2015). É sabido que os modelos urbanos sobrestimam os fluxos de calor sensível à superfície e subestimam os fluxos de calor latente, o que se traduz numa maior instabilidade vertical e temperatura junto à superfície. A utilização de esquemas de irrigação nos modelos de canópia urbana permite uma melhor representação destes processos e uma melhor avaliação da ICU (Shiguang and Fei 2014).

O modelo de canópia urbana SLUCM inclui a opção de activação de um esquema de irrigação para vegetação e telhados verdes na fração verde das áreas urbanas para os meses de maio a setembro, todos os dias, entre as 21 e as 22 UTC (Shiguang and Fei 2014). 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 (i.e., a transpiração não é limitada pela disponibilidade de água).

Deste modo, a opção de irrigação nos espaços verdes urbanos foi considerada neste estudo.

2.4. Projeções da cidade futura

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

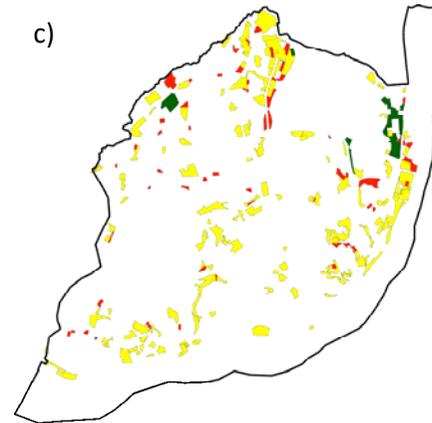
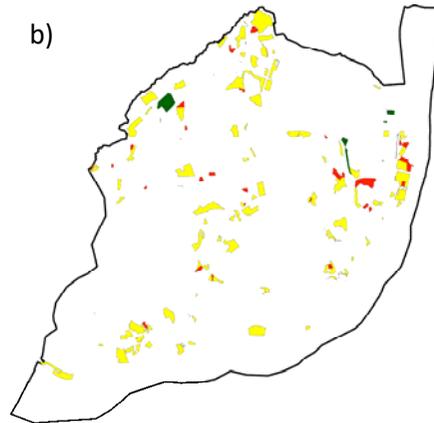
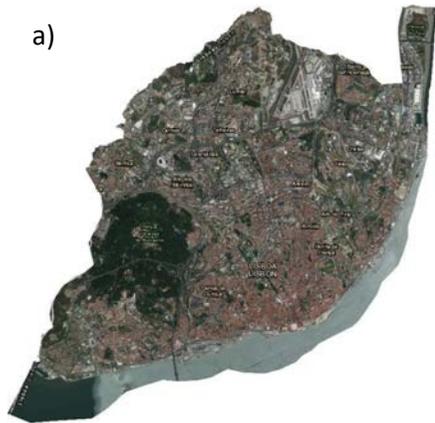
Após a conversão e reclassificação dos ficheiros *ascii* das áreas urbanas a consolidar, estes ficheiros foram sobrepostos ao ficheiro *ascii* com os dados do CORINE 2012. Os pixels do ficheiro CORINE coincidentes com o das áreas a consolidar foram reclassificados para as categorias dos ficheiros com 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 6a) 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.

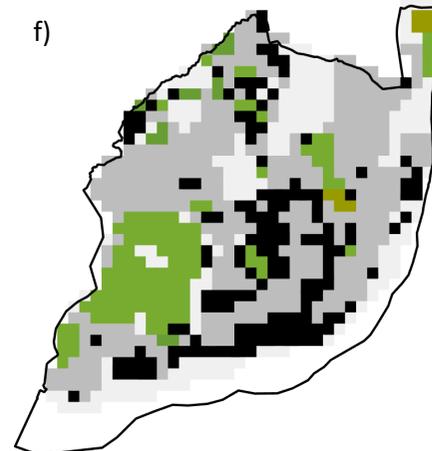
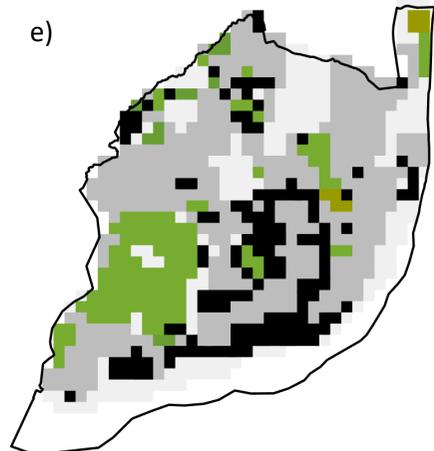
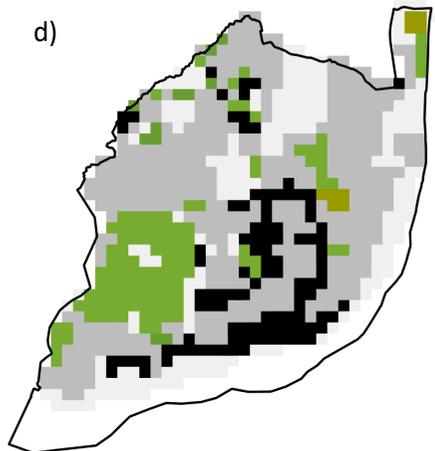
Lisboa atual

Lisboa 2050

Lisboa 2100



- Espaço central e residencial
- Espaço de atividades económicas
- Espaço de uso especial de equipamentos



- Culturas de sequeiro e pastagens
- Culturas de regadio e pastagens
- Culturas/bosques
- Baixa densidade residencial
- Alta densidade residencial
- Comercial ou industrial

Figura 6 - 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.

2.5. Experiências de simulação

Com o objetivo de avaliar a ICU na cidade de Lisboa para cenários climáticos e de urbanização futuros, procedeu-se à execução de várias experiências de simulação com o modelo WRF forçado por dados do modelo climático global MPI-ESM-LR. As simulações correspondem a dois eventos de onda de calor (HW) identificados nas simulações climáticas do período histórico (**HIST**) e futuro a longo prazo (**LONG**). Os períodos de simulação e de HW simulados estão descritos na Tabela 1, bem como as opções de uso do solo, calor antropogénico e esquema de irrigação utilizados. Os períodos de simulação indicados na tabela incluem um intervalo de 24 horas de “spin-up” do modelo que foi descartado da análise.

A HW identificada no período **HIST**, com uma duração de 4 dias, é uma onda de calor típica de duração e temperatura máxima média relativamente baixas. A escolha desta HW, deve-se ao facto de se pretender estudar o impacto relativo 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 da HW do período **LONG** correspondem à HW mais intensa identificada nas simulações climáticas deste período. Esta HW tem uma duração de 10 dias. No total realizaram-se cinco experiências de simulação para a onda de calor identificada no período **HIST** e duas para a HW identificada no período **LONG**.

Tabela 1. 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

Note-se que nestas experiências de simulação não foram consideradas eventuais alterações demográficas, de tráfego, e de avanço/recuo dos corpos de água circundantes ao município, que possam ocorrer em cenários futuros.

Seguindo o **Método 2** de avaliação da ICU do relatório da fase 2, e com base nas simulações descritas na Tabela 1, definem-se os seguintes campos de ICU e o que se pretende com a análise de cada um deles:

- **ICU1_HIST** (diferença entre os pontos urbanos da simulação URB_HIST_1 e NURB_HIST) – permite 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) – permite 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) – permite 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) – permite 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) – permite comparar com a ICU4_HIST e estabelecer a relação entre a variação de intensidade da HW e a intensidade da ICU.

3. Resultados

Os resultados que serão apresentados em seguida estão divididos em duas partes distintas, com objetivos diferentes:

- Na primeira parte são abordados os efeitos e impactos que a inclusão do calor antropogénico, irrigação na fração verde das categorias urbanas de uso do solo, e alterações nas áreas urbanas a consolidar até 2100 têm na intensidade e distribuição da ICU no Município de Lisboa (ML). Estas simulações dizem respeito a um evento de HW identificado período **HIST** forçado por dados do modelo climático **MPI-ESM-LR**, tal como foi descrito na secção 2.5 deste relatório.
- Na segunda parte, serão abordadas potenciais alterações na intensidade e distribuição da ICU para a mesma região, tendo em conta os efeitos descritos no ponto anterior, para a HW de maior temperatura máxima média (**Tmax_med**) identificada no período climático do futuro longínquo (**LONG**), com forçamento de dados do mesmo modelo climático.

3.1. Impacto do calor antropogénico, irrigação e crescimento da cidade na ICU

Na Figura 7 e 8 é mostrado, respetivamente, o ciclo diário da temperatura a 2 metros e da superfície nos pontos urbanos do ML, para as várias experiências de simulação da HW do período **HIST**.

A simulação **NURB_HIST** é aquela que apresenta menor temperatura a 2 metros e da superfície durante todo o dia. Por outro lado, a simulação **URB2100_HIST** é aquela que apresenta maior temperatura, principalmente durante o período noturno. Estes resultados correspondem ao esperado, pois na simulação **NURB_HIST** as classes urbanas de uso do solo foram substituídas pela classe Culturas/Bosques, e na simulação **URB2100_HIST** foram incluídas as áreas a consolidar até 2100, o calor antropogénico e o esquema de irrigação da fração urbana verde. As diferenças de temperatura entre as várias simulações são mais acentuadas durante o período noturno, com diferenças entre algumas simulações (com modelo de canópia urbana acoplado) a chegar a 1°C.

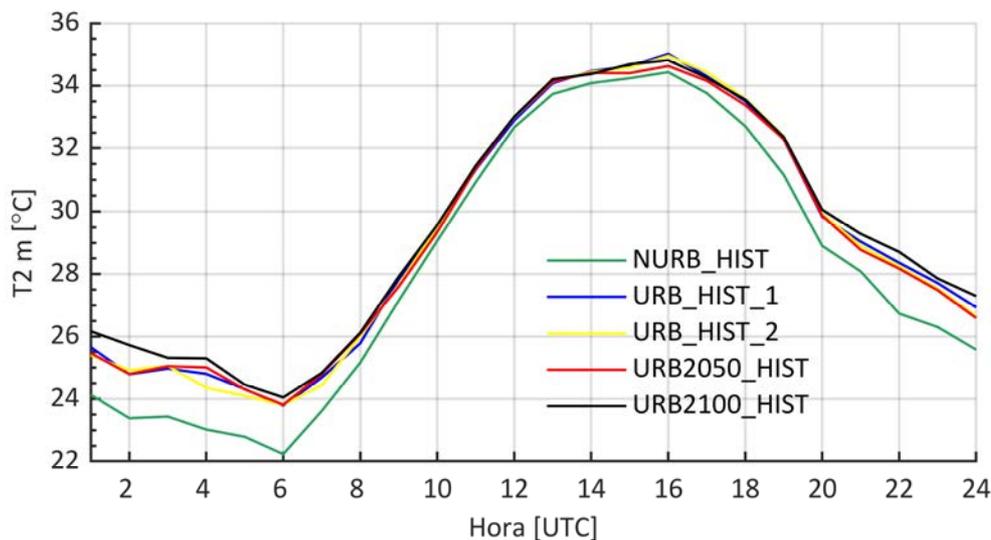


Figura 7 – Ciclo diário da temperatura a 2 metros para as diferentes simulações da HW do período HIST.

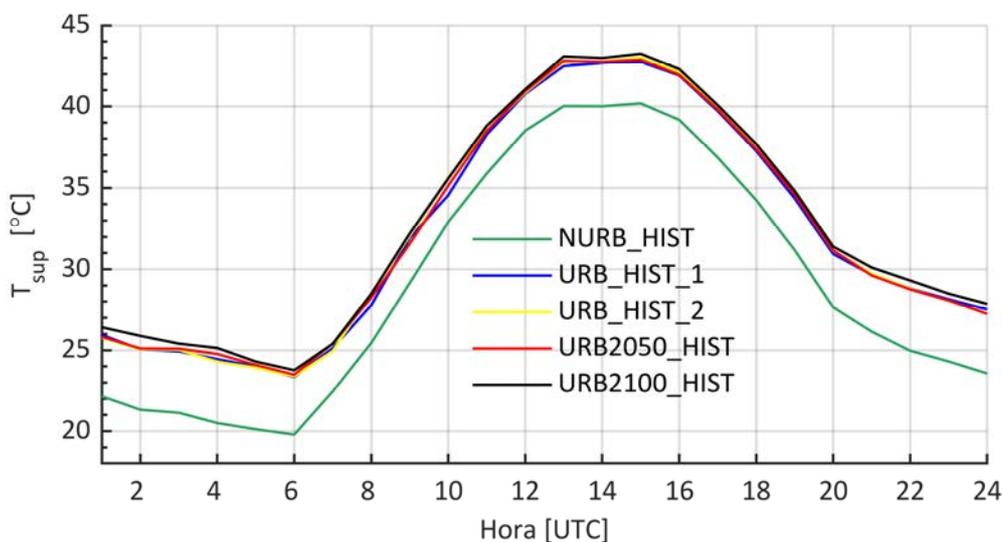


Figura 8 – O mesmo que a Figura 7, mas para a temperatura da superfície.

Como foi descrito na secção 2.5, a avaliação da ICU de cada simulação da HW do período HIST é feita em relação à simulação de referência do mesmo período - simulação NURB_HIST. Nas Figuras 9 e 10 são mostrados os perfis do ciclo diário das diferentes ICUs obtidas para a temperatura a 2 metros e à superfície. Os valores mínimos, médios e máximos destes gráficos encontram-se resumidos nas Tabelas 2 e 3. Médias diurnas correspondem à média de valores entre as 08h00 UTC e as 19h00 UTC, enquanto médias noturnas correspondem a médias de valores entre as 20h00 UTC e as 07h00 UTC. Todas as ICUs apresentam valores médios diurnos positivos que variam entre 0.48 e 0.6°C a 2 metros e 2.58 a 3.0°C à superfície. Para o período noturno a variação de temperatura situa-se entre 1.26 e 1.74°C a 2 metros, e 3.61 e 4.11°C à

superfície. De entre os fatores que diferenciam as várias simulações, o crescimento da cidade é aquele que parece ter mais impacto no aumento da ICU, principalmente quando se incluem as áreas a consolidar até 2100. A ICU mais intensa, ICU4_HIST (correspondente à diferença entre a simulação URB2100_HIST e NURB_HIST), tem uma intensidade máxima durante o período noturno de 2.3°C e de 4.6°C a 2 metros e à superfície, respetivamente. As restantes ICUs têm aproximadamente a mesma intensidade média total, no entanto existe uma diminuição da intensidade média e máxima da ICU2_HIST durante o período noturno, relativamente ao mesmo período para a ICU1_HIST. O contrário acontece para o período diurno. Esta diminuição de intensidade durante o período noturno pode dever-se à inclusão de irrigação na fração verde das classes urbanas que introduz humidade nas primeiras camadas do solo, resultando num aumento do fluxo de calor latente, principalmente na classe de baixa intensidade comercial (com 50% de fração verde). O efeito da irrigação compensa o calor antropogénico emitido pelas superfícies urbanas sob a forma de calor sensível durante o período noturno.

Um outro aspeto a destacar é a menor intensidade da ICU3_HIST relativamente à ICU2_HIST durante o período diurno. Isto significa que as alterações no uso do solo correspondentes à introdução das áreas a consolidar até 2050, não contribuíram para o aumento da temperatura durante este período, contrariando aquilo que se esperava. No entanto, existem várias explicações para este resultado:

1. Durante a interpolação dos dados de uso do solo para a grelha do domínio D-5, o modelo WRF introduz alguns pontos de classes não urbanas junto aos novos pontos urbanos do ML, compensando em certa medida o crescimento da cidade dentro dos limites do concelho;
2. A introdução de classes de uso do solo com menor fração verde (alta intensidade residencial e comercial/industrial) diminui o efeito de arrefecimento resultante da irrigação e aumenta o efeito do calor antropogénico pelo aumento da fração urbanizada;
3. O facto de a maior parte das alterações ao uso do solo urbano serem sobre pontos que já eram classificados como urbanos, diminui o impacto dessas alterações na temperatura.

Durante o período noturno a situação anterior não se verifica, havendo um aumento significativo da intensidade da ICU, tal como era previsto.

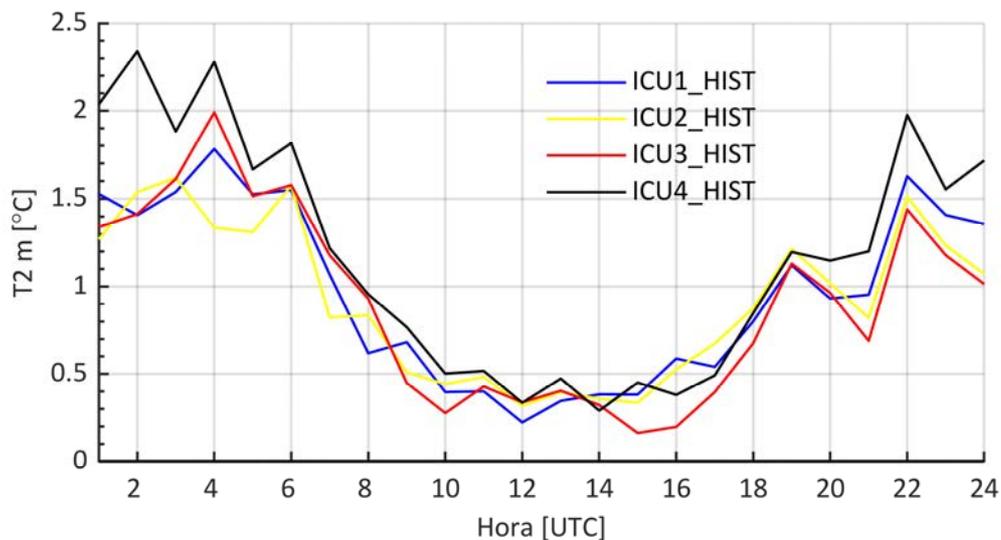


Figura 9 – Ciclo diário das ICUs da HW obtidas para a temperatura a 2 metros.

Tabela 2 – Sumário das intensidades das diferentes ICUs obtidas para a temperatura a 2 metros. Unidades: °C.

ICU	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
ICU1_HIST	0.54	1.39	0.22	0.96	1.78
ICU2_HIST	0.58	1.26	0.32	0.92	1.62
ICU3_HIST	0.48	1.33	0.16	0.90	1.99
ICU4_HIST	0.60	1.74	0.29	1.17	2.34

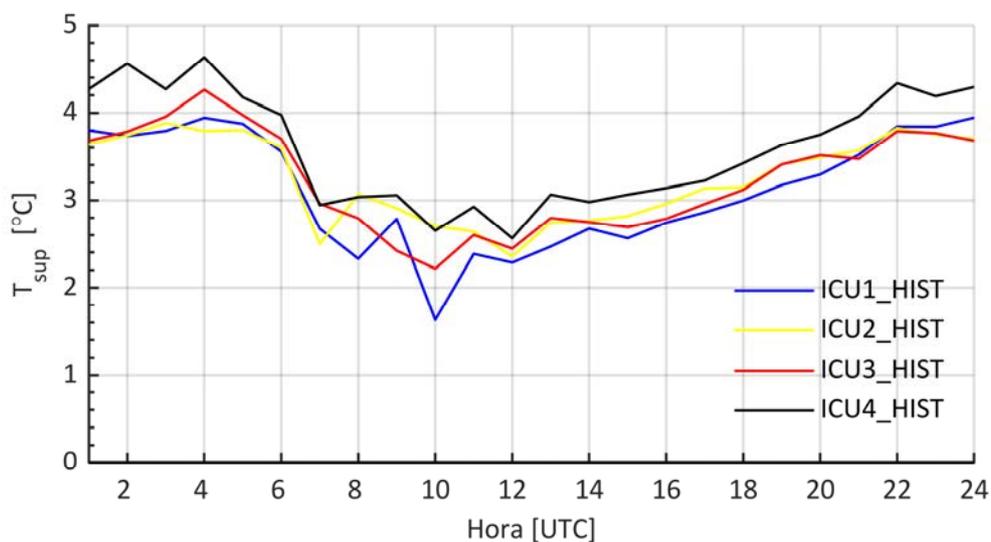


Figura 10 – O mesmo que a Figura 9, mas para a temperatura da superfície.

Tabela 3 – O mesmo que a Tabela 2, mas para as ICUs obtidas a partir da temperatura da superfície. Unidades: °C.

ICU	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
ICU1_HIST	2.58	3.65	1.63	3.11	3.95
ICU2_HIST	2.89	3.61	2.35	3.25	3.88
ICU3_HIST	2.75	3.71	2.22	3.23	4.26
ICU4_HIST	3.06	4.11	2.56	3.59	4.64

Nas Figuras 11 e 12 é mostrado o ciclo diário da decomposição nas três classes urbanas de uso do solo das ICUs obtidas com a temperatura a 2 metros e da superfície, respetivamente. Estas figuras são acompanhadas pelas Tabela 4 e 5, que resumem os principais dados médios para os períodos diurno e noturno de cada classe urbana de uso do solo. Tal como verificado na análise da HW de 2003 do relatório da fase 2, as classes urbanas de uso do solo em que a ICU é mais elevada são as classes de alta intensidade residencial, e comercial ou industrial. Durante o período noturno as temperaturas a 2 metros nestas duas classes podem ultrapassar os 2.5°C para a temperatura a 2 metros e os 5.5°C para a temperatura da superfície. Para a classe de baixa intensidade residencial, a ICU à superfície e a 2 metros é cerca de três vezes menos intensa que para a as restantes classes. Durante o período noturno a ICU a 2 metros atinge um valor médio aproximado de 0.5°C nas duas classes com maior fração de superfície urbana e um pouco menor na classe de baixa intensidade residencial. Para a temperatura da superfície, os valores de ICU diurna são bastante maiores, com os mínimos de intensidade de ICU a ocorrer por volta das 8 UTC. Apesar de os valores das ICUs a 2 metros se manterem praticamente constantes ao longo do período diurno, os valores à superfície aumentam, devido à elevada capacidade térmica das superfícies urbanizadas, que armazenam um excesso de energia que é depois libertado para a atmosfera durante o período noturno. O aumento da intensidade da ICU ao longo do dia é tanto maior, quanto menor é a percentagem de fração verde da classe urbana de uso do solo.

A ICU4_HIST é a que tem maior intensidade diurna e noturna. As classes urbanas de uso do solo que sofreram mais alterações em termos de áreas a consolidar são aquelas que apresentam maior intensidade de ICU (alta intensidade residencial e comercial/industrial).

Na Figura 13 são mostrados os campos das médias temporais e máximos absolutos da ICU1_HIST e ICU2_HIST durante os períodos diurno e noturno da HW do período HIST. Na Figura 14 é mostrado o mesmo que na Figura 13, mas para os campos da ICU3_HIST e

ICU4_HIST. Nos gráficos das médias temporais estão sobrepostos os campos das médias temporais do vento a 10 metros correspondente à simulação para a qual é calculada a ICU. Da análise das figuras, verifica-se que todas as ICUs são mais intensas durante o período noturno. É também visível a maior intensidade da ICU4_HIST relativamente às restantes ICUs. Durante o período diurno as ICUs têm aproximadamente a mesma intensidade, com uma distribuição espacial uniforme em todo o ML. No período noturno as ICUs são mais irregulares, com maior intensidade sobre as classes de alta intensidade residencial e comercial ou industrial. A intensidade da ICU a 2 metros pode atingir em média os 4.5°C e no máximo a 10°C. A região de baixa intensidade residencial, que se estende desde o norte da freguesia dos Olivais até Penha de França, tem valores de ICU diurnos e noturnos baixos em relação a outras regiões, podendo existir uma ilha de frio em algumas horas do período noturno nesta região. Os campos médios do vento mostram uma predominância de leste com intensidades de 2 m s⁻¹ durante o período diurno e praticamente nulos durante o período noturno.

A distribuição dos campos médios e máximos absolutos das ICUs obtidas a partir da temperatura da superfície (Figura 15 e 16) é semelhante aos da temperatura a 2 metros durante o período noturno, mas com uma intensidade superior, podendo em média atingir 8°C e no máximo 11°C acima da simulação de referência desta HW. Durante o dia as diferenças de temperatura entre as classes urbanas de uso do solo são bastante mais visíveis do que para o mesmo período dos campos da ICU da temperatura a 2 metros.

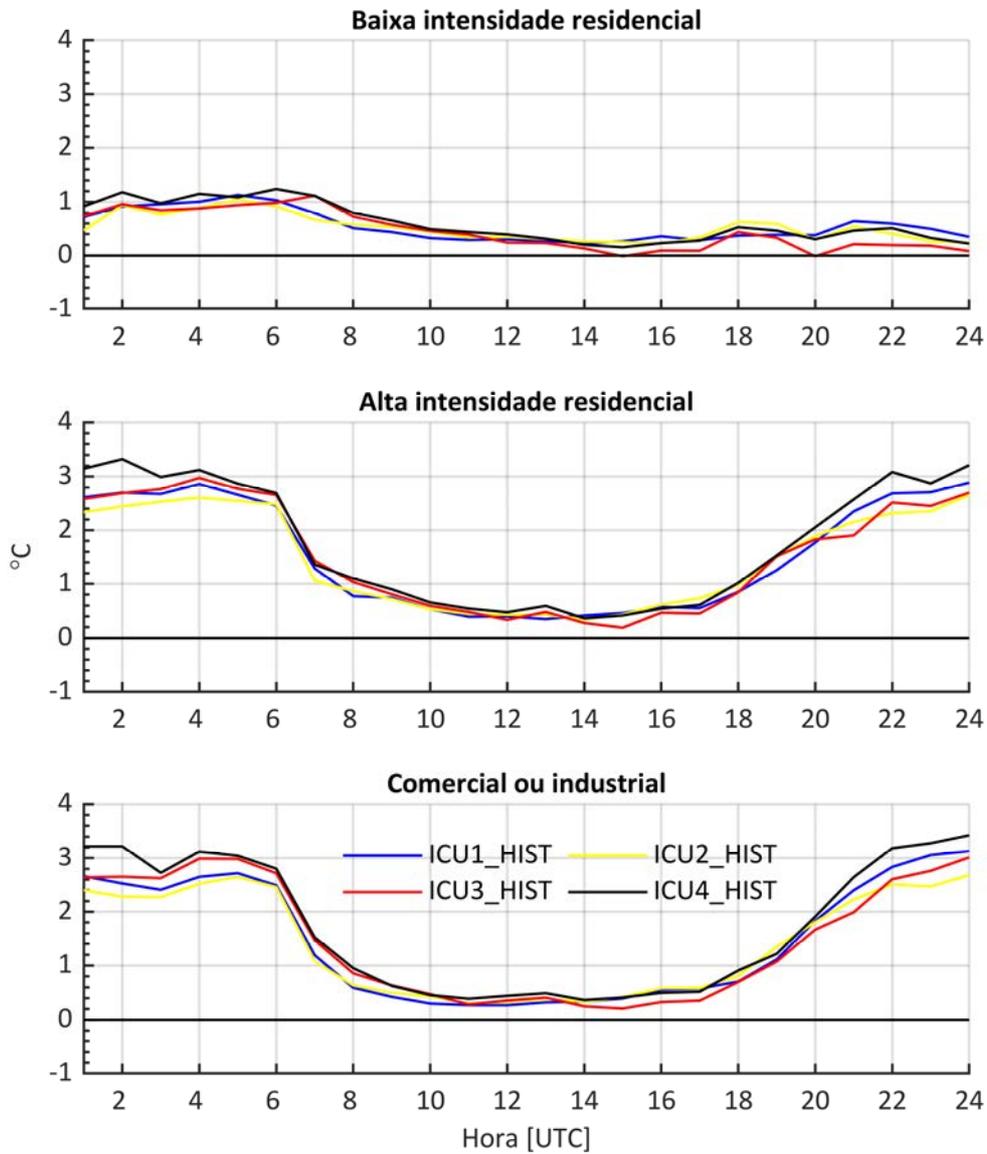


Figura 11 – Decomposição do ciclo diário das diferentes ICUs obtidas com a temperatura a 2 metros, para as diferentes classes urbanas de uso do solo.

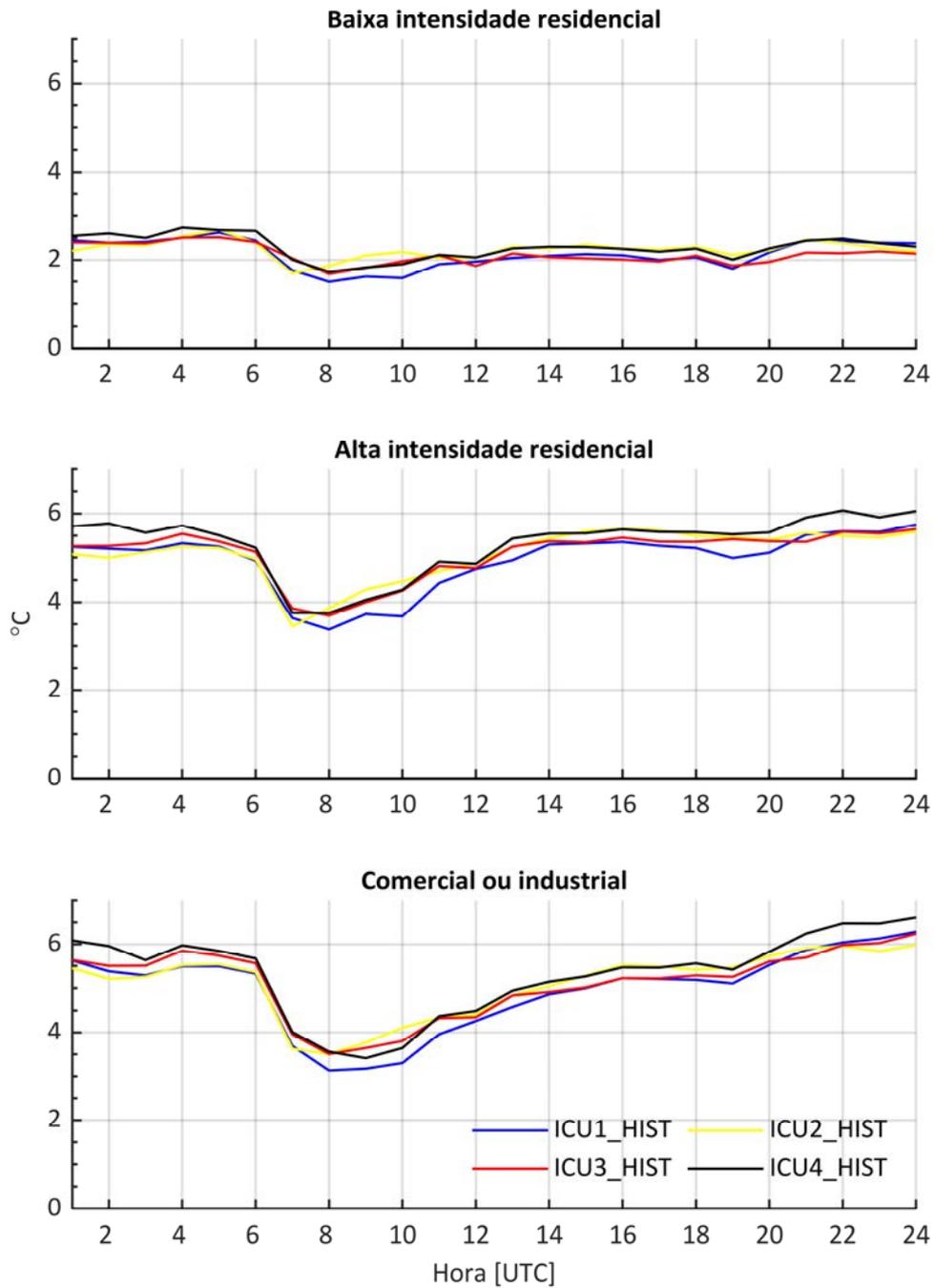


Figura 12 - O mesmo que a Figura 11, mas para a ICU obtida com a temperatura da superfície.

Tabela 4 -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

Tabela 5 -O mesmo que a Tabela 4, 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

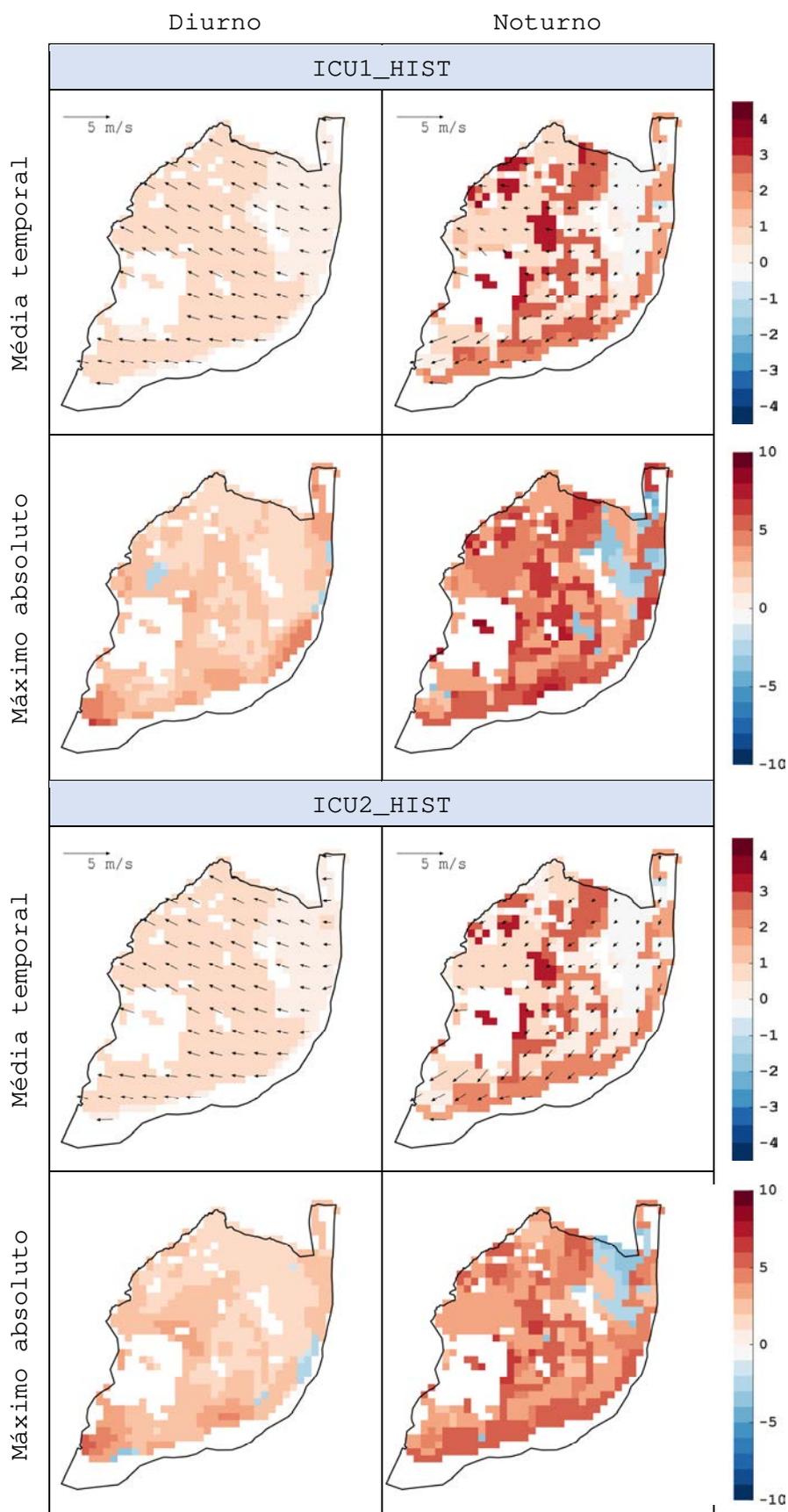
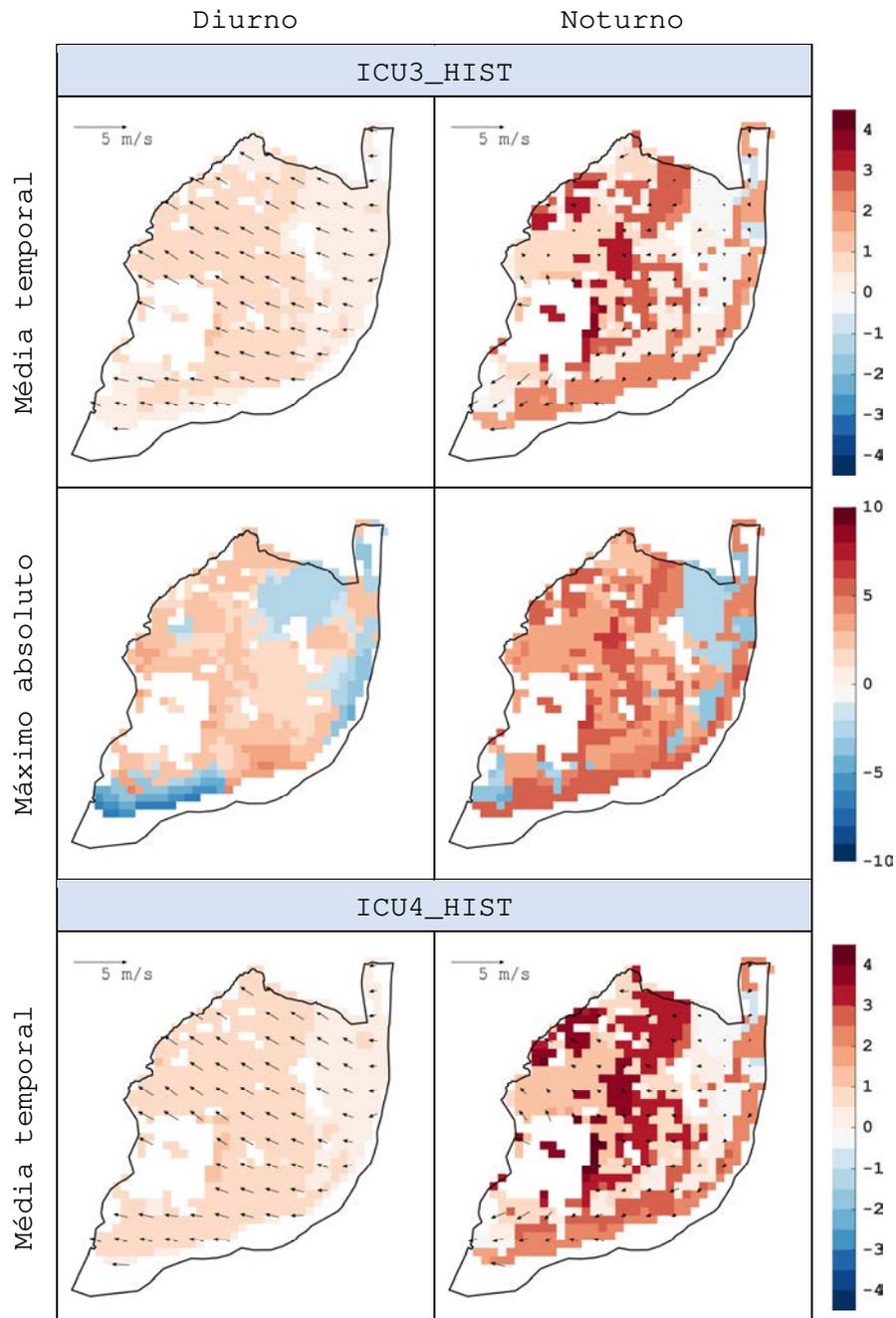


Figura 13 - Campos médios e máximos absolutos temporais da ICU1_HIST e ICU2_HIST para a temperatura a 2 metros no Município de Lisboa, durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW. Valores

apresentados em °C. Os campos das médias temporais têm sobrepostos os campos da média temporal do vento a 10 metros da simulação urbana em relação à qual se determinou a ICU. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$.



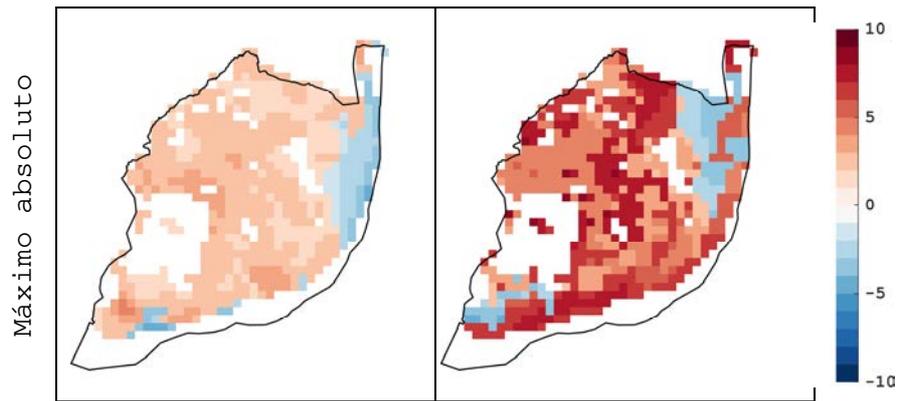
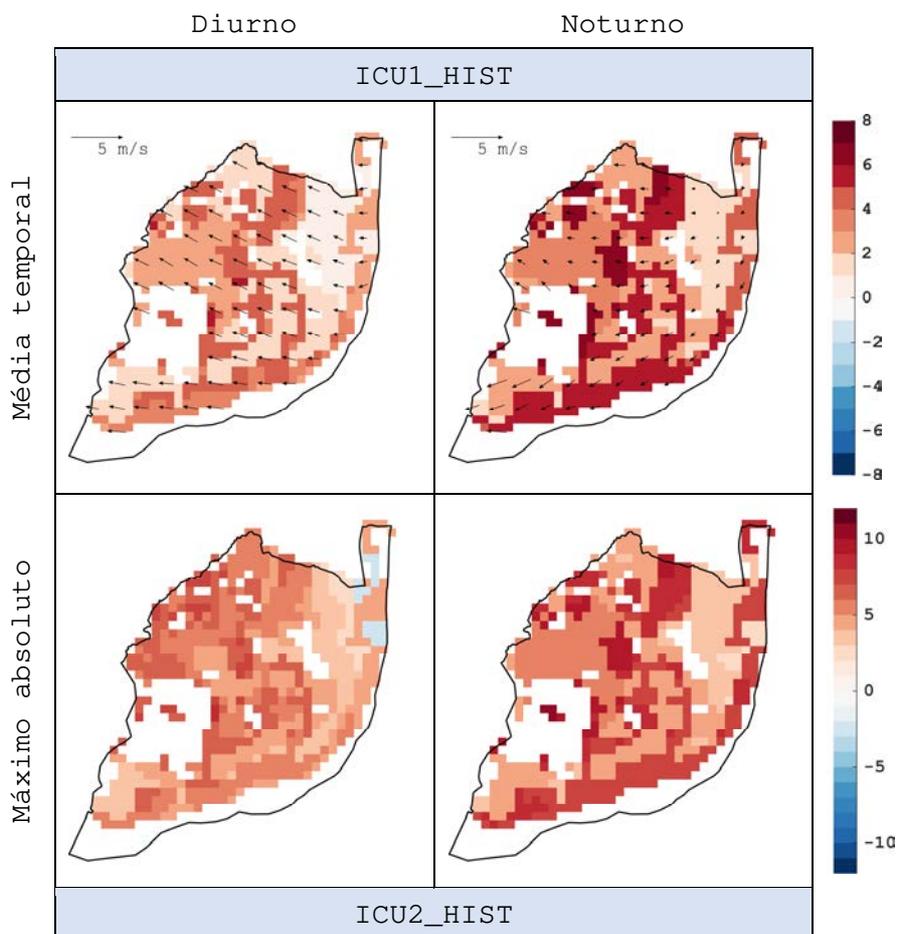


Figura 14- O mesmo que a Figura 13, mas para as ICU3_HIST e ICU4_HIST. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$.



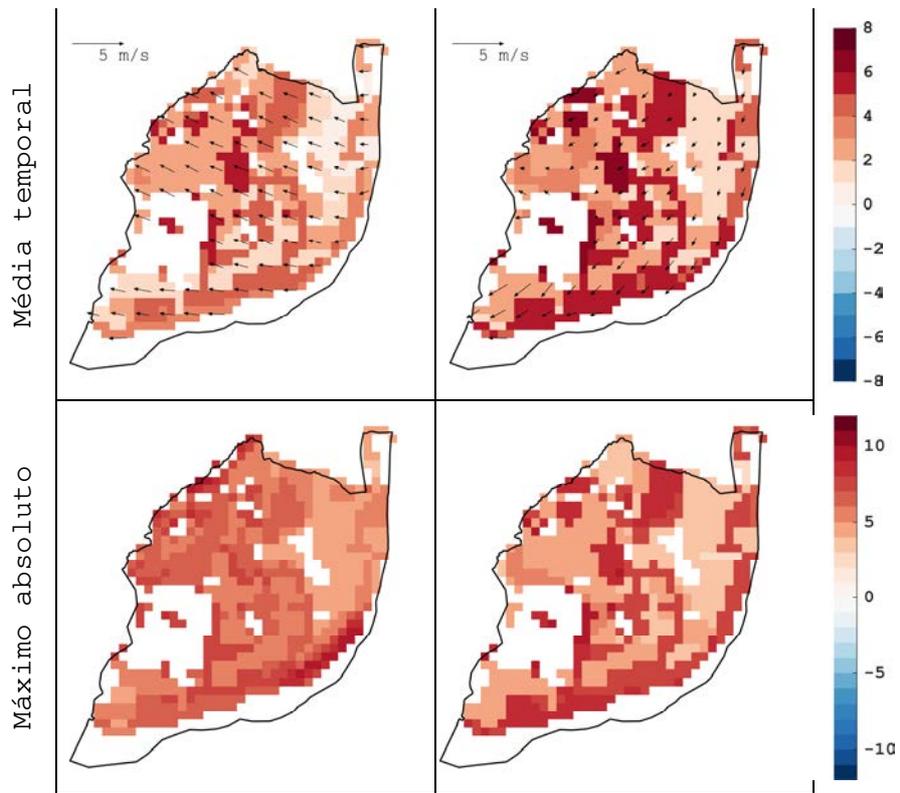


Figura 15- O mesmo que a Figura 13, mas para a temperatura da superfície. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$.

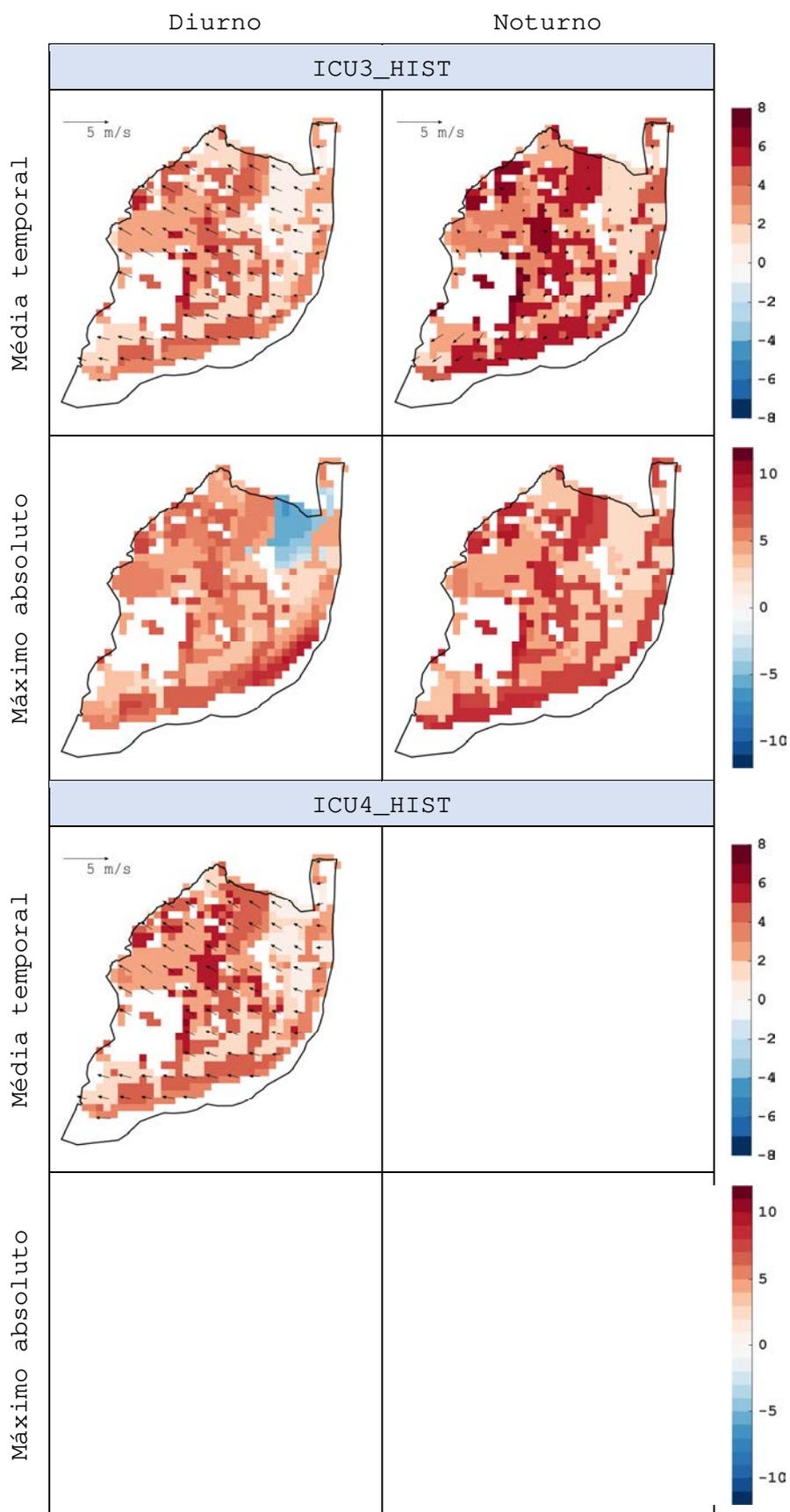


Figura 16 - O mesmo que a Figura 14, mas para a temperatura da superfície. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$.



Nas Figuras 17 e 18 são mostradas as diferenças entre os campos médios temporais das ICUs das Figuras 13, 14, 15 e 16, respetivamente. Nestas figuras são também apresentados os valores de ΔT_D e ΔT_N em °C e em percentagem de aumento, e que representam as diferenças de temperatura diurna e noturna obtidas a partir da média espacial das médias temporais diurna e noturna de cada ICU durante o período de HW.

O efeito conjunto do calor antropogénico e da irrigação diminui em cerca de 0.13°C (-9.4%) a ICU noturna a 2 metros e 0.04°C (-1.1%) à superfície, relativamente aos valores da ICU1_HIST (ver valores médios diurnos e noturnos nas Tabelas 2 e 3), mas aumenta a ICU diurna em 0.04°C (7.4%) e 0.31°C (12%) para a temperatura a 2 metros e da superfície, respetivamente. Como se pode verificar, a ICU diurna da superfície é aquela que sofre maior percentagem de variação em relação ao valor médio diurno da ICU1_HIST.

A introdução das áreas urbanas a consolidar até 2050 leva a uma diminuição da ICU diurna e a um aumento da ICU noturna relativamente à ICU2_HIST, tanto à superfície como a 2 metros. A principal variação é para a ICU diurna, onde esta diminui em 0.1°C (17%).

Por fim, a introdução das áreas a consolidar até 2100 leva a um aumento de 0.12°C (20.7%) na ICU diurna e 0.41°C (32.5%) na ICU noturna. Para a temperatura da superfície o aumento é de 0.31°C (10.7%) durante o período diurno e de 0.40°C (11.1%) durante o período noturno, relativamente à ICU2_HIST. De referir que as diferenças entre a ICU3_HIST e ICU2_HIST, mas também entre ICU4_HIST e ICU2_HIST, podem apresentar uma pequena componente relativa a variações do calor antropogénico e da irrigação devido às alterações do uso do solo nestas simulações.

Da análise destas figuras percebe-se que a alteração que tem mais impacto na intensidade da ICU é a introdução das áreas a consolidar até 2100. Este impacto seria ainda maior se a irrigação não fosse incluída.

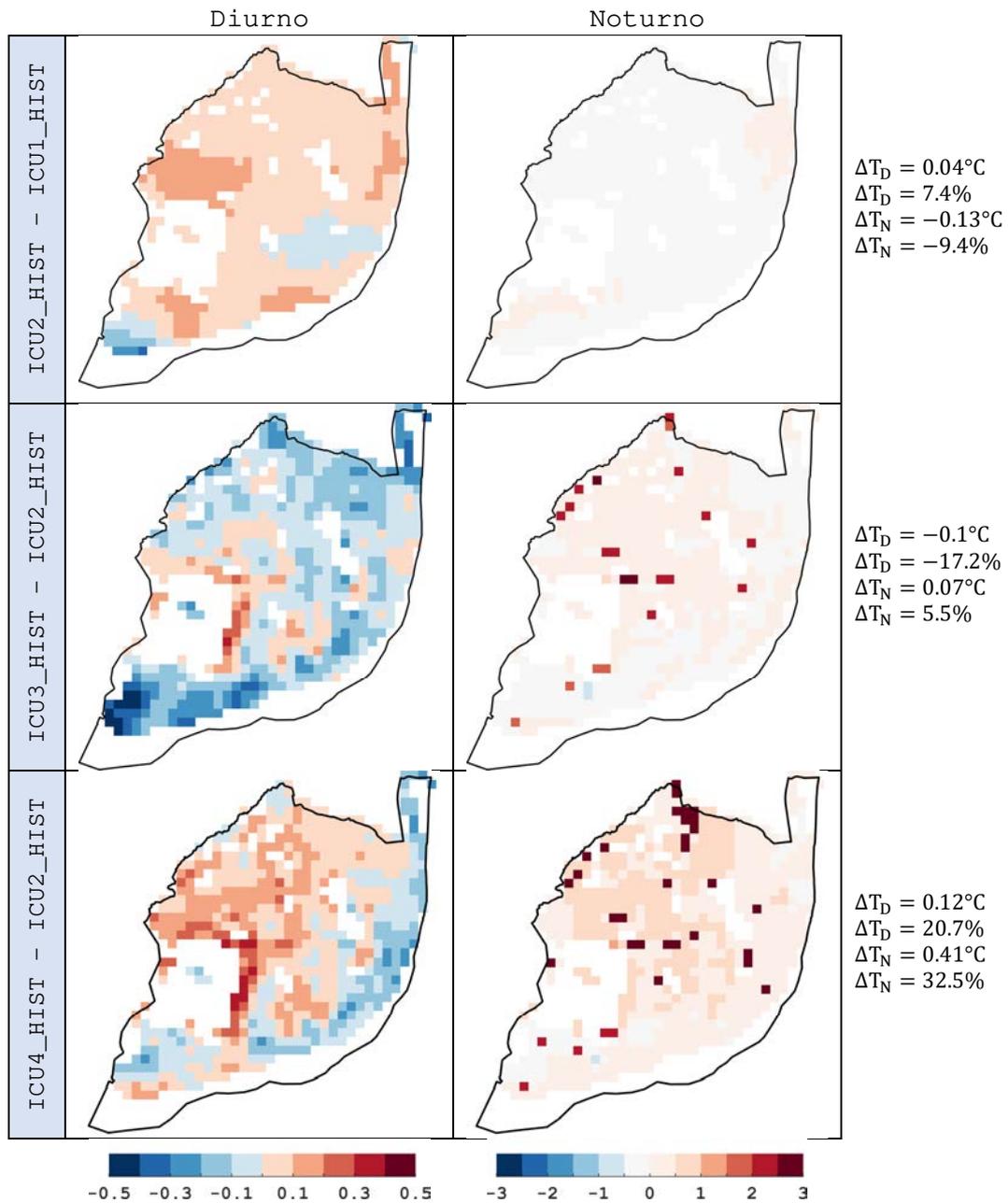


Figura 17 – Campos médios temporais diurnos e noturnos das diferenças entre: ICU2_HIST e ICU1_HIST (em cima); ICU3_HIST e ICU2_HIST (no meio); ICU4_HIST e ICU2_HIST (em baixo). Valores em °C.

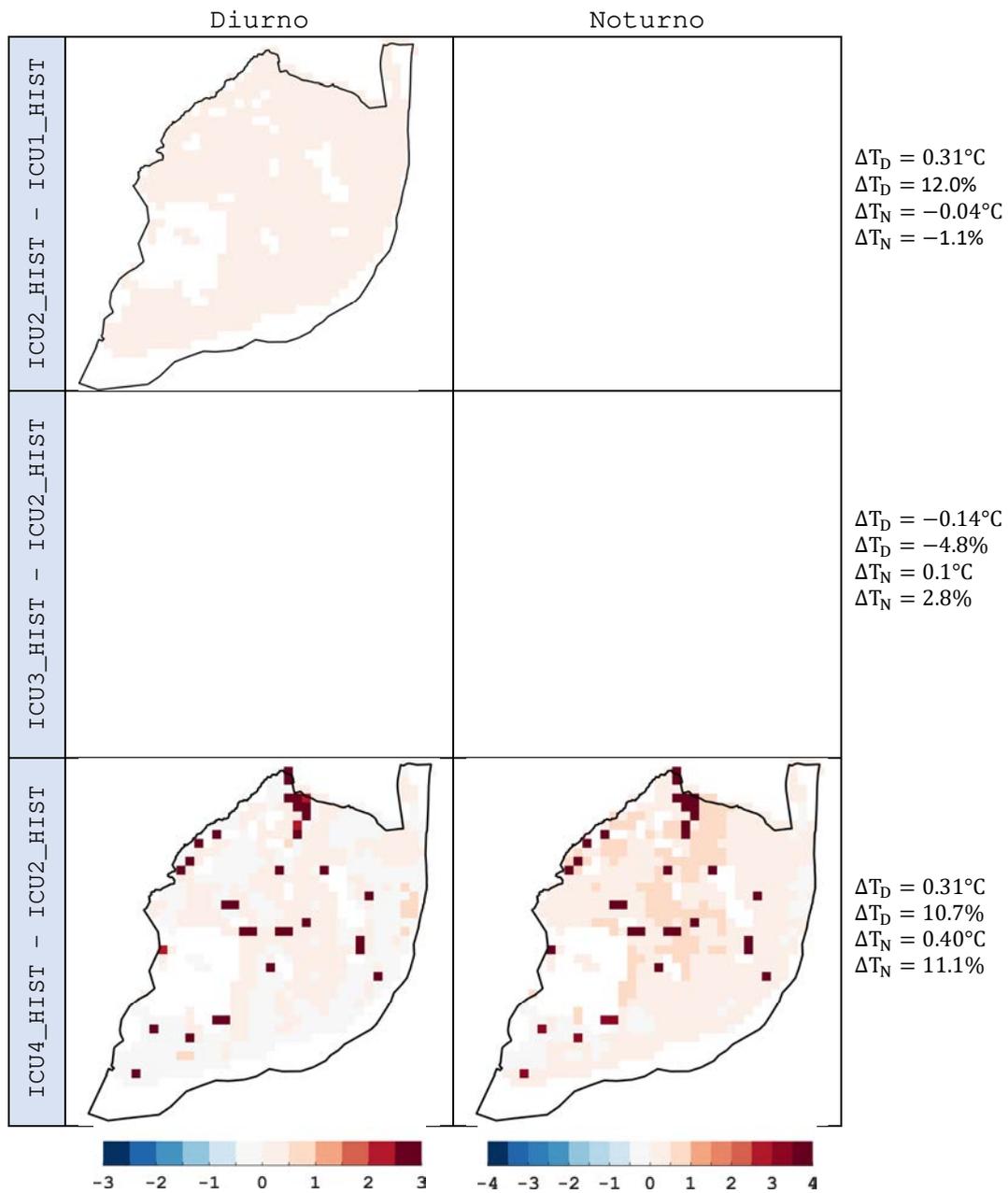


Figura 18 – O mesmo que a Figura 17, mas para os campos das diferenças de ICUs obtidas com a temperatura da superfície.

3.1.1. Fluxos de calor e radiativos entre a superfície e a atmosfera

A Figura 19, mostra a comparação entre o ciclo diário (para todo o período de HW) dos fluxos de calor sensível (CS), calor latente (CL), calor do solo (FS), e do balanço total à superfície (BAL.), entre simulações URB2100_HIST e NURB_HIST. Um sumário dos valores médios, máximos e mínimos correspondentes a cada um destes fluxos e ao balanço total é mostrado nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, para estas simulações e para as restantes simulações do período HIST.

A análise da Figura 19 permite perceber que o fluxo de calor sensível é positivo durante todo o período diurno e praticamente nulo durante o período noturno em todas as simulações. No entanto, durante o período diurno, o valor do fluxo de calor sensível da simulação URB2100_HIST é mais do dobro do fluxo de calor sensível da simulação NURB_HIST.

O fluxo de calor latente também é positivo durante o dia, mas é bastante menor na simulação URB2100_HIST, devido à redução da fração verde e ao aumento da impermeabilização pelas superfícies urbanas. Como será mostrado mais à frente (nos perfis da Figura 20), a diminuição do fluxo de calor latente devido à presença de superfícies urbanas é tanto menor, quanto maior é a percentagem de ocupação pelas mesmas.

O fluxo de calor do solo é negativo durante o período diurno, o que indica que o solo recebe energia da atmosfera. Este ganho energético é maior em valor absoluto na simulação URB2100_HIST, devido ao menor albedo e à maior capacidade térmica das superfícies urbanas. Durante a noite, o excesso de energia acumulado no solo é libertado para a atmosfera, aumentando a temperatura junto à superfície da canópia urbana.

A partir da análise das Tabelas 6, 7, 8 e 9, consegue perceber-se os efeitos que a introdução de fatores como a urbanização e o calor antropogénico têm nos fluxos de calor à superfície. O calor sensível aumenta com a introdução do calor antropogénico e com o crescimento da cidade, tanto em termos de valores médios, mas também de valores mínimos e máximos. Relativamente à influência do calor antropogénico, não seria de esperar um impacto muito significativo, porque este representa uma parte muito pequena dos fluxos de calor sensível das diferentes simulações (lembre-se que o calor de origem antropogénica pode atingir um valor máximo de 6.2 W m^{-2}). O mesmo acontece para o calor latente, apesar de não se verificar uma grande diferença entre as simulações URB_HIST1 e URB_HIST2, porque o calor latente está mais dependente de mudanças nas características da superfície, como a introdução de superfícies impermeáveis e a diminuição da cobertura vegetal. Por fim, não se verifica uma tendência marcada nos valores dos fluxos do solo entre as diferentes simulações, mas percebe-se que o calor acumulado no solo durante o dia é maior na simulação URB2100_HIST,

potenciando uma maior intensidade de ICU durante todo o dia, principalmente durante o período noturno.

Na Figura 20 são mostradas as diferenças entre os balanços dos fluxos radiativos à superfície, entre a simulação URB2100_HIST e NURB_HIST, para as diferentes classes urbanas de uso do solo. As diferenças para as restantes simulações não são mostradas, mas conclusões e sua análise são as mesmas. Da análise da figura, verifica-se que a classe de baixa intensidade residencial apresenta valores absolutos de fluxos menores que as restantes classes, com um aumento pequeno dos fluxos de calor sensível durante todo o dia, uma diminuição do fluxo de calor latente libertado para a atmosfera. Também existe um ligeiro aumento dos fluxos do solo em direção à atmosfera e da atmosfera em direção ao solo durante o período noturno. Para as classes de alta intensidade residencial e comercial ou industrial, há um aumento significativo dos fluxos de calor sensível. Este aumento chega a ser de 130 W m^{-2} às 17 UTC, mas durante a noite os fluxos reduzem-se para valores entre os 20 e os 40 W m^{-2} . O fluxo de calor latente tem uma redução acentuada durante o período diurno devido à menor fração de espaços verdes nestas classes de uso do solo, com a diminuição dos fluxos a chegar aos 250 W m^{-2} . O fluxo do solo aumenta em direção a este durante o dia (i.e., há um aumento da absorção de radiação pelo mesmo) e em direção à atmosfera durante o período noturno.



Figura 19 – Comparação entre os fluxos de calor sensível (CS), calor latente (CL), calor do solo (FS), e balanço total à superfície (BAL.), das simulações URB2100_HIST e NURB_HIST.

Tabela 6 - Sumário dos valores médios, mínimos e máximos dos fluxos de calor sensível para as várias simulações da HW do período MPI-HIST. Unidades: W m⁻².

CS (W m ⁻²)	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
NURB_HIST	84.5	-16.7	-24.2	33.9	147.4
URB_HIST1	138.1	5.1	-6.9	71.6	206.4
URB_HIST2	143.6	6.7	-6.3	75.1	208.6
URB2050_HIST	143.3	7.3	-4.7	75.3	211.4
URB2100_HIST	147.9	6.7	-4.3	77.3	218.1

Tabela 7 – O mesmo que a Tabela 6, mas para os fluxos de calor latente.

CL (W m ⁻²)	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
NURB_HIST	251.3	19.5	8.6	135.4	361.9
URB_HIST1	131.9	5.1	1.4	68.5	190.4
URB_HIST2	132.3	4.9	1.1	68.6	189.0
URB2050_HIST	123.7	4.8	1.1	64.3	180.1
URB2100_HIST	120.6	4.5	1.0	62.5	173.3

Tabela 8 - O mesmo que a Tabela 6, mas para os fluxos de calor do solo.

FS (W m ⁻²)	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
NURB_HIST	-91.5	46.0	-162.4	-22.8	66.5
URB_HIST1	-118.4	77.2	-222.0	-20.6	107.6
URB_HIST2	-121.1	79.0	-223.4	-21.0	106.8
URB2050_HIST	-120.3	78.7	-228.4	-20.8	108.6
URB2100_HIST	-122.6	79.6	-229.9	-21.5	110.1

Tabela 9 - O mesmo que a Tabela 6, mas para os balanços radiativos à superfície.

Bal. (W m ⁻²)	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
NURB_HIST	244.3	48.7	16.7	146.5	373.7
URB_HIST1	151.6	87.3	56.1	119.5	208.6
URB_HIST2	154.8	90.6	53.6	122.7	210.3
URB2050_HIST	146.7	90.9	51.7	118.8	208.9



URB2100_HIST

145.9

90.8

52.0

118.3

205.6

Figura 20- Diferenças no balanço energético da superfície entre as simulações URB2100_HIST e NURB_HIST nas várias classes urbanas de uso do solo. Unidades: Wm^{-2} .

3.2. A ICU para uma HW do futuro longínquo

Nas Figuras 21 e 22 são mostrados, respetivamente, o ciclo diário da temperatura a 2 metros e da superfície nos pontos urbanos do ML para as experiências de simulação da HW do período **LONG**. Da análise da figura verifica-se que a intensidade da HW escolhida para o estudo da ICU no período **LONG** é consideravelmente maior que a da HW escolhida para o período **HIST**. A escolha de uma HW mais intensa permite verificar se o aumento da intensidade da HW implica um aumento de intensidade da ICU. As figuras mostram que tanto em termos de temperatura a 2 metros como de temperatura da superfície, ao longo do dia, a temperatura da simulação URB2100_FUT é sempre maior do que a da simulação NURB_FUT (i.e., simulação onde foram removidas as classes urbanas de uso do solo e em relação à qual é avaliada a ICU).

As Figuras 23 e 24 mostram as ICUs a 2 metros e à superfície, obtidas a partir das curvas das Figuras 21 e 22, respetivamente. Estas figuras são acompanhadas pelas Tabelas 10 e 11, que sumarizam os principais dados dos dois tipos de ICU. Os valores entre parêntesis nas tabelas correspondem aos dados obtidos para a ICU4_HIST da secção anterior. A ICU a 2 metros tem um valor médio diurno de 0.27°C e de 1.03°C durante a noite. Para a temperatura da superfície estes valores são de 2.01°C e 3.58°C para cada um dos períodos. Os valores máximos de ICU a 2 metros e à superfície são de 1.32°C e 3.9°C, respetivamente. Comparando com os valores da ICU obtida para a simulação URB2100_FUT (ICU_FUT) com os da simulação URB2100_HIST (ICU4_HIST) percebe-se que apesar da intensidade da HW do período **LONG** ser maior do que a do período **HIST**, a intensidade da ICU correspondente à HW do período **HIST** é maior do que a do período HW do período **LONG**.

Figura 21 - Ciclo diário da temperatura a 2 metros para as simulações da HW do período MPI-FUT.

Figura 22 – O mesmo que a Figura 21, mas para a temperatura da superfície.

Figura 23 - Ciclo diário das ICU para a HW do futuro longínquo, obtida para a temperatura a 2 metros.

Figura 24 – O mesmo que a Figura 23, mas para a temperatura da superfície.

Tabela 10 - Sumário das intensidades da ICU obtida a partir da temperatura a 2 metros. Unidades: °C. Valores entre parêntesis correspondem aos dados da ICU4_HIST.

ICU	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo
ICU_FUT	0.27 (0.60)	1.03 (1.74)	0.02 (0.29)	0.65 (1.17)	1.32 (2.34)

Tabela 11 – O mesmo que a Tabela 10, mas para a ICU obtida a partir da temperatura da superfície.

ICU	Média diurna	Média noturna	Total		
			Mínimo	Média	Máximo

ICU_FUT	2.01 (3.06)	3.58 (3.65)	1.27 (2.56)	2.80 (3.59)	3.90 (4.64)
----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Nas Figuras 25 e 26 é mostrado o ciclo diário da decomposição nas três classes urbanas de uso do solo da ICU obtida com a temperatura a 2 metros e da superfície. Estas figuras são acompanhadas pelas Tabelas 12 e 13, que resumem os principais dados médios para os períodos diurno e noturno de cada classe urbana de uso do solo. Os valores entre parêntesis nas tabelas correspondem aos dados obtidos para a ICU4_HIST da secção anterior. Os perfis da ICU para as diferentes classes urbanas de uso do solo são semelhantes, mas de intensidade menor aos obtidos para a ICU4 HIST. No entanto, o perfil correspondente à ICU_FUT a 2 metros para a baixa intensidade residencial tem uma intensidade bastante mais baixa que os da ICU4_HIST. Como veremos em seguida, esta diferença na temperatura poderá estar relacionada com a diferente direção e intensidade do vento médio das duas simulações.



Figura 25 – Decomposição do ciclo diário da ICU da HW do futuro longínquo, obtida a partir da temperatura a 2 metros, para as diferentes classes urbanas de uso do solo.

Figura 26 – O mesmo que a Figura 25, mas para a temperatura da superfície.

Tabela 12 - Sumário da decomposição da ICU obtida a partir da temperatura a 2 metros, para as várias classes de uso do solo urbanas. Unidades (°C). Valores entre parêntesis correspondem aos dados da ICU4_HIST.

	Baixa Intensidade Residencial		Alta Intensidade Residencial		Comercial/Industrial	
ICU	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna
ICU_FUT	0.10 (0.41)	0.14 (0.79)	0.36 (0.73)	2.24 (2.77)	0.25 (0.61)	2.43 (2.84)

Tabela 13 – O mesmo que a Tabela 13, mas para a ICU obtida a partir da temperatura da superfície.

	Baixa Intensidade Residencial		Alta Intensidade Residencial		Comercial/Industrial	
ICU	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna	Média Diurna	Média Noturna
ICU_FUT	0.76 (2.09)	1.81 (2.47)	3.68 (5.06)	5.09 (5.57)	3.35 (4.72)	5.63 (5.90)

Na Figura 27 são mostrados os campos das médias temporais e máximos absolutos da ICU_FUT durante o período diurno e noturno da HW. Na Figura 28 é mostrado o mesmo que a Figura 27, mas para a ICU obtida através dos campos da temperatura da superfície. Como vimos anteriormente, a intensidade média da ICU no ML é maior durante o período noturno do que durante o período diurno. No entanto, estão presentes valores negativos de ICU na região de baixa intensidade residencial que se estende desde o norte da Freguesia dos Olivais até à Freguesia de Penha de França, e que indica que a temperatura nesta região é mais baixa na presença de uso do solo urbano do que se a região estivesse ocupada pela classe rural de uso solo da simulação NURB_FUT. Esta ilha de frio parece estar relacionada com a presença de vento médio predominantemente de norte e que acaba por arrefecer com maior facilidade este “corredor” urbano de menor intensidade residencial. Nos restantes pontos urbanos de baixa intensidade residencial, a intensidade da ICU é praticamente nula durante o período noturno e diurno. Durante o período noturno a intensidade do vento é muito baixa e maioritariamente de sudoeste. Para as classes de alta intensidade residencial e comercial/industrial, a intensidade média noturna da ICU chega a atingir os 4°C e a máxima os 8°C em alguns pontos. Tal como se verificou para as simulações da HW do período HIST, o padrão da ICU diurno é bastante uniforme e pouco intenso, não havendo grande distinção entre a temperatura das diferentes classes urbanas de uso do solo. Este é aliás o padrão das ICUs consideradas neste estudo e obtidas a partir dos campos da temperatura a 2 metros. Os padrões médios da ICU obtida a partir da temperatura da superfície e para período diurno são semelhantes aos da temperatura a 2 metros, mas de maior intensidade.

	Diurno	Noturno
	ICU_FUT	
Média temporal		
Máximo absoluto		

Figura 27 - - Campos médios e máximos absolutos temporais da ICU obtida para a HW do clima futuro, obtida a partir dos campos da temperatura a 2 metros no Município de Lisboa, durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita). Valores apresentados em °C. Os campos das médias temporais têm sobrepostos os campos da média temporal do vento a 10 metros da simulação urbana com a qual se determinou a ICU. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$.

	Diurno	Noturno
	ICU_FUT	
Média temporal		
Máximo absoluto		

Figura 28 - O mesmo que a Figura 27, mas para a temperatura da superfície. $5 \text{ m s}^{-1} = 18 \text{ km h}^{-1}$.

4. Conclusões

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 mudança 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 de calor sensível gerado por fontes de calor antropogénico, devido ao consumo de calor sensível 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 geram o maior impacto na ICU, aumentado 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 relatório 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 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 parece influenciar 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 avetado pelo vento.

De acordo com as conclusões e análise acima descritas, seria interessante considerar em estudos futuros a relação entre diferentes regimes de vento e a intensidade da ICU em Lisboa, bem como o impacto da introdução de medidas para a redução dos efeitos na ICU devidos às características dos materiais urbanos. Neste último aspeto, a avaliação da introdução de telhados verdes ou o aumento da refletividade das superfícies urbanas seria importante. Segundo Lopes et al. (2013), os regimes de vento típicos durante o verão em Lisboa são em 45% dos dias de Norte (“nortada”), e em 30% dos dias de verão ocorrem brisas do estuário do Tejo ou do oceano. É também durante o verão que a intensidade da ICU é mais elevada, principalmente durante a noite. Tanto a HW de 2003, estudada no relatório da fase 2, como a HW identificada nas simulações climáticas do período **LONG**, 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 está em acordo com o obtido por Lopes et al. (2013) usando dados de observações para o período de 2004 a 2012.

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.

5. Referências

- DGEG/MEc, PORDATA. 2017. “Consumo de Energia Eléctrica: Total e Por Tipo de Consumo.” Retrieved December 11, 2019 (<https://www.pordata.pt/Municipios/Consumo+de+energia+eléctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-25>).
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.
- Feng, Jin-Ming, Yong-Li Wang, Zhu-Guo Ma, and Yong-He Liu. 2012. “Simulating the Regional Impacts of Urbanization and Anthropogenic Heat Release on Climate across China.” *Journal of Climate* 25(20):7187–7203.
- Giorgetta, Marco A., Johann Jungclaus, Christian H. Reick, Stephanie Legutke, Michael Bo, Victor Brovkin, Traute Crueger, Monika Esch, Kerstin Fieg, Ksenia Glushak, Veronika Gayler, Helmuth Haak, Heinz-dieter Hollweg, Tatiana Ilyina, Stefan Kinne, Luis Kornblueh, Daniela Matei, Thorsten Mauritsen, Uwe Mikolajewicz, Wolfgang Mueller, Dirk Notz, Felix Pithan, Thomas Raddatz, Sebastian Rast, Rene Redler, Erich Roeckner, Hauke Schmidt, Reiner Schnur, Joachim Segschneider, Katharina D. Six, Martina Stockhause, Claudia Timmreck, Heinrich Widmann, Karl-h Wieners, and Martin Claussen. 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.
- Hall, J. E. 2015. *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Health Sciences.
- INE, IGP, PORDATA. 2018. “N.º Médio de Indivíduos Por Km².” Retrieved December 11, 2019 (<https://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional-452>).
- INE. 2018. “Inquérito à Mobilidade Nas Áreas Metropolitanas Do Porto e de Lisboa 2017.” 17.
- 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*. Vol. 82.
- Kusaka, Hiroyuki, Hiroaki Kondo, Yokihiro 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.
- Liu, Ruiting and Zhiwei Han. 2016. “The Effects of Anthropogenic Heat Release on Urban Meteorology and Implication for Haze Pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region.” 2016.

- 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 M. Nikolopoulou. *Advances in Meteorology* 2013:487695.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- 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." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119(22):12,500-512,512.
- 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.
- 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.
- Shiguang, Miao and Chen Fei. 2014a. "Enhanced Modeling of Latent Heat Flux from Urban Surfaces in the Noah / Single-Layer Urban Canopy Coupled Model." 57(10):2408–16.
- Shiguang, Miao and Chen Fei. 2014b. "Enhanced Modeling of Latent Heat Flux from Urban Surfaces in the Noah / Single-Layer Urban Canopy Coupled Model." (August).
- Yang, Jiachuan, Zhi-hua Wang Fei, Shiguang Miao, Mukul Tewari, and James A. Voogt. 2015. "Enhancing Hydrologic Modelling in the Coupled Weather Research and Forecasting – Urban Modelling System." 87–109.
- Yang, Jiachuan and Zhi-hua Wang. 2015. "Optimizing Urban Irrigation Schemes for the Trade-off between Energy and Water Consumption." 107:335–44.