



# RELATÓRIO

FASE 2 | JUNHO 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:



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

## Relatório

**Fase 2** – Estudo e Cartografia da Ilha de Calor Urbano para o clima atual na AML.

**Início** – 20 de janeiro de 2019

**Fim** – 24 de junho de 2019

**Elaborado por:** Alfredo Rocha e Rui Silva

## Índice

1. Introdução .....	1
2. Dados e métodos .....	2
2.1 Modelo WRF.....	2
2.1.1 Modelos de canópia urbana.....	4
2.1.2 Dados de uso do solo e topográficos.....	6
2.1.3 Experiências de simulação .....	11
2.2 Dados de observações .....	11
3. Resultados .....	13
3.1 Validação das simulações numéricas .....	13
3.2 Ilha de calor urbano.....	16
3.3 Fluxos de calor à superfície .....	38
3.4 Perfis verticais: Temperatura potencial, energia cinética turbulenta, e altura da camada limite planetária.....	46
4. Conclusões.....	50
5. Referências.....	52
6. Anexos.....	55

## Lista de Figuras

Figura 1 - Configuração de domínios usada nas simulações WRF. ....	3
Figura 2 – Esquematização do funcionamento dos modelos de canópia urbana SLUCM (à esquerda) e BEP (à direita). ....	5
Figura 3 – a) Mapa de uso do solo do USGS24 para o domínio D-4 (1x1 km); b) Mapa de uso do solo CORINE 2012 reclassificado para as categorias USGS33 no domínio D-4; c) o mesmo que b), mas para o domínio D-5 (333x333 m); d) o mesmo que em c), mas ampliado para a região do Município de Lisboa (ML). ....	7
Figura 4 – Mapa da topografia no domínio D-5 após suavização com filtro 1-2-1 em três passagens. ....	10
Figura 5 – Localização das estações meteorológicas do IPMA usadas na validação das diferentes experiências de simulação (esquerda) e correspondência na grelha de 333 m com as diferentes classes de uso do solo. ....	12
Figura 6 – Perfil temporal para o período de onda de calor entre a temperatura a 2 metros e observada nas estações meteorológicas Gago Coutinho (em cima) e Geofísico (em baixo). ....	15
Figura 7 – (a) Mapa com representação na grelha de 333 m das áreas ocupadas pela totalidade das classes urbanas e rurais e (b) respetiva ampliação sobre a região ML; (c) mapa com a representação das áreas ocupadas por cada uma das classes urbanas e (d) respetiva ampliação sobre a região do ML (d). ....	17
Figura 8 - Séries temporais (para o período de HW e simulação URB46) da média espacial da temperatura a 2 metros e da superfície, nos pontos urbanos (curva vermelha) e rurais (curva verde) do domínio D-5, e do ML (curva tracejada vermelha). ....	18
Figura 9 - Ciclo diário da média espacial da temperatura a 2 metros (em cima) e da superfície (em baixo) nos pontos urbanos (curva vermelha) e rurais (curva verde) do domínio D-5, e nos pontos urbanos do ML (curva vermelha tracejada) da simulação URB46. ....	19
Figura 10 - Ciclo diário da média espacial da temperatura a 2 metros (em cima) e da superfície (em baixo) nos pontos urbanos do domínio D-5 das simulações URB46 (curva sólida vermelha) e NURB46 (curva sólida verde) e nos pontos urbanos do ML para as mesmas simulações (curva vermelha tracejada e curva verde tracejada, respetivamente). ....	21
Figura 11 - Decomposição da média espacial no domínio D-5 das diferenças entre os pontos urbanos das simulações URB46 e NURB46 para temperatura a 2 metros (em cima) e	

temperatura da superfície (em baixo). Curvas multiplicadas pela fração de área ocupada por cada classe urbana em relação à área urbana total no domínio.....	22
Figura 12 - O mesmo que a Figura 11, mas considerando apenas pontos e médias espaciais no ML.....	23
Figura 13 - O mesmo que a Figura 11, mas sem a multiplicação pela fração de área urbana de cada classe.....	24
Figura 14 -O mesmo que a Figura 12, mas sem a multiplicação pela fração de área urbana de cada classe.....	24
Figura 15 - Campos médios e máximos absolutos temporais das diferenças da temperatura a 2 metros (simulação URB46) entre cada ponto urbano e a média dos pontos rurais do domínio D05, durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW; D-5 – todo o domínio; ML – ampliação sobre o ML. Valores apresentados em °C. <b>Método 1.</b> ....	26
Figura 16 - Campos médios e máximos absolutos temporais das diferenças da temperatura a 2 metros entre as simulações URB46 e NURB46, durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW; D-5 – todo o domínio; ML – ampliação sobre o ML. Valores apresentados em °C. <b>Método 2.</b> ....	28
Figura 17 – Igual à Figura 15, mas para a temperatura da superfície. <b>Método 1.</b> ....	29
Figura 18 - Igual à Figura 16, mas para a temperatura da superfície. <b>Método 2.</b> ....	30
Figura 19 – Campos das médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) da temperatura a 2 metros na simulação URB46.....	32
Figura 20 - O mesmo que a Figura 19, mas para os campos da temperatura da superfície. ....	33
Figura 21 - Campos das diferenças médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) da temperatura a 2 metros entre as simulações URB46 e NURB46. <b>Método 2.</b> ....	34
Figura 22 – O mesmo que a Figura 21, mas para os campos da temperatura da superfície. <b>Método 2.</b> .....	35
Figura 23 - Campos médios e máximos absolutos temporais da temperatura a 2 metros (simulação URB46) durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW; AML – todo o domínio D05; ML – ampliação sobre o ML. Valores apresentados em °C. ....	36
Figura 24 - O mesmo que a Figura 23, mas para a temperatura da superfície. ....	37
Figura 25 – Em cima: Ciclo diário da média espacial do fluxo de calor latente nos pontos urbanos na simulação URB46 (curva vermelha) e NURB46 (curva verde); Em baixo: Decomposição (para as diferentes classes de uso do solo urbano) da média espacial das	

diferenças dos fluxos de calor sensível entre os pontos urbanos das simulações URB46 e NURB46. <b>Método 2</b> .....	39
Figura 26 - Campos das médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) do Fluxo de calor latente na simulação URB46.....	40
Figura 27 - Campos das diferenças médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) dos fluxos de calor latente entre as simulações URB46 e NURB46. <b>Método 2</b> .....	41
Figura 28 – O mesmo que a Figura 25, mas para o fluxo de calor sensível.....	43
Figura 29 - O mesmo que a Figura 26, mas para o fluxo de calor sensível. ....	44
Figura 30 - O mesmo que a Figura 27, mas para o fluxo de calor sensível. ....	45
Figura 31 – Comparação entre as séries temporais da altura da camada limite planetária para os pontos urbanos (média espacial) nas simulações URB46 e NURB46. ....	46
Figura 32 - Perfis verticais da energia cinética turbulenta para o dia 1 de agosto de 2003 no ponto $x = 116$ , $y = 81$ das simulações URB46 (curva vermelha) e NURB46 (curva verde). ....	47
Figura 33 – O mesmo que a Figura 32, mas para a temperatura potencial. ....	49



## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parametrizações físicas usadas nas simulações WRF.....	4
Tabela 2 – Sumário dos parâmetros térmicos e dinâmicos usados nos modelos de canópia urbana SLUCM e BEP. *n.d. – parâmetro não disponível no modelo em questão. ....	5
Tabela 3 – Equivalências usadas na reclassificação das classes de uso do solo do CORINE 2012 para as classes do USGS 33, respetiva nomenclatura e propriedades térmicas. ....	8
Tabela 4 – Parâmetros geométricos atribuídos às diferentes categorias urbanas de uso do solo dentro do modelo WRF, nos modelos de canópia urbana SLUCM e BEP. ....	10
Tabela 5 - Sumário das experiências de simulação WRF realizadas para o estudo a ICU da cidade de Lisboa. ....	11
Tabela 6 – Estações meteorológicas do IPMA com respetivas coordenadas geográficas, altitude, e coordenadas nos pontos do modelo.....	12
Tabela 7 – Estatísticas e medidas de erro dos dados da temperatura a 2 metros observados nas estações do IPMA para o período de HW. ....	55
Tabela 8 -Estatísticas e medidas de erro dos dados da temperatura a 2 metros obtidas para a simulação URB46, através da comparação com os dados observados nas estações do IPMA...	56
Tabela 9 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação NURB46.....	56
Tabela 10 – O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação CTRL46.....	57
Tabela 11 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação URB49. ....	57
Tabela 12 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação NURB49.....	58
Tabela 13 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação CTRL49. ....	58



## Lista de Acrónimos

AEA – Agência Europeia do Ambiente

AML – Área Metropolitana de Lisboa

ARW- Atmospheric Research Weather

BEP – Building environment parameterization

CLC – Coordination of information on the environment land cover

ECMWF – Centro de Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo

HW - Onda de calor

ICU – Ilha de calor urbano

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

SLUCM - Single-layer urban canopy model

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

SVF – Sky view factor

UCM – Modelo de canópia urbana

USGS – United States Geographical Service

WRF – Weather Research and Forecast model



## 1. Introdução

Com o presente relatório pretende-se estudar e mapear a ilha de calor urbano (ICU) para a Área Metropolitana de Lisboa (AML) e Município de Lisboa (ML) no clima atual, através de simulações numéricas utilizando o módulo dinâmico de previsão do tempo do modelo Weather Research and Forecast -Atmospheric Research Weather (WRF-ARW).

O efeito de ilha de calor urbano é caracterizado pela existência de excesso de temperatura nas áreas urbanas em comparação com as áreas rurais envolventes. Esta diferença resulta do facto dos aglomerados urbanos apresentarem superfícies e estruturas com propriedades radiativas, termodinâmicas e aerodinâmicas distintas das áreas rurais.

A ilha de calor urbano (ICU) é mais visível durante o período noturno e perante condições sinóticas de vento fraco ou calma, podendo ser atribuída a vários fatores: (i) aumento da absorção de radiação de curto comprimento de onda durante o dia pelas superfícies urbanizadas, bem como o aumento da superfície de absorção da radiação pelas paredes verticais ao início e ao final do dia; (ii) diminuição da libertação de radiação de longo comprimento de onda durante grande parte do dia e noite, devido à geometria dos edifícios e, conseqüente, redução do fator de visibilidade do céu (svf – sky view factor) nos chamados “canyons urbanos”; (iii) diminuição da absorção de calor sensível pela sua transformação em calor latente, devido à impermeabilização das superfícies e diminuição da fração de vegetação (Grimmond and Oke, 1995; Markowski and Richardson, 2010).

Junto à superfície, a pluma térmica gerada pela libertação de calor das superfícies urbanas pode originar correntes ascendentes, com convergência de ar nos níveis mais baixos da atmosfera e divergência nos níveis mais altos. Durante o dia, sob condições de vento mais intenso, a ICU dissipa-se com maior facilidade devido à turbulência gerada sobre as diferentes estruturas urbanas e, por isso, a ICU não é tão visível. Por outro lado, a pluma formada sobre as estruturas urbanas pode ser transportada (advecção) pelo vento e influenciar a temperatura de regiões adjacentes.

Partindo do trabalho desenvolvido no relatório da fase 1, “Estudo do Regime das Ondas de Calor na AML – clima atual e futuro”, neste trabalho procedeu-se à elaboração de um conjunto de simulações numéricas com o WRF-ARW acoplado com dois modelos de canópia urbana (UCMs) distintos. As simulações referem-se a um episódio de onda de calor (HW) que ocorreu entre os dias 29 de julho e 3 de agosto de 2003, e que foi identificado no relatório da fase. A

escolha deste episódio de HW para o estudo da ICU na cidade AML, e particularmente na cidade de Lisboa, deve-se ao facto de que é durante estes eventos que ICU poderá ter maior impacto socioeconómico.

## 2. Dados e métodos

### 2.1 Modelo WRF

Nas simulações numéricas da ICU para o clima atual na AML, utilizou-se o modelo WRF-ARW (daqui em diante referido apenas como WRF) v3.9 (Skamarock *et al.*, 2008) forçado nas condições iniciais e de fronteira por dados das reanálises ERA-*Interim* do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF) – a descrição detalhada destas reanálises pode ser consultada em Dee *et al.* (2011). Os dados foram obtidos com resolução horizontal de  $0.75 \times 0.75^\circ$ , uma frequência temporal de 6h, e dispostos em 37 níveis isobáricos de pressão de pressão (i.e., 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000 hPa).

Todas as simulações foram feitas com modo de feedback ativo (i.e., com troca de informação entre domínios nos dois sentidos), numa configuração de cinco domínios aninhados de resoluções 81 km (D-1: 60x55 pts), 27 km (D-2: 94x55 pts), 9 km (D-3: 154x139 pts), 1 km (D-4: 145x154 pts) e 333 m (D-5: 181x160 pts). Note-se, que os três primeiros domínios abrangem a mesma área geográfica das simulações climáticas do relatório da fase 1, tendo-se adicionado dois domínios de maior resolução, centrados na região da AML e no ML, à configuração anterior. A esquematização dos domínios de simulação é mostrada na Figura 1.

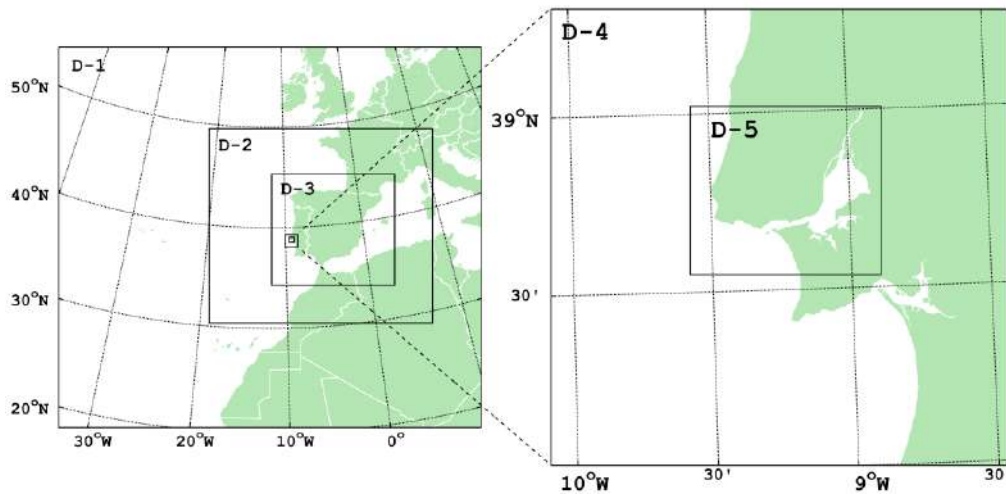


Figura 1 - Configuração de domínios usada nas simulações WRF.

O período de simulação para a HW representativa do clima atual decorre das 00h do dia 28 de julho às 00h do dia 4 de agosto de 2003, no entanto as primeiras 24 horas de simulação não são considerados na análise de resultados, por pertencerem ao período de “spin-up” do modelo (Warner, 2010) e as últimas 12 também não serão consideradas.

Na representação dos processos físicos que ocorrem na canóia urbana, foram usados em diferentes experiências de simulação (descritas na secção 2.1.3) os modelos de canóia urbana simples e de 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. A forma como cada um destes modelos representa os processos da canóia urbana (descritos na secção 0) obriga à utilização de uma configuração de níveis verticais diferente nas simulações com cada tipo de modelo. Simulações com o modelo SLUCM usaram 46 níveis eta na vertical, estando o primeiro nível acima da superfície - que define o limite superior da canóia urbana - a ~54 m. As simulações com modelo BEP foram configuradas com 49 níveis eta na vertical, tendo-se definido três níveis abaixo do limite superior da canóia urbana (~54 m) aos ~40 m, ~24 m e ~12 m.

As restantes parametrizações físicas usadas em todas as simulações são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parametrizações físicas usadas nas simulações WRF.

Parametrizações	Opções
Microfísica	WSM6 (Hong and Lim, 2006)
Cúmulos	Grell-Freitas (desligado em D-4 e D-5; Grell and Freitas, 2014)
Camada limite	Boulac PBL (Bougeault and Lacarrere, 1989)
Superfície	Revised MM5 (Jiménez <i>et al.</i> , 2012)
Radiação LW	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM, Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Radiação SW	Dudhia scheme (Dudhia, 1988)

### 2.1.1 Modelos de canóia urbana

Como descrito anteriormente, nas experiências de simulação realizadas neste estudo foram usados os modelos de camada única e de multicamada, SLUCM e BEP. Estes modelos estão acoplados ao modelo de superfície Noah LSM (Chen and Dudhia, 2001), que lhes providencia as condições de fronteira, como fluxos de calor sensível, latente e temperatura da superfície. O acoplamento é feito através do parâmetro de percentagem urbana (fração urbana), que representa a proporção de superfícies impermeáveis dentro de cada célula da grelha do modelo. Desta forma, e para cada ponto da grelha, o modelo de superfície calcula os fluxos e temperatura da superfície para as áreas urbanas vegetadas e para as superfícies antropogénicas.

O modelo SLUCM assume ruas e avenidas infinitamente longas e reconhece a natureza tridimensional das superfícies urbanas. Nas ruas e avenidas é assumido o efeito das sombras, reflexão e aprisionamento da radiação, e é atribuído um perfil vertical de vento predefinido.

O modelo BEP, que interage diretamente com o esquema de camada limite planetária, é um modelo mais sofisticado que reconhece a natureza tridimensional das superfícies urbanas, bem como a distribuição vertical das fontes e sumidouros de calor, humidade e momento. Este modelo tem uma grande influência na termodinâmica da subcamada rugosa da canóia urbana e, por isso, na parte mais baixa da camada limite planetária (Chen *et al.*, 2011).

Uma representação esquemática a comparar os dois modelos é mostrada na Figura 2.

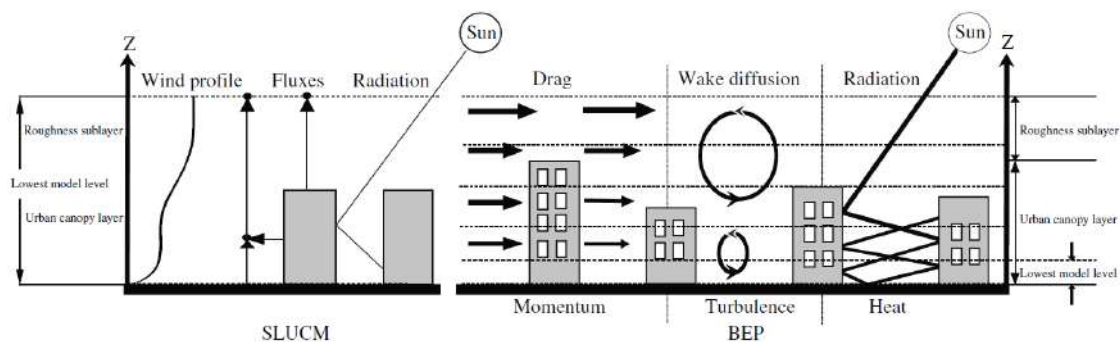


Figura 2 – Esquemática do funcionamento dos modelos de canóia urbana SLUCM (à esquerda) e BEP (à direita).

Os principais parâmetros térmicos definidos para cada modelo estão definidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos parâmetros térmicos e dinâmicos usados nos modelos de canóia urbana SLUCM e BEP.  
\*n.d. – parâmetro não disponível no modelo em questão.

Parâmetro térmico/dinâmico	Modelo urbano	
	SLUCM	BEP
CAPR: Capacidade térmica do telhado [ $10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ]		1
CAPB: Capacidade térmica das paredes [ $10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ]		1
CAPG: Capacidade térmica do solo (ruas) [ $10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ]		1.4
AKSR: Condutividade térmica dos telhados [ $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]		0.67
AKSB: Condutividade térmica das paredes [ $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]		0.67
AKSG: Condutividade térmica do solo (ruas) [ $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]		0.4004
ALBR: Albedo dos telhados [Fração]		0.2
ALBB: Albedo das paredes [Fração]		0.2
ALBG: Albedo do solo (ruas) [Fração]		0.2
EPSR: Emissividade dos telhados		0.9
EPSB: Emissividade das paredes		0.9
EPSG: Emissividade do solo (ruas)		0.95
ZOB: Comprimento de rugosidade para a quantidade de movimento sobre as paredes [m]	0.0001	n.d.*
ZOG: Comprimento de rugosidade para a quantidade de movimento sobre o solo (ruas) [m]		0.01
ZOR: Comprimento de rugosidade para a quantidade de movimento sobre os telhados [m]	n.d.*	0.01

## 2.1.2 Dados de uso do solo e topográficos

### a. Uso do solo

Para uma maior precisão na representação da heterogeneidade do uso do solo pelo modelo WRF nas escalas mais pequenas, os dados de uso do solo predefinidos no modelo (dados 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. Apesar dos dados de uso do solo definidos no modelo serem do USGS24, o modelo WRF consegue identificar categorias do USGS33 (com 33 categorias). De forma aos dados CLC 2012 serem reconhecidos pelo módulo geográfico do WRF, estes foram reclassificados para as categorias USGS33, que contém três categorias urbanas (Baixa densidade residencial, alta densidade residencial, comercial e industrial) ao invés de uma só categoria disponível nos dados USGS24. Assim, é possível obter um maior detalhe e diferenciação das diferentes classes urbanas, relativamente à classificação USGS24. A Tabela 3, adaptada de Pineda *et al.*, 2004, sumariza a equivalência entre as 44 categorias de uso do solo do CORINE 2012 e as 33 categorias do USGS, bem como as propriedades térmicas de cada classe após a reclassificação. Na Tabela 4 encontra-se a descrição das principais características de cada uma das classes urbanas, nomeadamente a altura média dos edifícios de cada classe, largura dos telhados e ruas, e fração de vegetação. Note-se que os valores apresentados na tabela representam a média em cada célula da grelha do modelo, com a dimensão de 333x333 m<sup>2</sup> (domínio D-5). Na Figura 3a) e b) é feita uma comparação entre a landuse na grelha do modelo no domínio D-4 (grelha 1x1 km) com os dados originais do USGS (esquerda) e os dados CLC 2012 (direita). Em baixo, a Figura 3c mostra a representação do uso do solo pelo modelo no domínio D-5 (grelha 333x333 m).



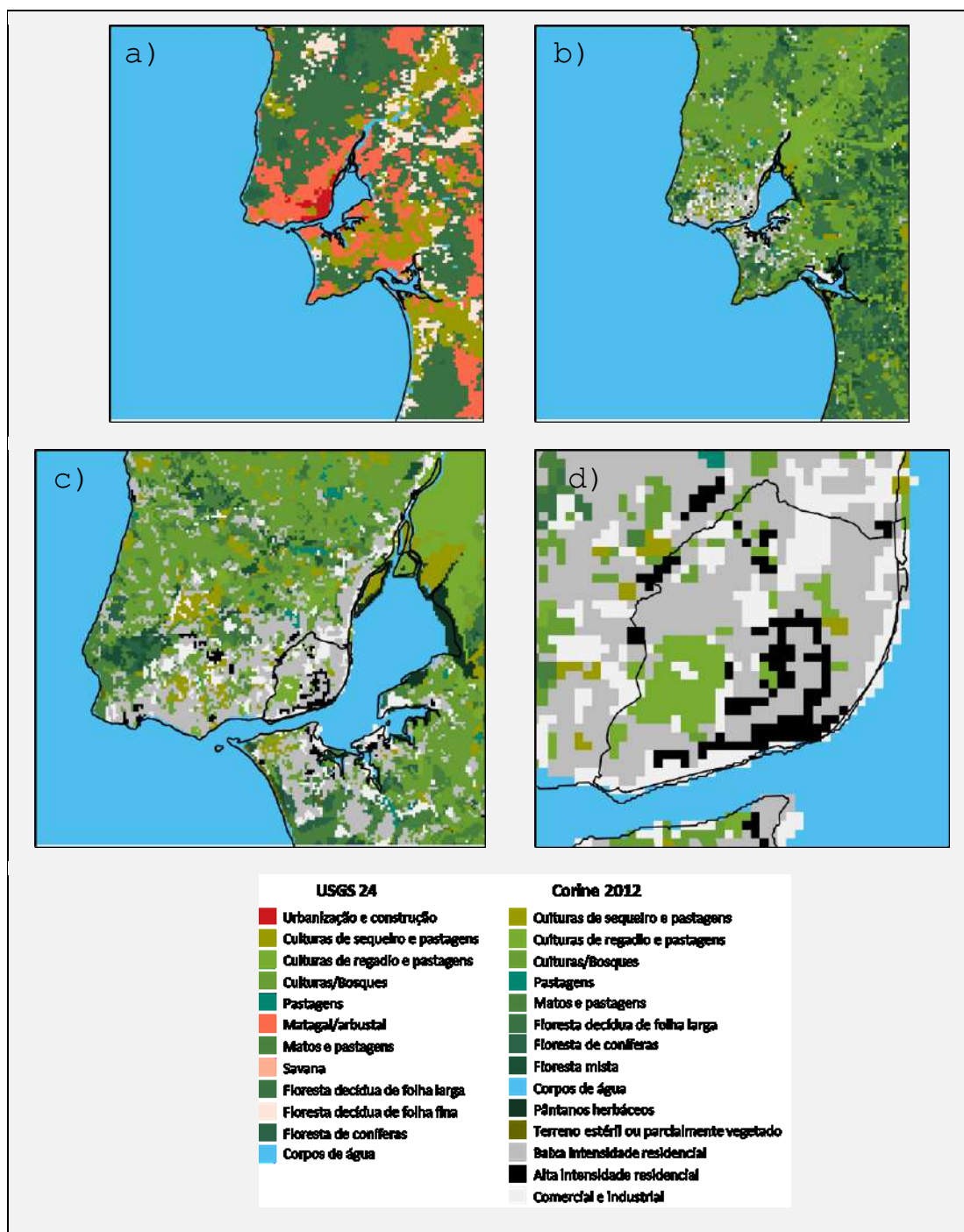


Figura 3 – a) Mapa de uso do solo do USGS24 para o domínio D-4 (1x1 km); b) Mapa de uso do solo CORINE 2012 reclassificado para as categorias USGS33 no domínio D-4; c) o mesmo que b), mas para o domínio D-5 (333x333 m); d) o mesmo que em c), mas ampliado para a região do Município de Lisboa (ML).





17	Olivais								
19	Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes								
20	Sistemas culturais e parcelares complexos								
21	Agricultura com espaços naturais e seminaturais								
22	Sistemas agroflorestais								
26	Vegetação herbácea natural	7	Pastagens	19	15	96	12	3	20.8
27	Matos	9	Matos e pastagens	20	15	95	6	3	20.8
28	Vegetação esclerofila								
29	Florestas abertas, cortes e novas plantações								
23	Florestas de folhosas	11	Floresta decídua de folha larga	16	30	93	50	4	25
24	Florestas de resinosas	14	Floresta de coníferas	12	30	95	50	4	29.2
25	Florestas mistas	15	Floresta mista	13	30	97	50	4	41.8
40	Cursos água	16	Corpos de água	8	100	98	0.01	6	9
41	Planos de água								
42	Lagoas costeiras								
43	Desembocaduras fluviais								
44	Mar e oceano								
35	Turfeiras	17	Pântanos herbáceos	14	60	95	20	6	29.2
36	Sapais								
37	Salinas e aquicultura litoral								
38	Zonas entre marés								
39	Sapais								
30	Praias, dunas e areais	19	Terreno estéril ou parcialmente vegetado	25	2	90	1	2	12
31	Rocha nua								
32	Vegetação esparsa								
33	Áreas ardidas								
34	Glaciares e neve perpétua	24	Gelo ou neve	55	95	95	0.1	5	9

Tabela 4 – Parâmetros geométricos atribuídos às diferentes categorias urbanas de uso do solo dentro do modelo WRF, nos modelos de canópi 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)		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	

#### b. Topografia

Para a representação da topografia no modelo foram usados dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA, com uma resolução de ~90 m. Devido à existência de variações acentuadas da topografia entre alguns pontos da grelha do modelo, e de forma a evitar a instabilidade do mesmo, aplicou-se um filtro de suavização “1-2-1” com três passagens sobre o campo da topografia nos dois domínios de maior resolução. A Figura 4 mostra a representação da topografia para o domínio D-5.

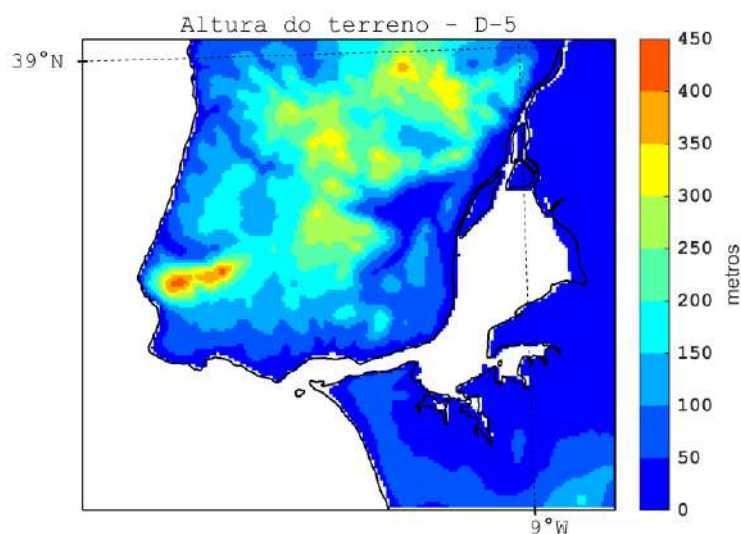


Figura 4 – Mapa da topografia no domínio D-5 após suavização com filtro 1-2-1 em três passagens.

### 2.1.3 Experiências de simulação

Para o estudo da ICU no clima atual usando o modelo WRF, procedeu-se à execução de um conjunto de simulações numéricas forçadas pelas reanálises ERA-Interim, com o intuito de se testar a influência do uso de diferentes UCMs ou da substituição das classes urbanas de uso do solo por classes rurais. As simulações em que se substituíram as categorias urbanas de uso do solo permitem a análise da ICU entre pontos com a mesma localização em relação aos das simulações em que estas categorias estão presentes. Um sumário das seis experiências de simulação feitas é mostrado na Tabela 5, onde as iniciais URB, NURB e CTRL representam simulações com UCM e categorias de uso de solo urbanas, com UCM sem categorias de uso do solo urbanas, e de controle (i.e., sem UCM), respetivamente. O número no final das iniciais representa o número de níveis verticais de cada simulação.

Tabela 5 - 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

## 2.2 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 6 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. Na Figura 5 é mostrada a localização das estações no mapa sobrepostas no mapa do uso do solo.

Tabela 6 – 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

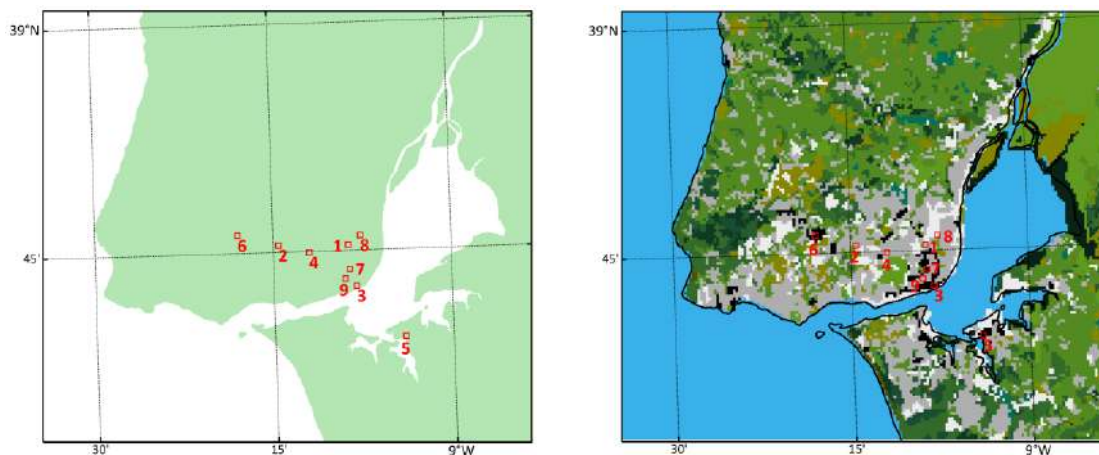


Figura 5 – Localização das estações meteorológicas do IPMA usadas na validação das diferentes experiências de simulação (esquerda) e correspondência na grelha de 333 m com as diferentes classes de uso do solo.

### 3. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à simulação da ICU na AML para o clima atual e para o domínio D-5 (333 m). Para isso, começa por fazer-se a análise e validação estatística das diferentes experiências de simulação, através comparação entre as séries temporais de dados observados e modelados da temperatura a 2 metros. Depois, é apresentada uma análise aos campos e séries temporais da temperatura a 2 metros, temperatura da superfície e dos fluxos de calor (latente e sensível) na superfície, com vista à obtenção da distribuição e intensidade da ilha de calor urbano, e contribuição das diferentes classes de uso do solo. Por fim, é feita a avaliação do impacto da ICU na altura da camada limite planetária, distribuição vertical da temperatura potencial (i.e., pela avaliação da estabilidade vertical) e energia cinética turbulenta.

#### 3.1 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 descritas na secção 2.2. As estatísticas e medidas de erro foram calculadas com base nos trabalhos de Keyser e Anthes (1977), e Pielke (2002) da seguinte forma:

- Desvio dos dados modelados em relação aos observados:

$$\phi'_i = \phi_i - \phi_{i,obs}$$

- Média dos desvios dos dados modelados em relação aos observados (Viés):

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi'_i$$

- Erro médio quadrático (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{i,obs})^2}{N}}$$

- Desvio padrão do erro (STDE):

$$STDE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \phi'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi'_i \right)^2}$$

- Erro médio quadrático depois da remoção do viés (RMSD):

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(\phi_i - \phi') - (\phi_{i,obs} - \phi'_{obs})]^2}{N}}$$

- Desvio-padrão dos dados modelados e observados (STD\_MOD e STD\_OBS):

$$STD\_MOD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^2}{N}}$$

$$STD\_OBS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\phi_{i,obs} - \bar{\phi}_{obs})^2}{N}}$$

- Coeficiente de correlação de Pearson entre dados modelados e observados (r):

$$r(\phi_{mod}, \phi_{obs}) = \frac{cov(\phi_{mod}, \phi_{obs})}{STD\_MOD \times STD\_OBS}$$

Nos Anexos são mostradas as tabelas com o sumário dos erros e estatísticas de cada uma das seis experiências de simulação em comparação com os dados das estações observacionais mostradas Figura 5. Com o objetivo de se escolher a simulação com melhor acordo entre dados modelados e observados, escolheram-se as simulações URB46 e NURB46 para fazer a avaliação e análise da ICU. Assim, nas próximas secções serão apenas consideradas estas experiências de simulação.

Na Figura 6 é mostrada como exemplo a comparação entre a temperatura a 2 metros modelada na simulação URB46 e observada para as estações Gago Coutinho (em cima) e do Geofísico (em baixo).



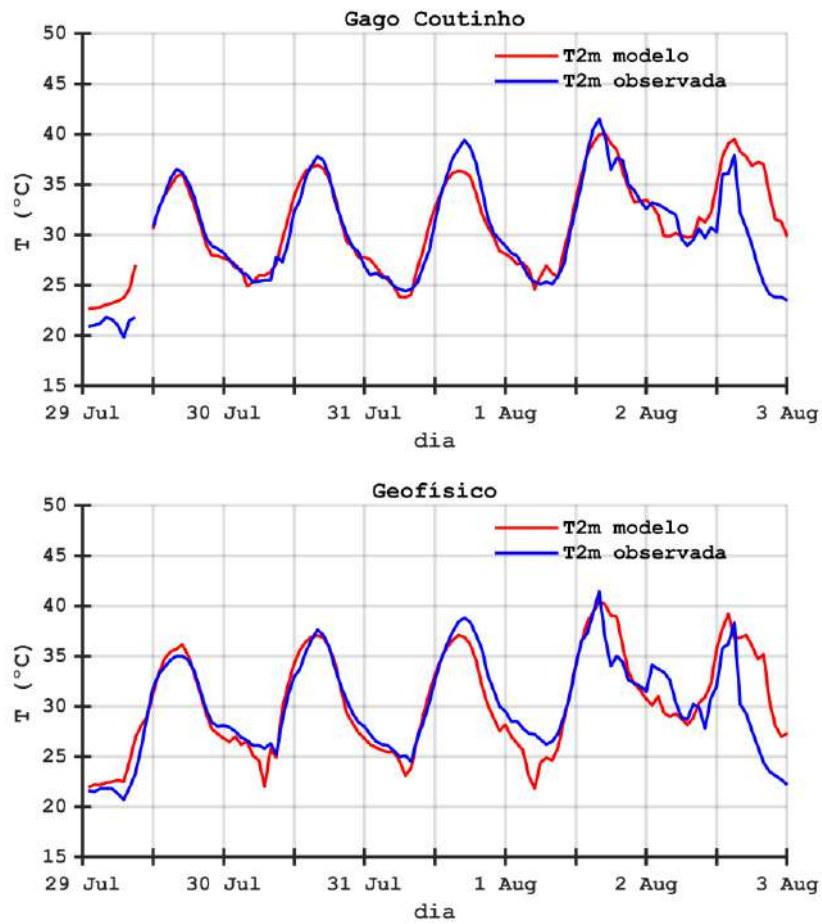


Figura 6 – Perfil temporal para o período de onda de calor entre a temperatura a 2 metros e observada nas estações meteorológicas Gago Coutinho (em cima) e Geofísico (em baixo).

### 3.2 Ilha de calor urbano

Como descrito no Capítulo 1, o efeito de ICU caracteriza-se pela existência de um excesso de temperatura nas zonas urbanas relativamente às zonas rurais envolventes. Isto deve-se principalmente à diferença das suas propriedades físicas, térmicas, e geométricas, mas também às diferentes características geográficas de cada local.

Assim, 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 e 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 exclusiva 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 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.

Para facilitar a análise, procedeu-se à separação do uso do solo em duas classes principais – “rural” e “urbana” - Figura 7a. A classe urbana foi depois dividida em 3 subclasses – “baixa intensidade residencial”, “alta intensidade residencial”, e “comercial e industrial” – Figura 7c. A Figura 7 b e d, mostram também a ampliação das classes para o ML.

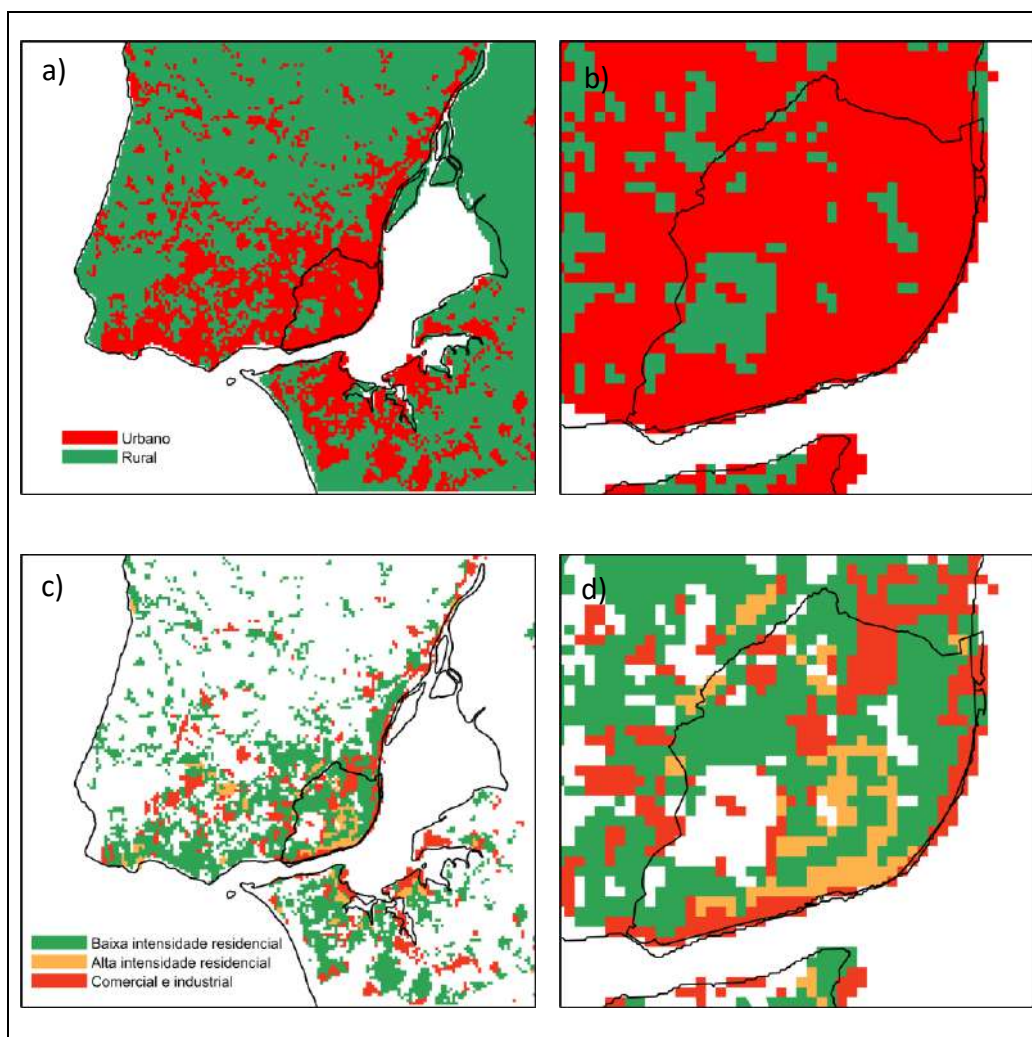


Figura 7 – (a) Mapa com representação na grelha de 333 m das áreas ocupadas pela totalidade das classes urbanas e rurais e (b) respetiva ampliação sobre a região ML; (c) mapa com a representação das áreas ocupadas por cada uma das classes urbanas e (d) respetiva ampliação sobre a região do ML (d).

Na Figura 8 é feita a comparação entre as séries temporais (para o período de HW e simulação URB46) da média espacial da temperatura a 2 metros e da superfície, nos pontos urbanos (curva sólida vermelha) e rurais (curva sólida verde) do domínio D-5, e nos pontos urbanos do ML (curva tracejada vermelha). Como se pode observar, as principais diferenças entre as duas curvas centram-se no período noturno e diurno, no entanto estas são mais evidentes durante a noite. Quando se consideram as médias espaciais no domínio D-5 (curvas sólidas vermelha e verde), a temperatura noturna urbana é superior à rural, mas entre o meio dia e o final da tarde a temperatura urbana é menor do que a rural, exceto quando se considera a média da temperatura a 2 metros nos pontos urbanos do ML (curva tracejada). Neste último caso a temperatura é, em todas as horas do dia, superior à média dos pontos rurais no domínio D-5 (curva sólida verde).

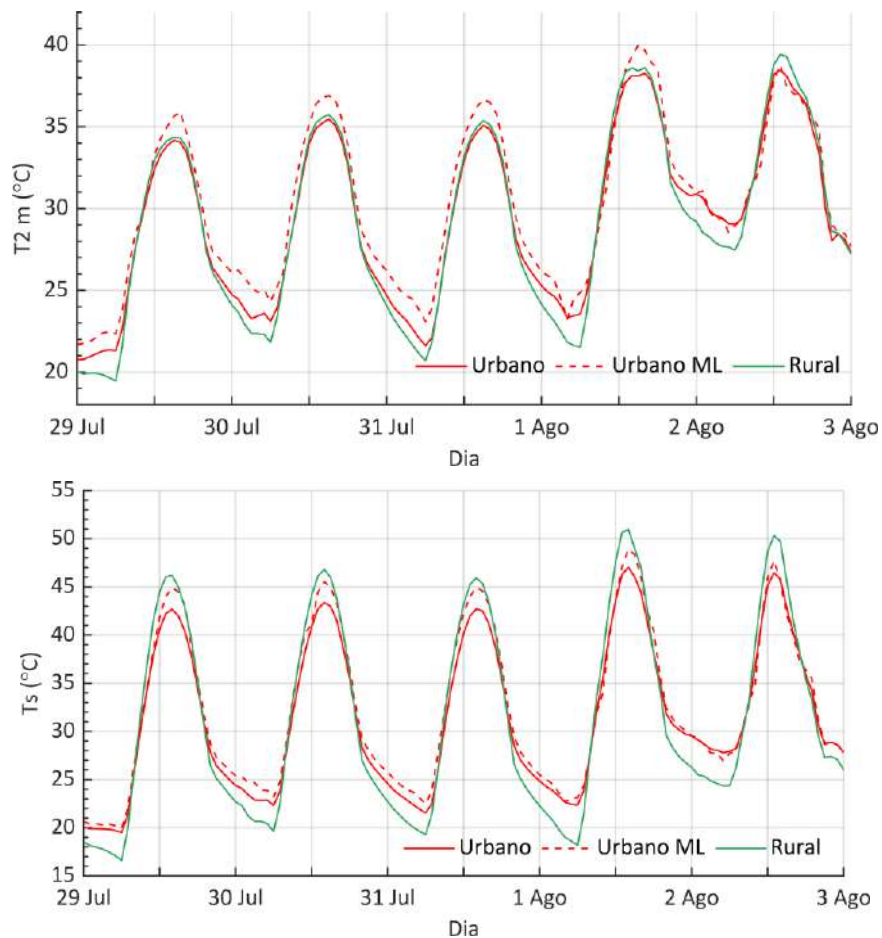


Figura 8 - Séries temporais (para o período de HW e simulação URB46) da média espacial da temperatura a 2 metros e da superfície, nos pontos urbanos (curva vermelha) e rurais (curva verde) do domínio D-5, e do ML (curva tracejada vermelha).

A Figura 9 mostra o mesmo que a Figura 8, mas em termos de ciclo diário (i.e., média horária de cinco períodos de 24 horas). Tal como foi referido para a figura anterior, durante a noite a temperatura a 2 metros nos pontos urbanos é superior à rural (i.e., efeito de ilha de calor urbano). Por outro lado, durante o dia, a temperatura urbana é inferior à rural quando se considera a média espacial sobre o domínio D-5 e superior à rural quando se considera a média espacial nos pontos urbanos do ML. A temperatura a 2 metros e da superfície nos pontos urbanos do ML é sempre superior à média nos pontos urbanos do domínio D-5. Como esperado a amplitude térmica da temperatura da superfície entre zonas urbanas e rurais é superior à da temperatura a 2 metros, porque a primeira depende principalmente das propriedades dos materiais que constituem as diferentes superfícies, enquanto a segunda, sendo uma propriedade atmosférica, é mais influenciada pelo vento e turbulência na canóia urbana. Em termos de magnitude, as diferenças médias da temperatura da superfície chegam

aos 4°C durante o dia e a 2-3°C durante a noite, enquanto para a temperatura a 2 metros as diferenças atingem 2°C no período noturno e menos de 1°C no período diurno.

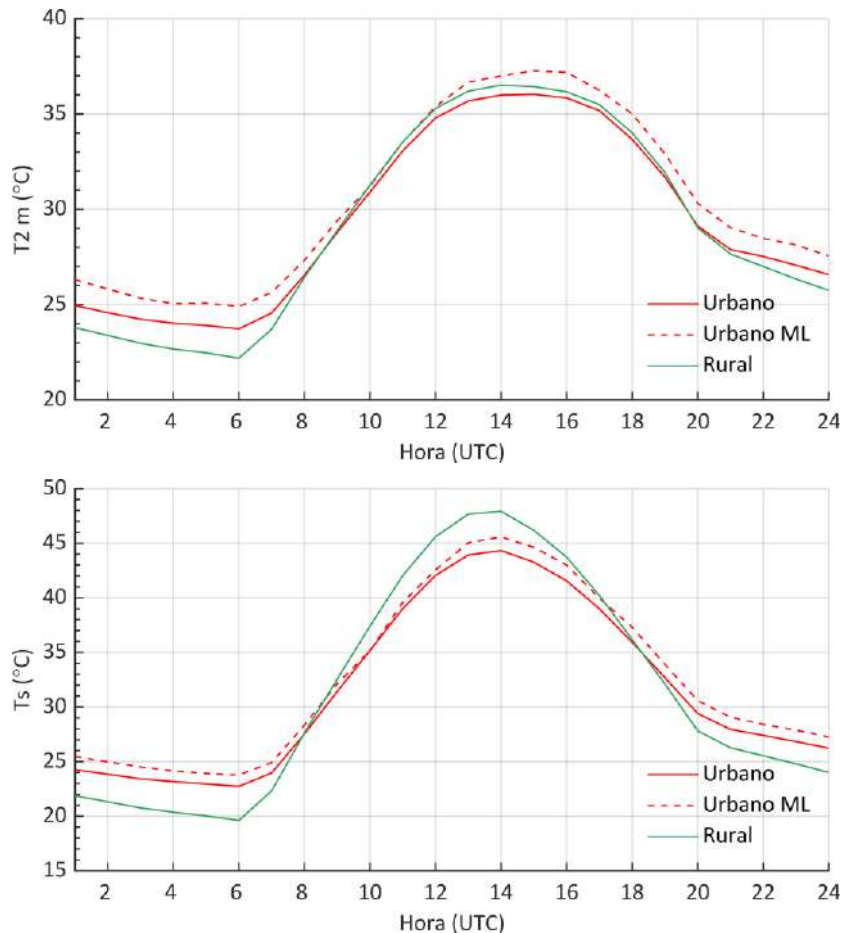


Figura 9 - Ciclo diário da média espacial da temperatura a 2 metros (em cima) e da superfície (em baixo) nos pontos urbanos (curva vermelha) e rurais (curva verde) do domínio D-5, e nos pontos urbanos do ML (curva vermelha tracejada) da simulação URB46.

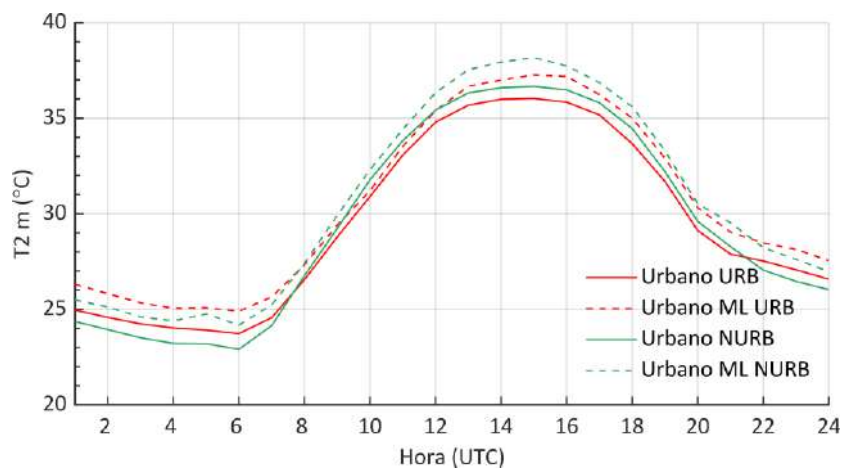
A metodologia de avaliação da ICU anterior, que faz a comparação entre as médias espaciais da temperatura urbana e rural, inclui os efeitos de fatores inerentes à geografia (método 1). Assim, apesar de se estar a comparar médias espaciais de pontos rurais e pontos urbanos, o tipo de uso do solo não é a única característica que as distingue, uma vez que a topografia e localização dos diferentes pontos que contribuem para a média também pode representar uma parte importante desta diferença nas temperaturas.

Para remover os efeitos anteriores, procedeu-se à comparação entre pontos urbanos no caso em que estão ocupados por classes urbanas de uso do solo, com pontos urbanos no caso em que as classes urbanas são substituídas pela classe rural mais comum no domínio D-5, isto é, pela categoria 6 (culturas/bosques) das classes do USGS (ver Tabela 3). Esta comparação foi



feita usando os pontos urbanos das simulações URB46 e NURB46, permitindo assim analisar apenas os efeitos da urbanização (método 2).

A Figura 10 mostra o ciclo diário (média de cinco períodos de 24 horas) da temperatura a 2 metros (em cima) e da superfície (em baixo) para os pontos urbanos, no caso em que estes estão ocupados por classes urbanas de uso do solo (curvas a vermelho, simulação URB46) e no caso em que estão ocupados por classes rurais (curvas a verde, simulação NURB46). As curvas sólidas representam valores médios nos pontos urbanos do domínio D-5 e as a tracejado representam valores médios nos pontos urbanos do ML. A análise da figura permite retirar conclusões semelhantes às da análise da ICU obtidas pelo método anterior (Figura 9), no entanto a intensidade da ilha ICU noturna não é tão elevada, tanto para a temperatura a 2 metros como na temperatura da superfície. Durante o dia os resultados são semelhantes. Mais uma vez, durante o período noturno, a temperatura urbana é inferior à rural, tanto nas médias do domínio D-5, como nas médias do ML. Para a temperatura da superfície as diferenças médias chegam aos 4°C durante o dia e a 2-3°C durante a noite, enquanto para a temperatura a 2 metros estas diferenças atingem 2°C nos dois períodos.



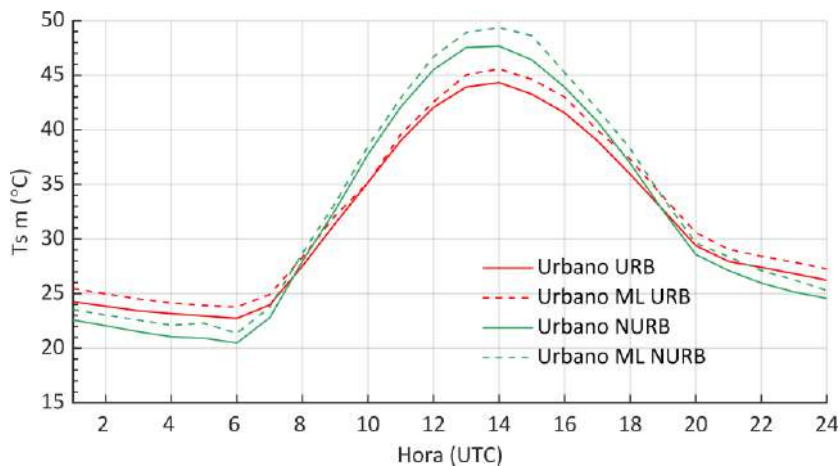


Figura 10 - Ciclo diário da média espacial da temperatura a 2 metros (em cima) e da superfície (em baixo) nos pontos urbanos do domínio D-5 das simulações URB46 (curva sólida vermelha) e NURB46 (curva sólida verde) e nos pontos urbanos do ML para as mesmas simulações (curva vermelha tracejada e curva verde tracejada, respetivamente).

A diferença entre as curvas vermelha e verde do domínio D-5 e do ML, representadas respetivamente pela curva azul da Figura 11 e Figura 12, respetivamente, permite-nos obter a intensidade da ICU tanto em termos de temperatura a 2 metros como de temperatura da superfície. Estas curvas podem ser decompostas na contribuição de cada classe urbana de uso do solo (i.e., alta intensidade residencial, baixa intensidade residencial, comercial e industrial). É claro que esta contribuição depende da fração de área urbana que cada classe ocupa, sendo por isso necessário multiplicar cada uma das curvas pela fração de área que ocupam em relação à área urbana total. Da análise das Figura 11 e Figura 12, é possível perceber-se que para este evento de HW a ICU é um fenómeno fundamentalmente noturno, uma vez que durante a noite as diferenças entre as simulações URB46 e NURB46 são positivas, indicando que as temperaturas nos pontos urbanos são maiores quando as categorias urbanas estão presentes. Durante o período diurno, as diferenças assumem valores negativos, indicando a existência de uma “ilha de frio”. Para a temperatura a 2 metros e da superfície, considerando os pontos urbanos em todo o domínio D-5 (Figura 11), a ICU noturna atinge valores médios superiores a 0.6°C e 1.5°C, respetivamente. No período diurno, as diferenças negativas nas localizações urbanas são de cerca de -0.7°C na temperatura a 2 metros e podem atingir os -3.5°C na temperatura da superfície. Todas as classes urbanas contribuem positivamente para a ICU durante a noite e negativamente durante o dia. Quando se considera os pontos urbanos do ML (Figura 12) os resultados são semelhantes aos da Figura 11.



Nas Figura 13 e Figura 14 é mostrada a mesma decomposição das Figura 11 e Figura 12, mas sem multiplicação pela fração de área ocupada por cada classe urbana, o que permite inferir o impacto absoluto que cada uma das classes tem na temperatura local, independentemente da área que ocupa. Durante o período noturno as classes de alta intensidade residencial, e comercial e industrial são as que têm maior temperatura a 2 metros e da superfície, contribuindo positivamente e com maior intensidade para o aumento da temperatura local. A classe de baixa intensidade residencial tem, em termos absolutos, um contributo bastante menor para o aumento da ICU em comparação com as outras classes urbanas. Durante o período diurno todas as classes apresentam valores de temperatura semelhantes e inferiores em relação ao caso em que as classes urbanas são substituídas pela classe rural, embora a classe de baixa intensidade residencial no ML tenha uma temperatura da superfície inferior às restantes classes.

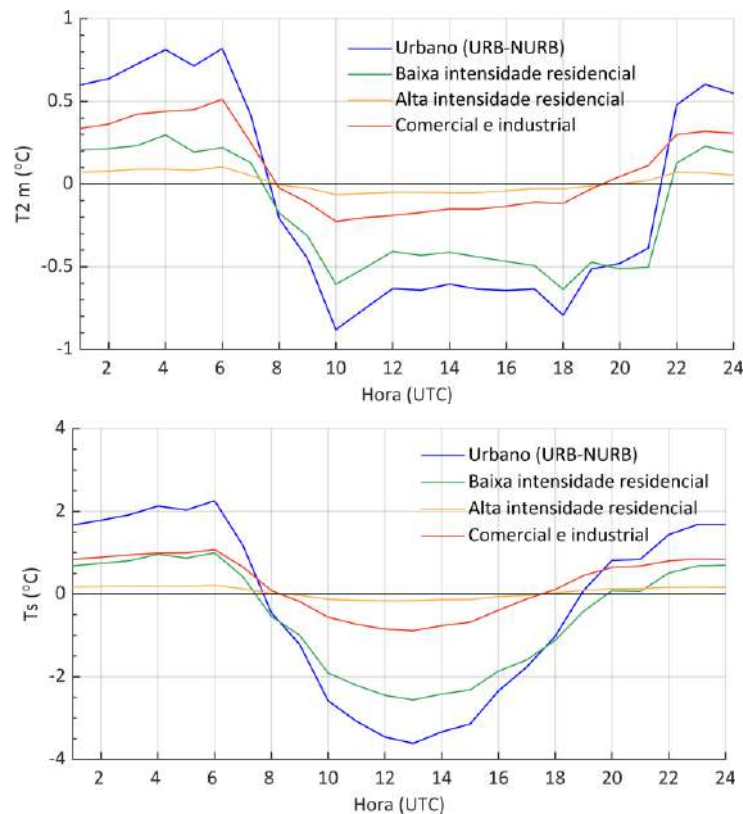


Figura 11 - Decomposição da média espacial no domínio D-5 das diferenças entre os pontos urbanos das simulações URB46 e NURB46 para temperatura a 2 metros (em cima) e temperatura da superfície (em baixo). Curvas multiplicadas pela fração de área ocupada por cada classe urbana em relação à área urbana total no domínio.

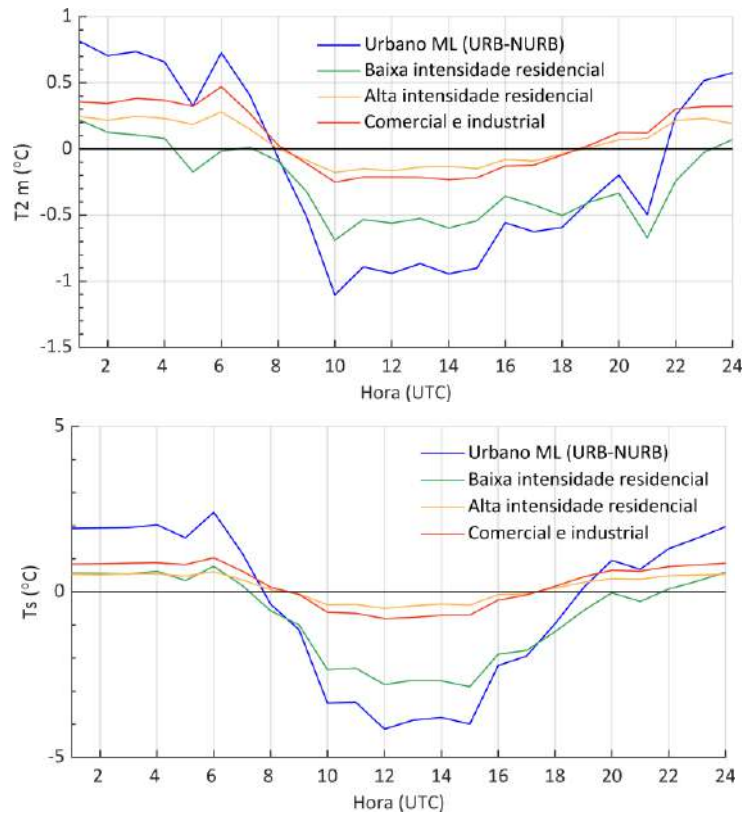
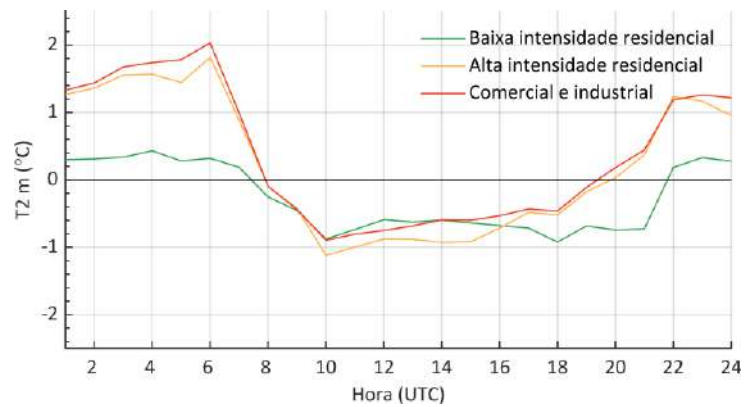


Figura 12 - O mesmo que a Figura 11, mas considerando apenas pontos e médias espaciais no ML



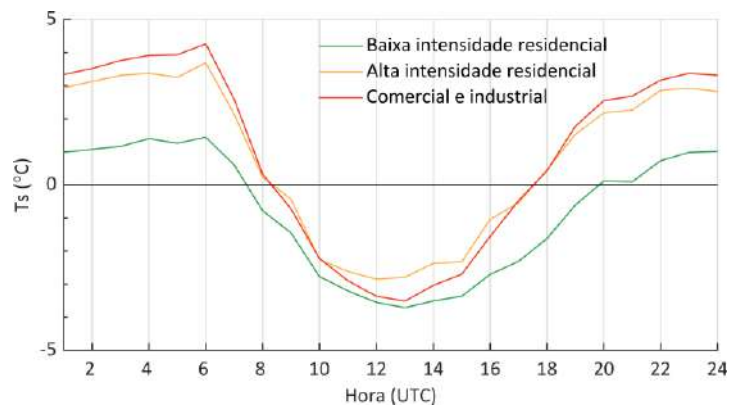


Figura 13 - O mesmo que a Figura 11, mas sem a multiplicação pela fração de área urbana de cada classe.

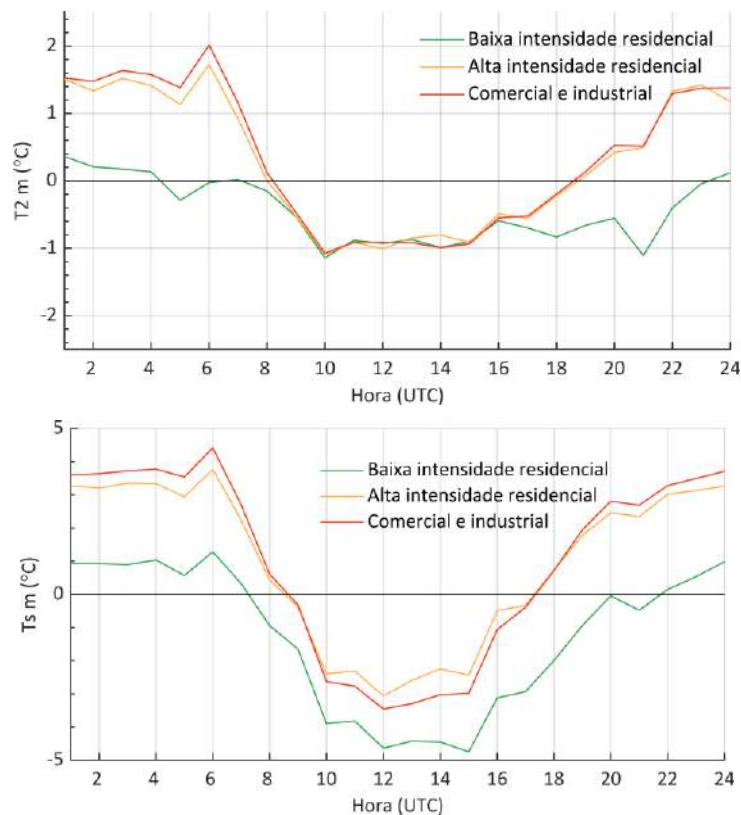


Figura 14 - O mesmo que a Figura 12, mas sem a multiplicação pela fração de área urbana de cada classe.

Depois da análise dos perfis temporais da temperatura a 2 metros e da superfície para o período de HW, passamos à análise dos seus campos espaciais recorrendo aos dois métodos enunciados no início desta secção (avaliação clássica e avaliação local da ICU).

Começando pela aplicação do método 1 (avaliação clássica da ICU), na Figura 15 são mostrados os campos médios e máximos absolutos temporais da diferença entre a temperatura de cada ponto urbano e a média espacial da temperatura rural a 2 metros no domínio D-5. Os resultados são mostrados para todo o domínio D-5 e ampliados para a região

do ML. As diferenças foram obtidas separadamente para os períodos diurno e noturno da HW. A figura permite perceber que tanto em termos de média temporal como de máximos absolutos, as maiores diferenças de temperatura se dão durante o período noturno, com especial enfoque para as zonas de alta densidade residencial e comercial e industrial, onde as temperaturas médias urbanas são em alguns pontos 3.5°C superiores à média rural e no máximo 8°C em relação à mesma. Durante o período diurno as diferenças são menores na média temporal do ML, mas em termos máximos absolutos verificam-se valores de temperatura inferiores à média da temperatura rural, principalmente nas zonas de baixa intensidade residencial. As diferenças negativas podem chegar aos 9°C no ML.

A Figura 16 mostra o mesmo que na Figura 15, mas aplicando o método 2 (avaliação local da ICU), ou seja, fazendo as diferenças da temperatura a 2 metros entre a localização dos pontos urbanos na simulação URB46 e NURB46. Esta avaliação permite-nos isolar o efeito que a urbanização tem na temperatura local, através da comparação entre cada um dos pontos urbanos no caso em que estes estão ocupados por classes urbanas ou pela classe rural. A figura mostra também que tanto em termos de média temporal como de máximos absolutos, os campos da temperatura apresentam valores com magnitudes menores em relação ao método 1. Em média, durante a HW e no período diurno, a temperatura nos pontos urbanos da simulação URB46 é menor do que a da simulação NURB46. Os máximos absolutos durante o período diurno também são negativos, exceto em alguns pontos da classe comercial e industrial. Para a média noturna, a temperatura nos pontos urbanos quando estão ocupados pela categoria rural, apresenta valores 3.5°C superiores em relação aos mesmos pontos ocupados pela classe rural. Já os máximos absolutos durante o período diurno podem atingir os 9-10°C a mais em relação à simulação NURB46.

As Figura 17 e Figura 18 mostram o mesmo que as Figura 15 e Figura 16, mas para a temperatura da superfície. Os resultados são semelhantes, mas as diferenças de temperatura têm uma maior magnitude. Os campos médios temporais e máximos absolutos mostram que no período diurno a temperatura das superfícies urbanas é, em geral, inferior à rural ou inferior ao caso em que as classes urbanas são substituídas pela classe rural.



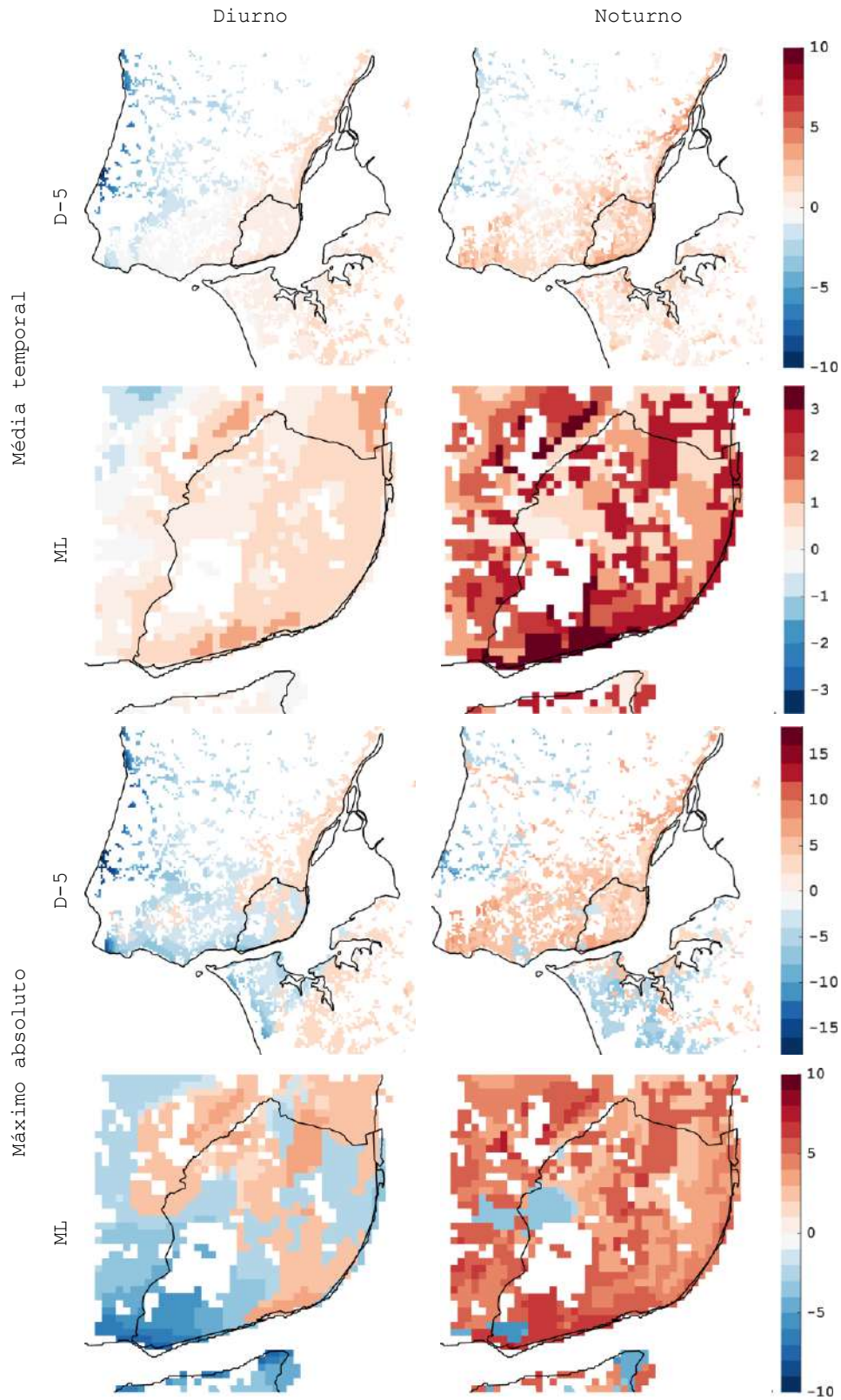
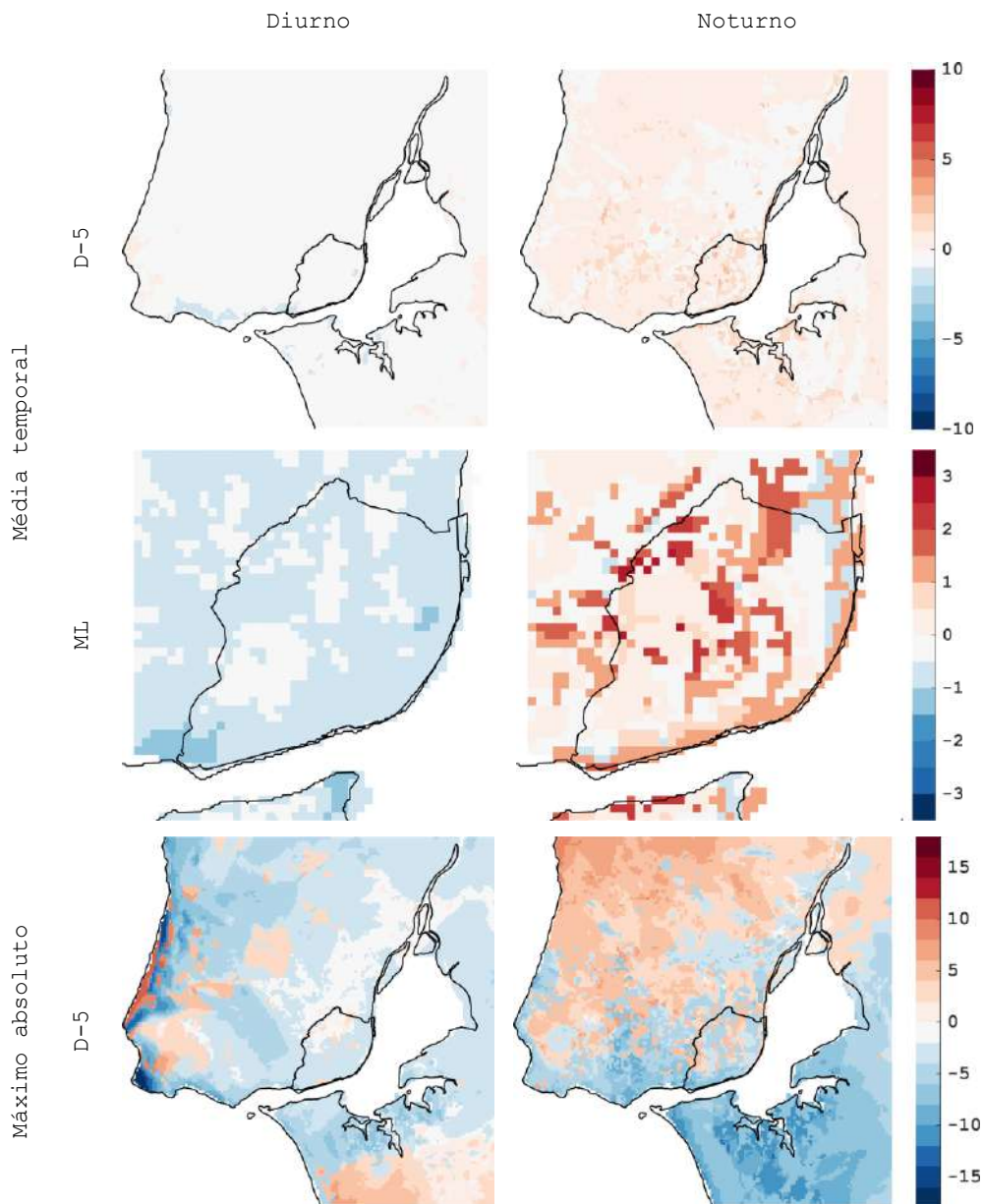


Figura 15 - Campos médios e máximos absolutos temporais das diferenças da temperatura a 2 metros (simulação URB46) entre cada ponto urbano e a média dos pontos rurais do domínio D05, durante o período diurno (esquerda)

e noturno (direita) da HW; D-5 – todo o domínio; ML – ampliação sobre o ML. Valores apresentados em °C. **Método 1.**



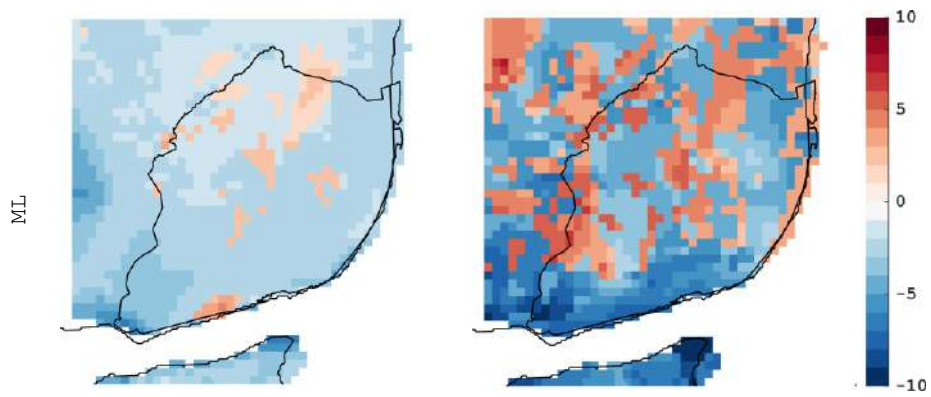


Figura 16 - Campos médios e máximos absolutos temporais das diferenças da temperatura a 2 metros entre as simulações URB46 e NURB46, durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW; D-5 – todo o domínio; ML – ampliação sobre o ML. Valores apresentados em °C. **Método 2.**



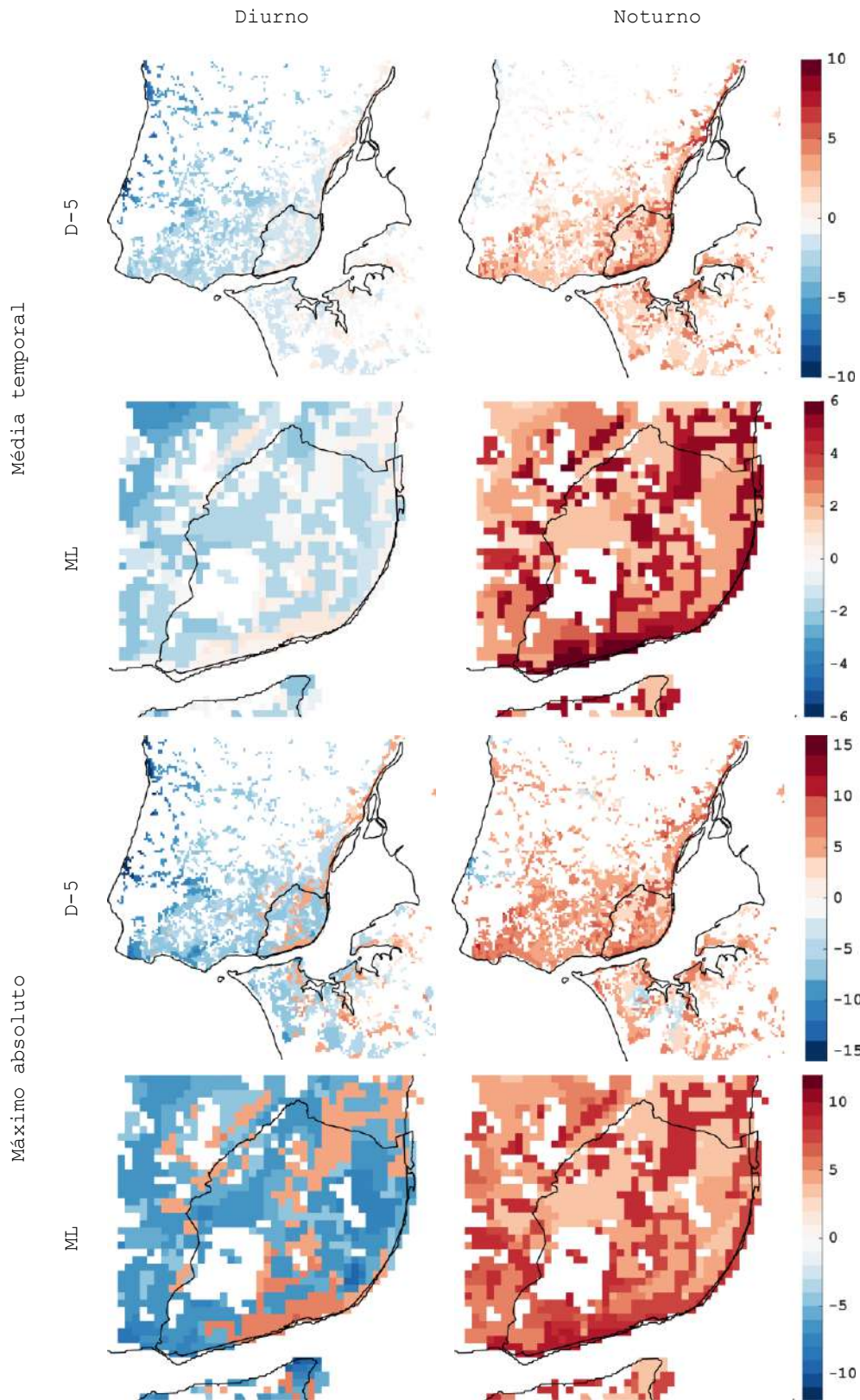


Figura 17 – Igual à Figura 15, mas para a temperatura da superfície. **Método 1.**

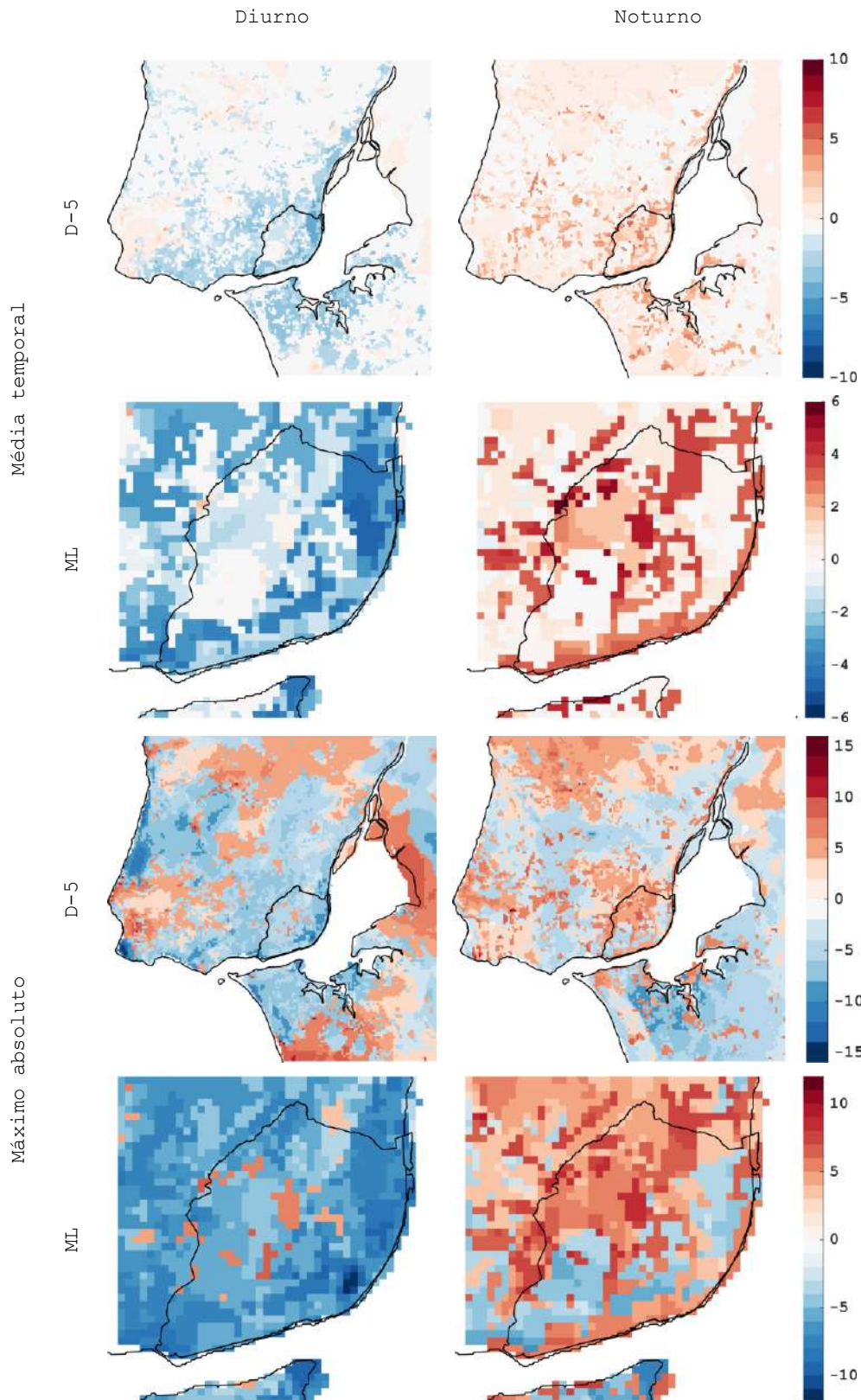


Figura 18 - Igual à Figura 16, mas para a temperatura da superfície. **Método 2.**

Nas Figura 19 e Figura 20 são mostrados os campos médios horários da temperatura a 2 metros e da superfície, juntamente com os vetores do vento médio da simulação URB46. Os campos consideram médias horárias para os cinco dias de HW, com um intervalo de 4 horas (i.e., às 00h00, 4h00, 8h00, 12h00, 16h00 e 20h00 da hora UTC). Nas Figura 21 e Figura 22 são mostrados os campos médios horários das diferenças das simulações URB46 e NURB46 para as mesmas variáveis horas do dia. Como se pode verificar pela análise das Figura 19 e Figura 20, às 8h00 a ICU não é visível, sendo pequena a diferença de temperatura entre áreas urbanas e rurais. Isto pode ser confirmado pelos campos das diferenças da temperatura a 2 metros e da superfície das simulações URB46 e NURB46 das Figura 21 e Figura 22. Às 12h00 e 16h00 as diferenças de temperatura são significativas e com valores negativos sobre as classes urbanas, o que mostra que estas classes têm uma temperatura menor em relação à simulação NURB46. Ao início da noite (i.e., às 20h00), a temperatura rural decai rapidamente em comparação com a urbana, começando a ser visíveis diferenças positivas na temperatura a 2 metros sobre algumas classes urbanas relativamente às classes rurais, principalmente sobre as classes comercial e industrial (ver Figura 21 às 20h00) do ML. Às 00h00 e às 4h00 a ICU é bastante visível tanto no campo da temperatura a 2 metros como no da temperatura da superfície, estando todas as classes urbanas com valores de temperatura superiores aos das classes rurais. As diferenças de temperatura podem chegar, em alguns locais, aos  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  na temperatura a 2 metros e a  $\pm 6^{\circ}\text{C}$  na temperatura da superfície, dependendo da hora do dia. Durante o período noturno, a presença de vento de norte com intensidades de mais de  $5\text{ ms}^{-1}$  faz com que o excesso de temperatura a 2 metros seja advetado para sul, e com que a ICU seja menos visível nos mapas médios horários da temperatura a 2 metros.

Por fim, nas Figura 23 e Figura 24 são mostrados os campos médios e máximos absolutos temporais da temperatura a 2 metros da simulação URB46 durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW. Os campos estão representados para todo o domínio D-5 e ampliados para o ML. As Figuras 1A e 2A do Anexo mostram o mesmo que as Figuras 23 e 24 para o ML com uma escala de cores que permite melhor distinguir as diferenças entre as temperaturas na região.



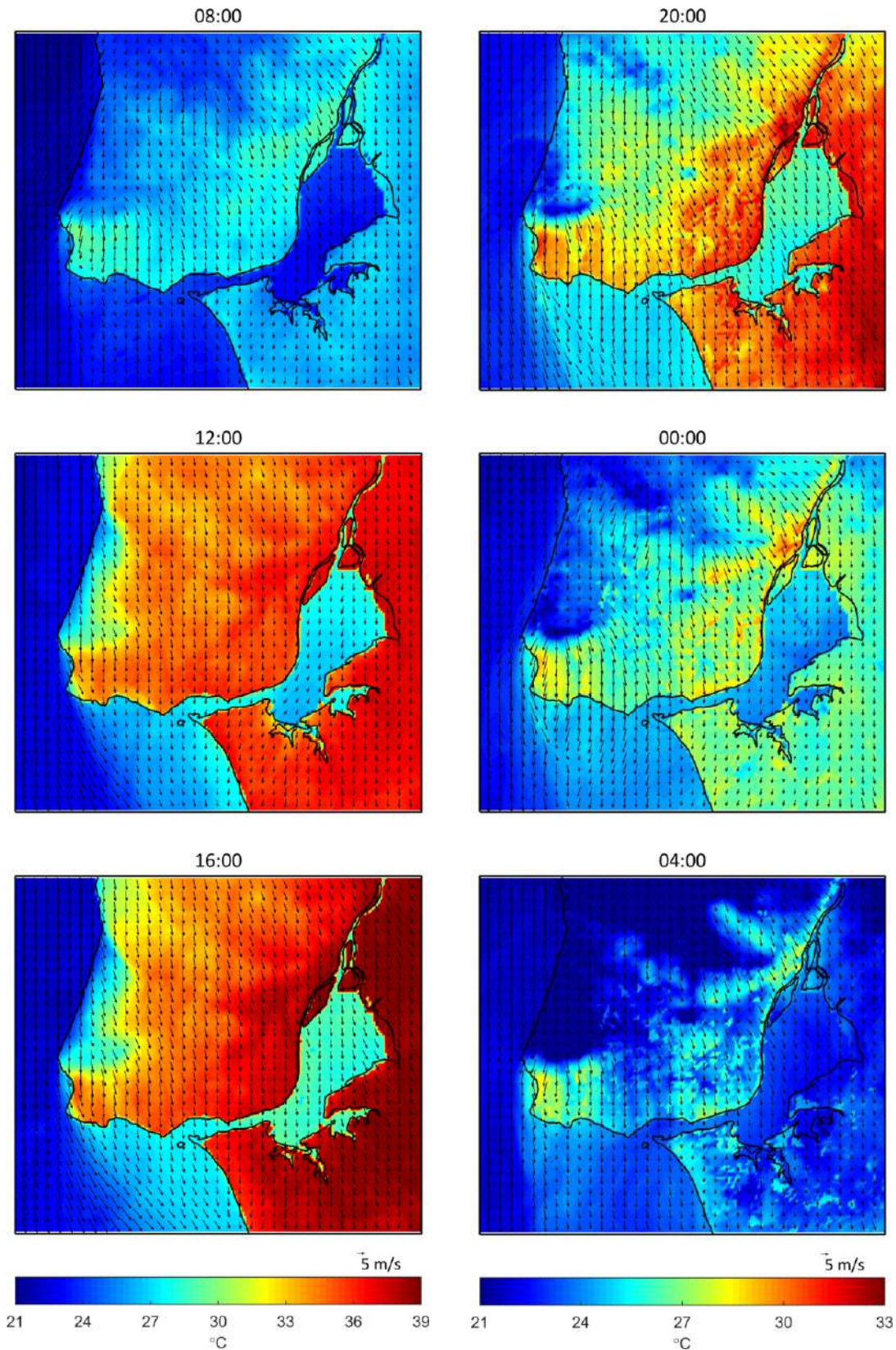


Figura 19 – Campos das médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) da temperatura a 2 metros na simulação URB46.



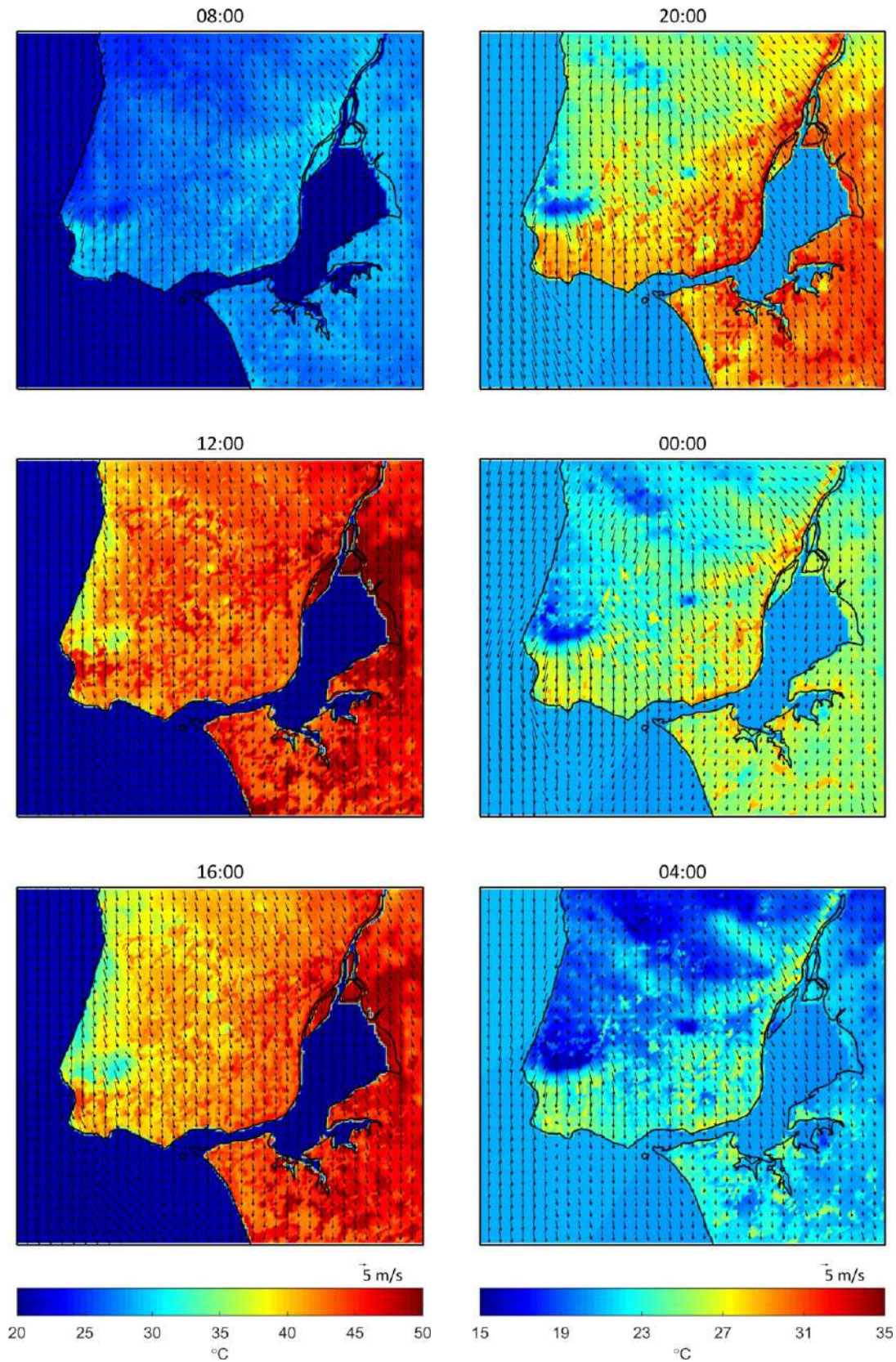


Figura 20 - O mesmo que a Figura 19, mas para os campos da temperatura da superfície.



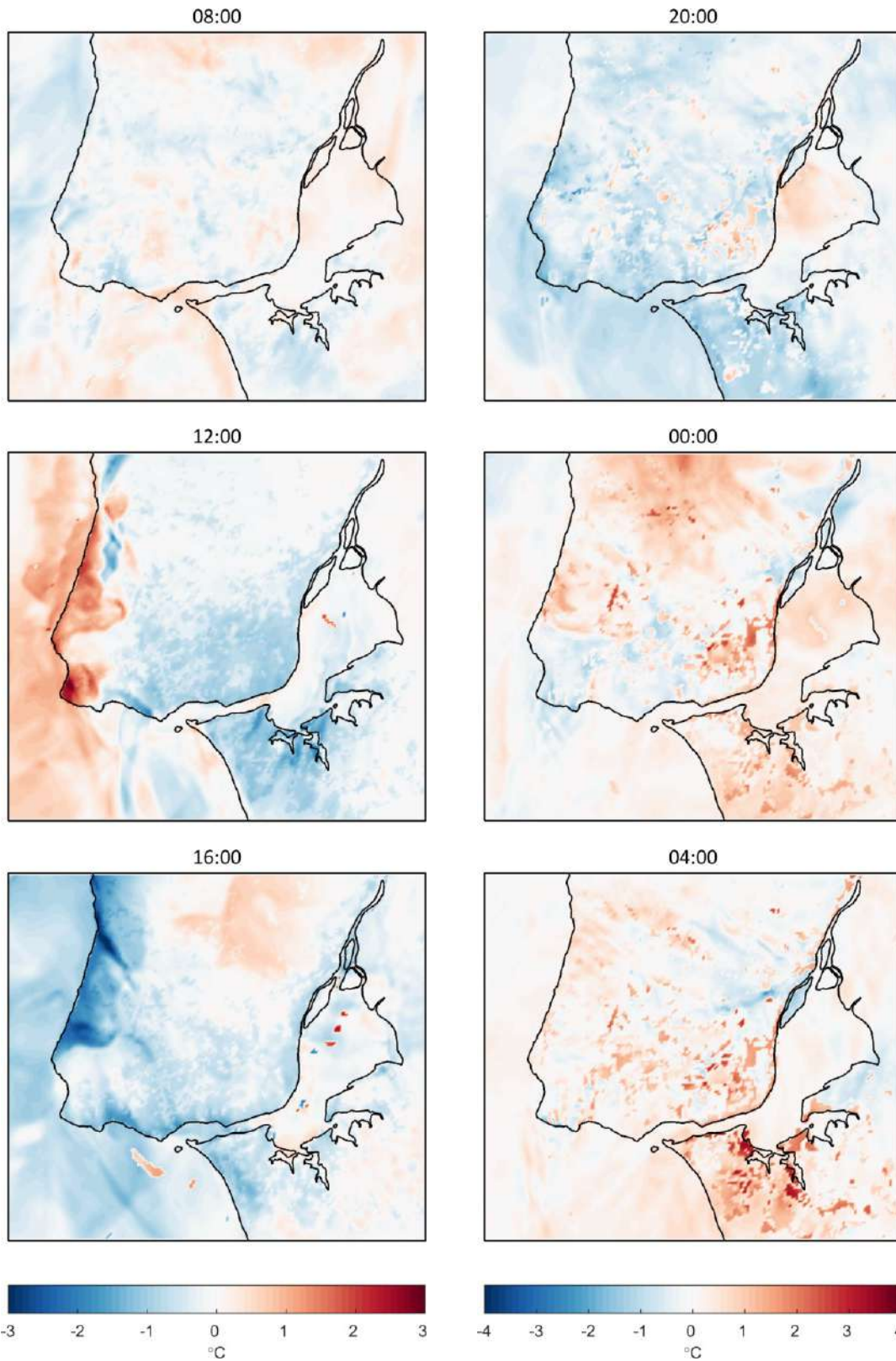


Figura 21 - Campos das diferenças médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) da temperatura a 2 metros entre as simulações URB46 e NURB46. **Método 2.**

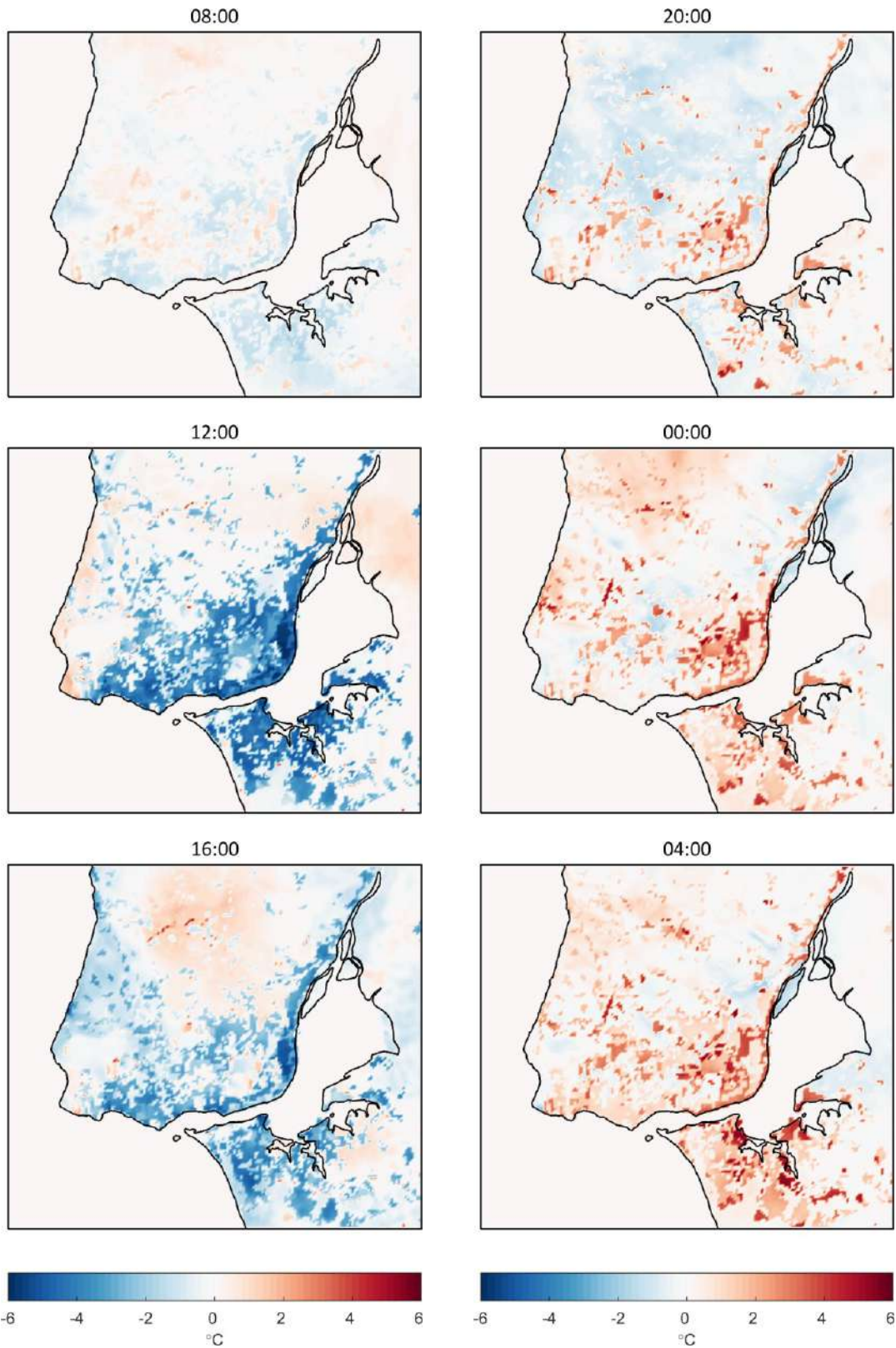


Figura 22 – O mesmo que a Figura 21, mas para os campos da temperatura da superfície. **Método 2.**



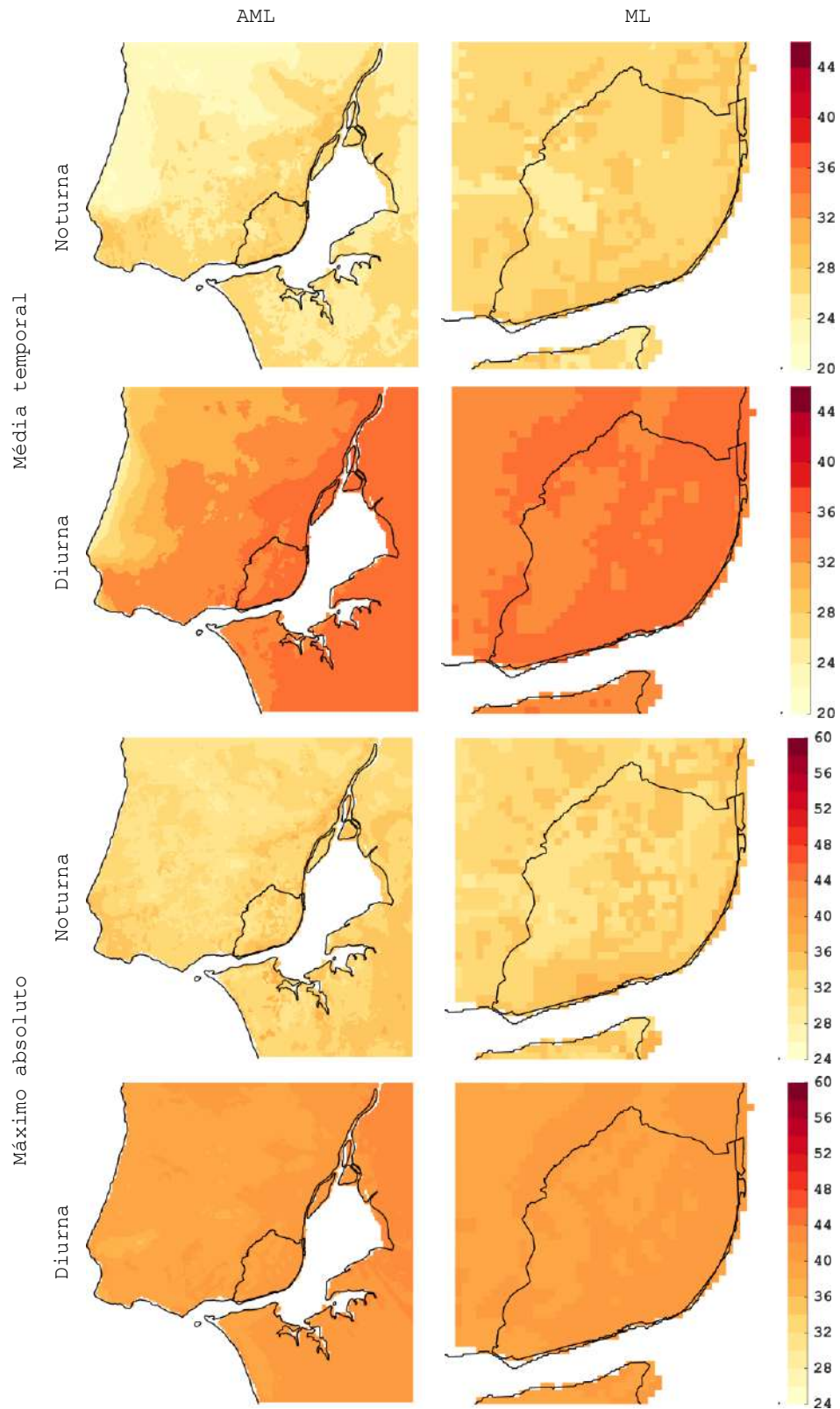


Figura 23 - Campos médios e máximos absolutos temporais da temperatura a 2 metros (simulação URB46) durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW; AML – todo o domínio D05; ML – ampliação sobre o ML. Valores apresentados em °C.

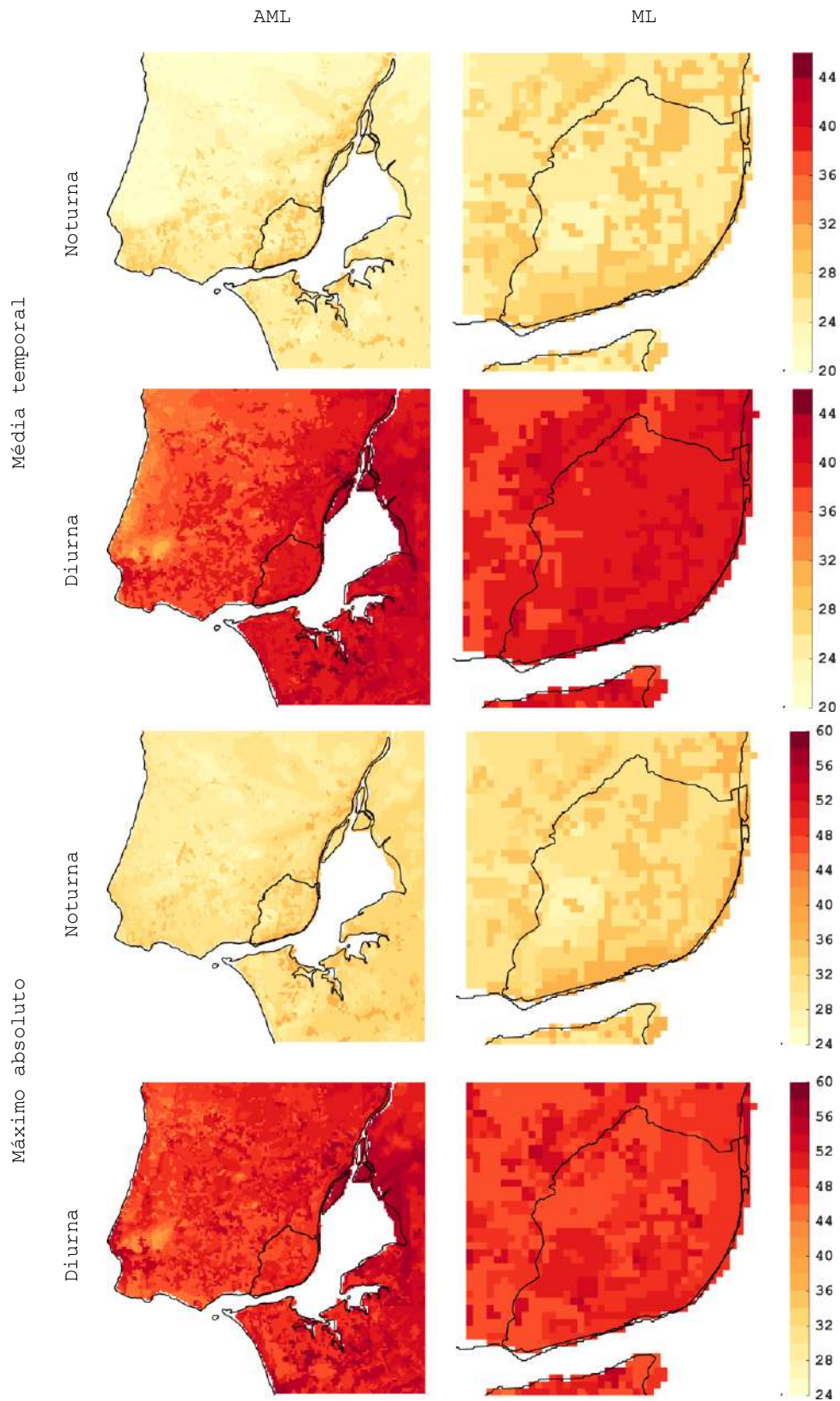


Figura 24 - O mesmo que a Figura 23, mas para a temperatura da superfície.

### 3.3 Fluxos de calor à superfície

#### a. Calor latente

Na Figura 25, em cima, é mostrada a média espacial do ciclo diurno do fluxo de calor latente nos pontos urbanos das simulações URB46 (curva vermelha) e NURB46 (curva verde). Os valores de fluxo máximos são atingidos entre as 12h00 e as 14h00, mas na simulação URB46 são cerca de  $80 \text{ W m}^{-2}$  superiores aos da simulação NURB46 às 13h00. Durante a noite, os fluxos são praticamente nulos. Na Figura 25, em baixo, é mostrada a decomposição nas diferentes classes urbanas das diferenças das curvas acima. A existência de valores superiores na simulação URB46, deve-se à contribuição da classe urbana de baixa intensidade residencial, que apresenta valores positivos durante o período diurno, ao contrário das outras classes urbanas. Esta classe, por apresentar uma maior percentagem de cobertura verde, liberta maior quantidade de calor latente. De referir que os valores na figura são independentes da área que as diferentes classes urbanas ocupam em relação à área urbana total. Se tivéssemos em conta a fração de área urbana, a contribuição da classe de baixa intensidade residencial resultaria em valores maiores, porque esta é a classe com maior percentagem de área urbana.

As mesmas conclusões podem ser retiradas para os campos médios horários e para os campos das diferenças entre as simulações URB46 e NURB46 mostrados das Figura 26 e Figura 27.

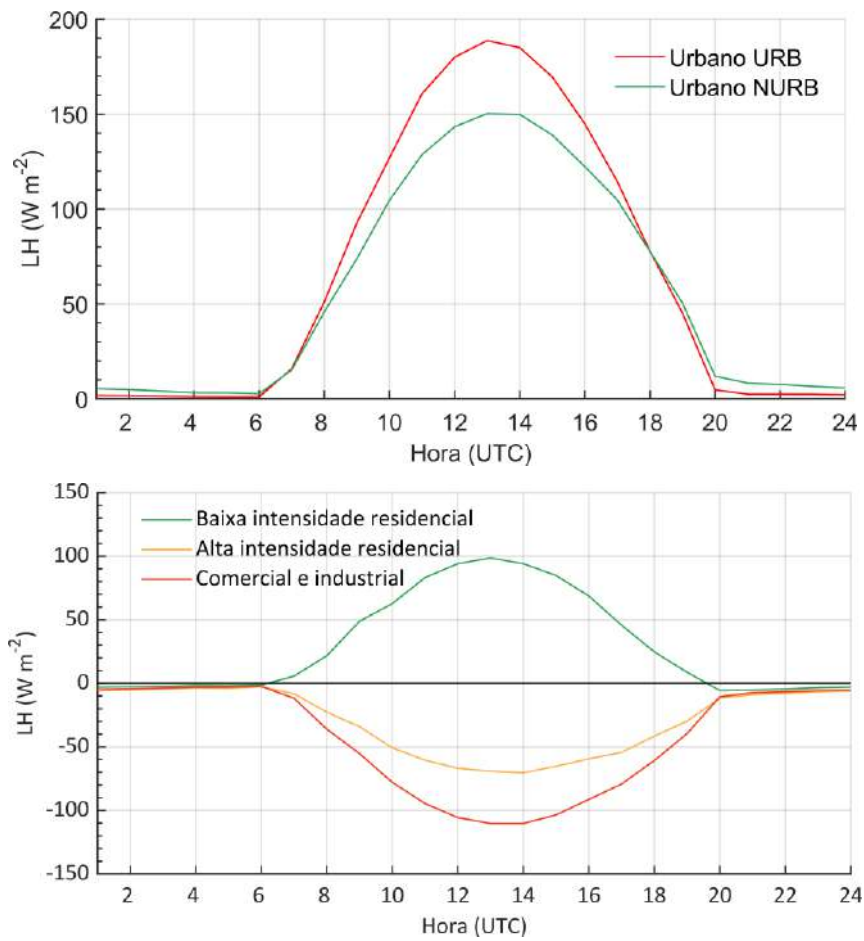


Figura 25 – Em cima: Ciclo diário da média espacial do fluxo de calor latente nos pontos urbanos na simulação URB46 (curva vermelha) e NURB46 (curva verde); Em baixo: Decomposição (para as diferentes classes de uso do solo urbano) da média espacial das diferenças dos fluxos de calor sensível entre os pontos urbanos das simulações URB46 e NURB46. **Método 2.**



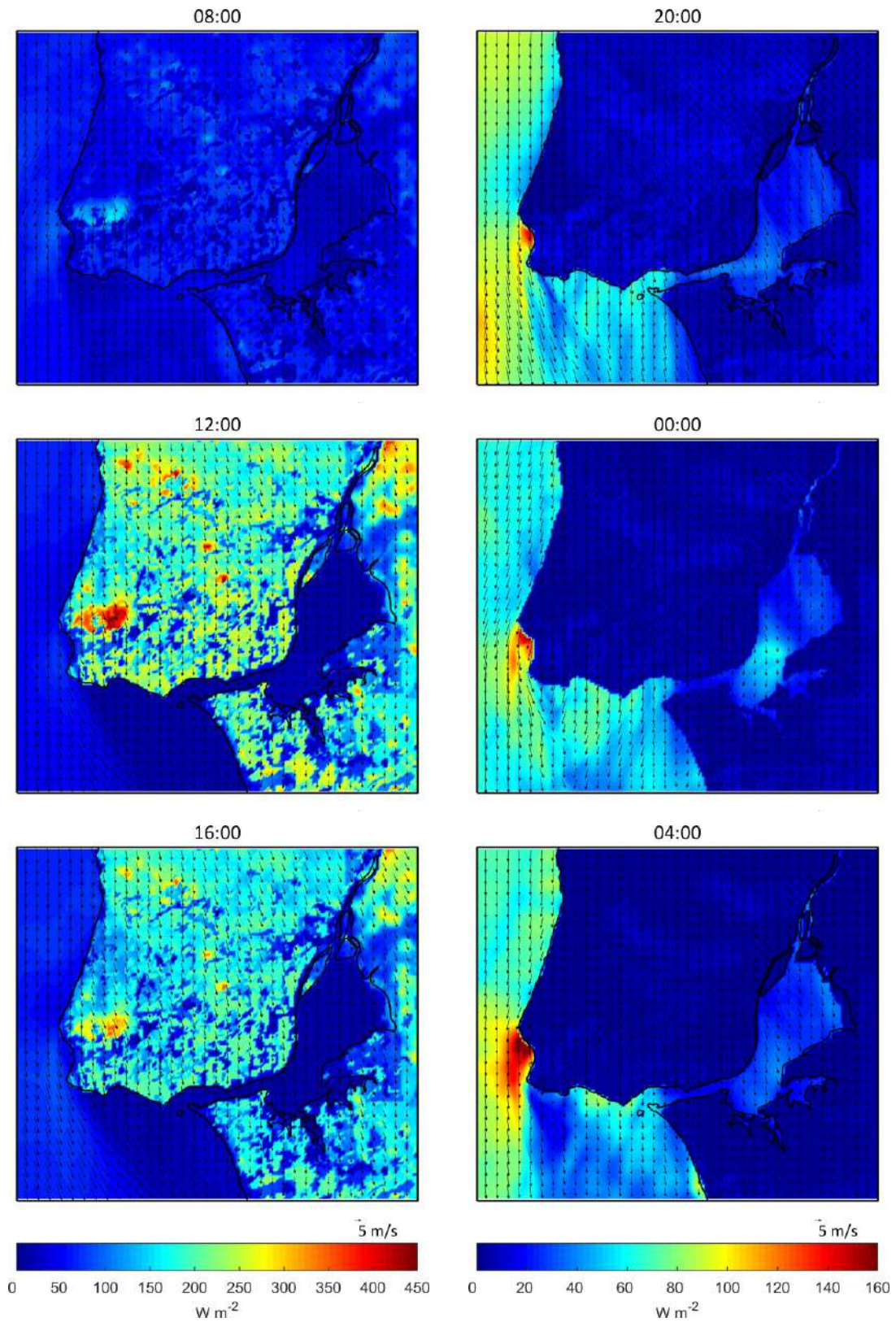


Figura 26 - Campos das médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) do Fluxo de calor latente na simulação URB46.

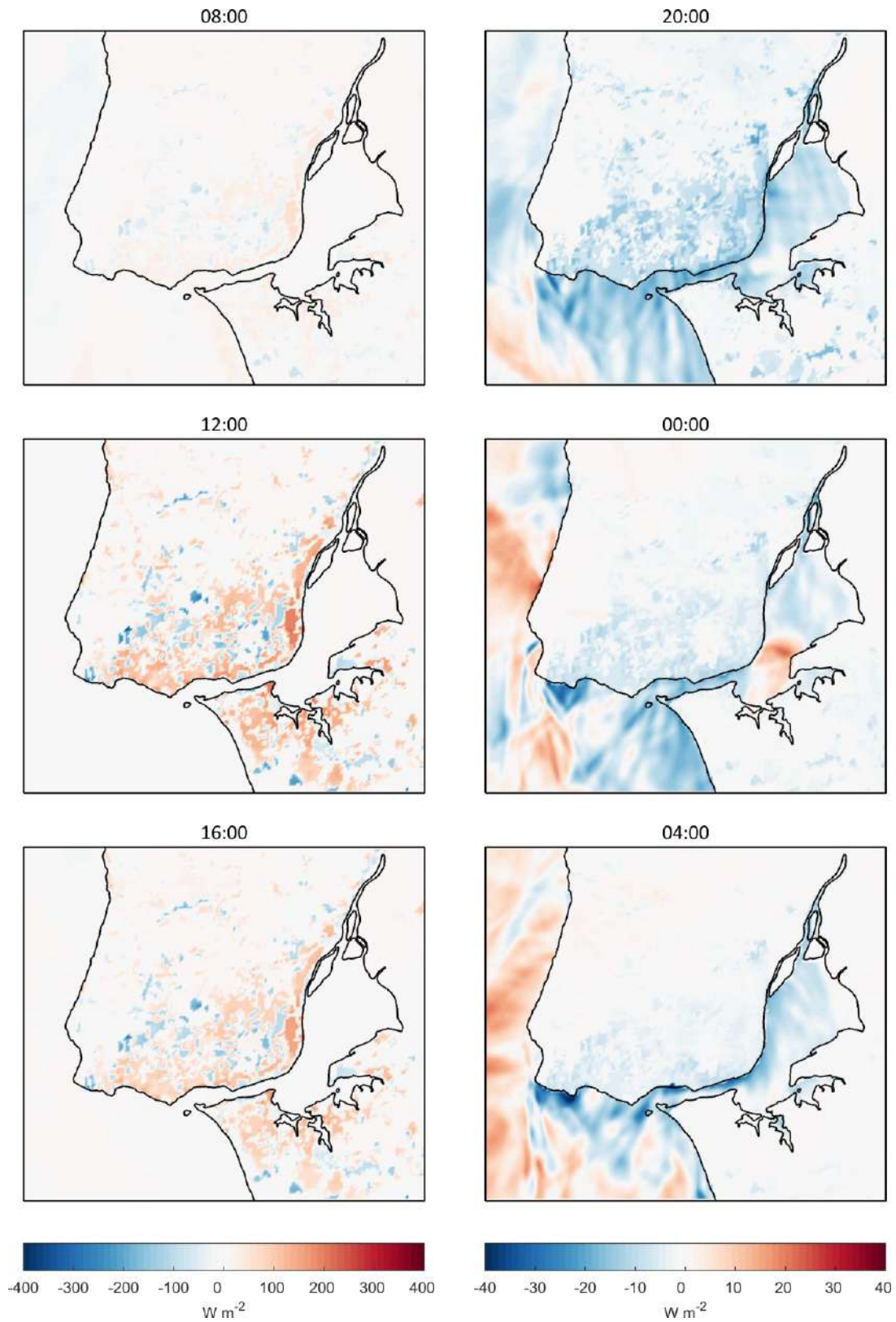


Figura 27 - Campos das diferenças médias horárias (para cinco períodos de 24 horas) dos fluxos de calor latente entre as simulações URB46 e NURB46. **Método 2.**



### b. Calor sensível

Na Figura 28, em cima, é mostrada a média espacial do ciclo diurno do fluxo de calor sensível nos pontos urbanos das simulações URB46 (curva vermelha) e NURB46 (curva verde). Como se pode verificar, o fluxo de calor sensível é positivo durante o dia, mas é superior na simulação NURB46, o que indica que os fluxos na presença de categorias urbanas são inferiores ao caso em que estas são substituídas pela classe rural. A explicação para esta diferença nos valores de calor sensível das duas simulações é a de que no balanço entre o fluxo absorvido pela superfície e emitido para a atmosfera, as categorias urbanas absorvem mais calor do que a categoria rural da simulação NURB46, devido à maior capacidade térmica e menor albedo das classes urbanas. Desta forma, o balanço entre o calor sensível emitido e absorvido nos pontos urbanos da simulação URB46 tem um valor mais baixo do que o da simulação NURB46.

Ao final do dia, por volta das 19h00, o fluxo de calor sensível na simulação NURB46 passa a ser negativo, enquanto na simulação URB46 permanece positivo até às 21h00. Durante a noite, os fluxos nas duas simulações são negativos, mas como podemos constatar pela análise da Figura 28, em baixo, a classe comercial e industrial tem valores de diferenças positivos durante a noite, porque o excesso de calor absorvido durante o dia é libertado durante a noite. As mesmas conclusões podem ser retiradas da análise das Figura 29 e Figura 30.

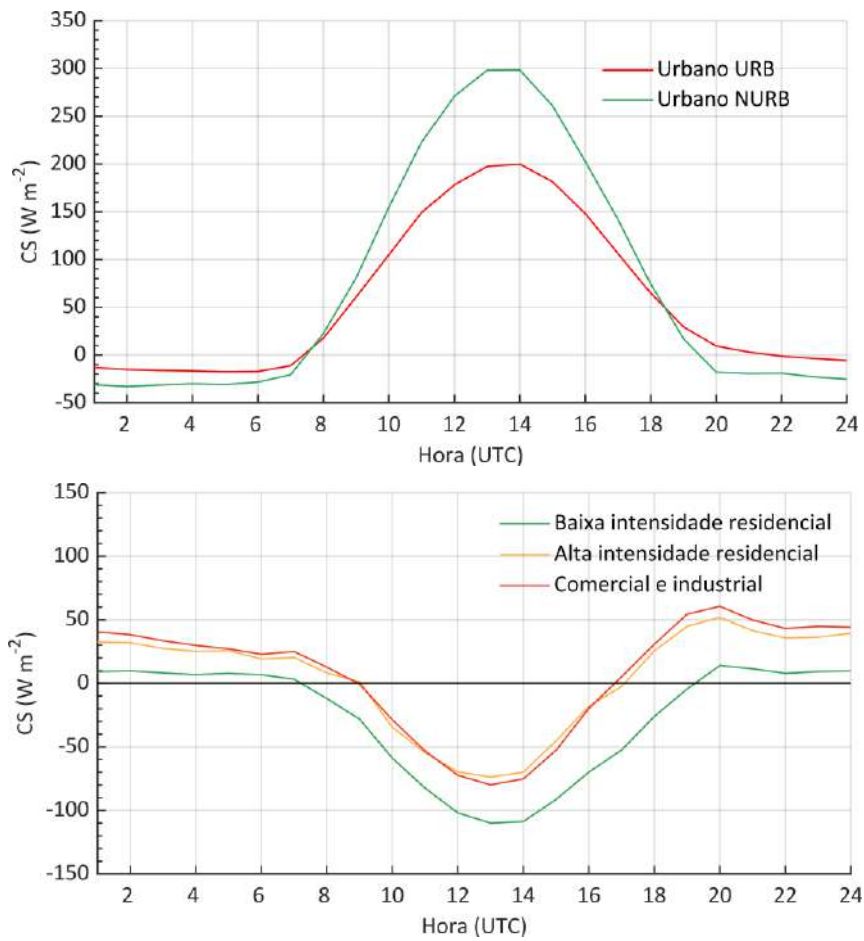


Figura 28 – O mesmo que a Figura 25, mas para o fluxo de calor sensível.

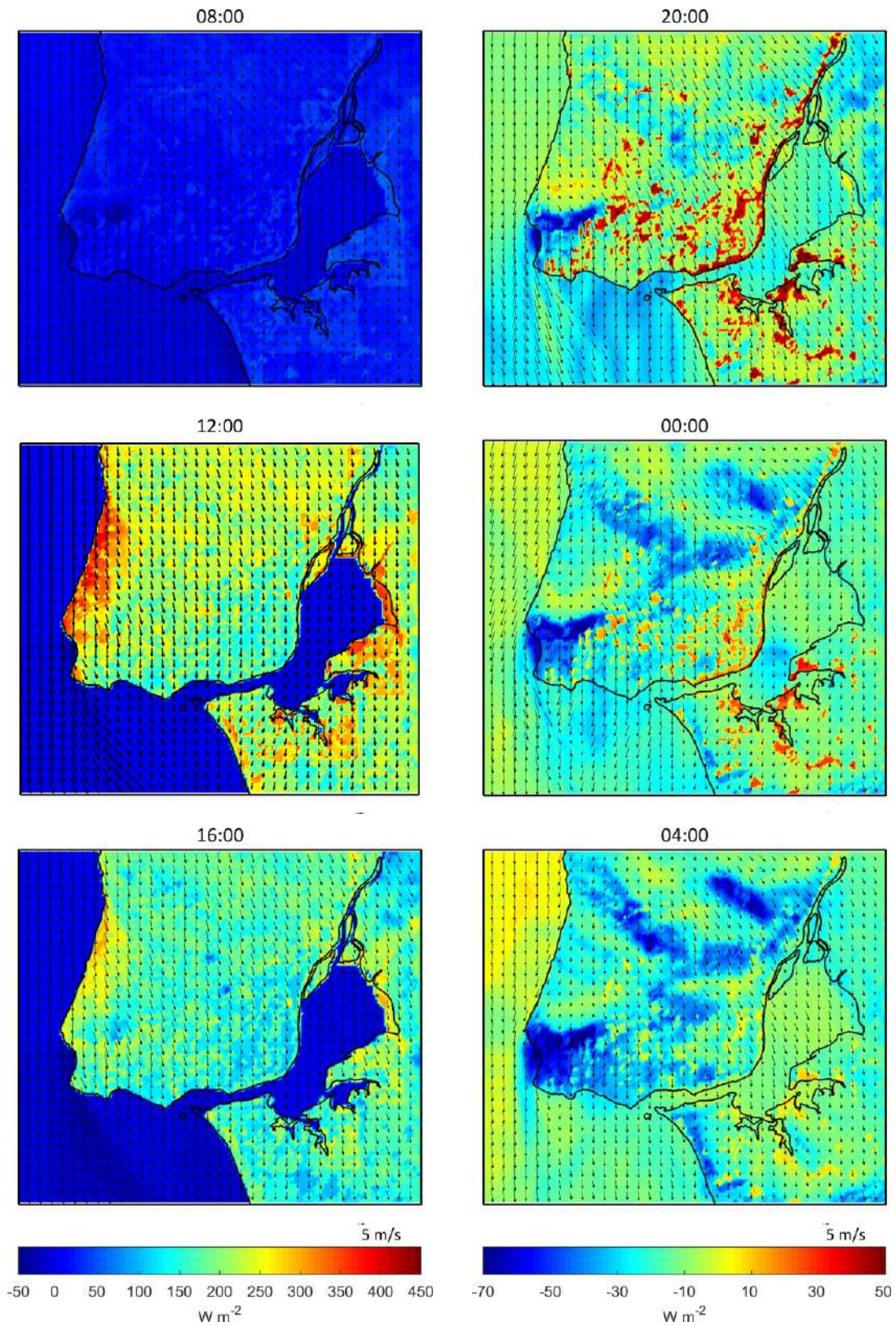


Figura 29 - O mesmo que a Figura 26, mas para o fluxo de calor sensível.



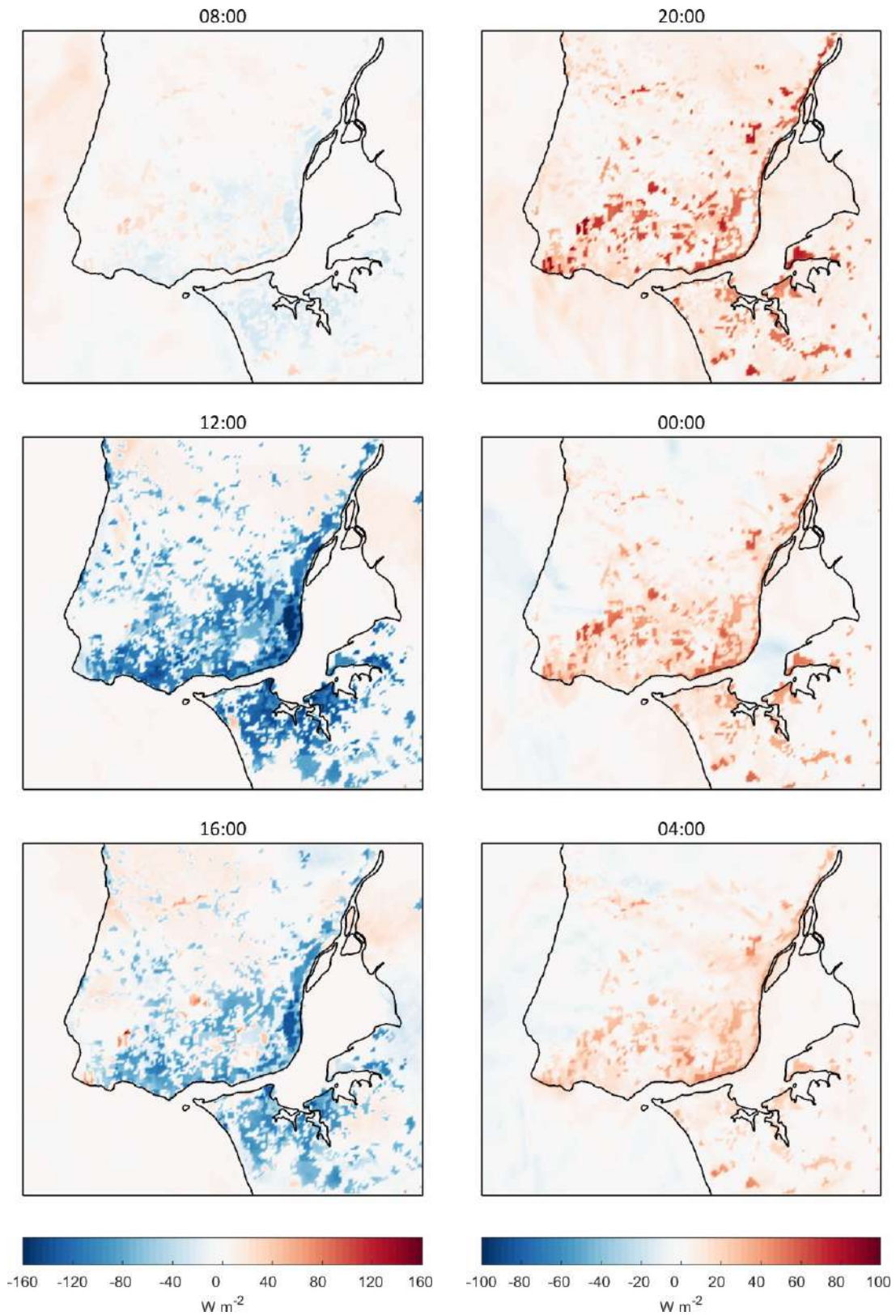


Figura 30 - O mesmo que a Figura 27, mas para o fluxo de calor sensível.

### 3.4 Perfis verticais: Temperatura potencial, energia cinética turbulenta, e altura da camada limite planetária.

Na Figura 31 são mostradas as séries temporais da altura da camada limite planetária para os pontos urbanos nas simulações URB46 e NURB46. A altura da camada limite planetária é definida como a altura em que a energia cinética turbulenta atinge valores inferiores a  $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ . Os valores máximos de altura atingem-se durante o período diurno, quando o forçamento solar é máximo, com valores a ultrapassar os 1000 m nos dias 1 e 2 de agosto. Os valores mínimos de altura são atingidos durante o período noturno, quando o forçamento solar é inexistente, no entanto percebe-se maior altura da camada limite na simulação URB46 devido à maior temperatura à superfície nas zonas urbanas da simulação URB46. Durante o pico do período diurno, a simulação NURB46 apresenta valores da altura superiores aos da simulação URB46. Este facto deve-se principalmente à menor temperatura (e maior instabilidade vertical) nos pontos urbanos na simulação URB46 e menores valores da energia cinética turbulenta durante o período diurno, como iremos ver na análise da Figura 32.

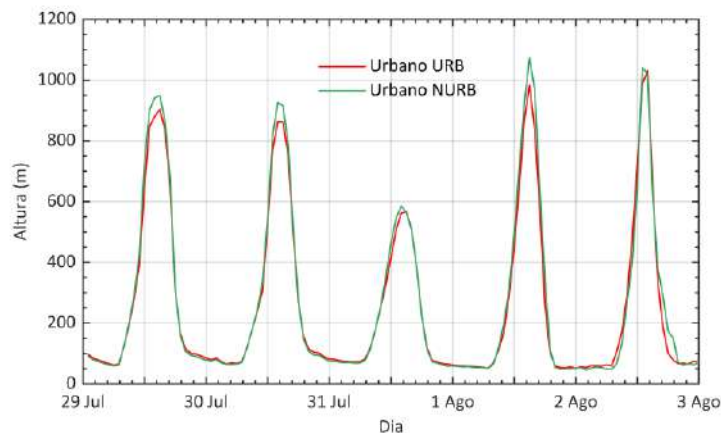


Figura 31 – Comparação entre as séries temporais da altura da camada limite planetária para os pontos urbanos (média espacial) nas simulações URB46 e NURB46.

A Figura 32 mostra os perfis verticais horários, com um intervalo de três horas, da energia cinética turbulenta para um ponto do domínio pertencente à classe de uso do solo comercial e industrial, no dia 1 de agosto de 2003. A análise dos perfis verticais da energia cinética para apenas um dia e ponto do domínio, deve-se à sua grande variabilidade espacial e de dia para dia, o que faz com que haja perdas de sinal quando é considerado o seu ciclo diário para o período de HW, ou as suas médias espaciais. No entanto, a análise e conclusões retiradas podem ser alargadas a todos os pontos urbanos do domínio D-5, que por uma razão de

síntese, não serão mostrados. Durante o dia (i.e., às 9h00, 12h00, 15h00, e 18h00) os perfis verticais têm a mesma forma, porque o forçamento principal é a radiação solar. Estes perfis são diferentes em termos de intensidade devido à dependência da energia cinética turbulenta na quantidade de fluxo de calor sensível, que é maior nos pontos urbanos, no caso da simulação NURB46 do que na simulação URB46, exceto às 9h00 onde a energia cinética turbulenta é maior na simulação URB46. Durante a noite (21h00, 00h00, 3h00, e 06h00 UTC), devido à inexistência de forçamento da superfície nas zonas rurais, a energia cinética turbulenta é maior na simulação URB46 do que na NURB46. É interessante perceber que os máximos da energia cinética turbulenta ocorrem muito próximo do limite superior da canópi urbana.

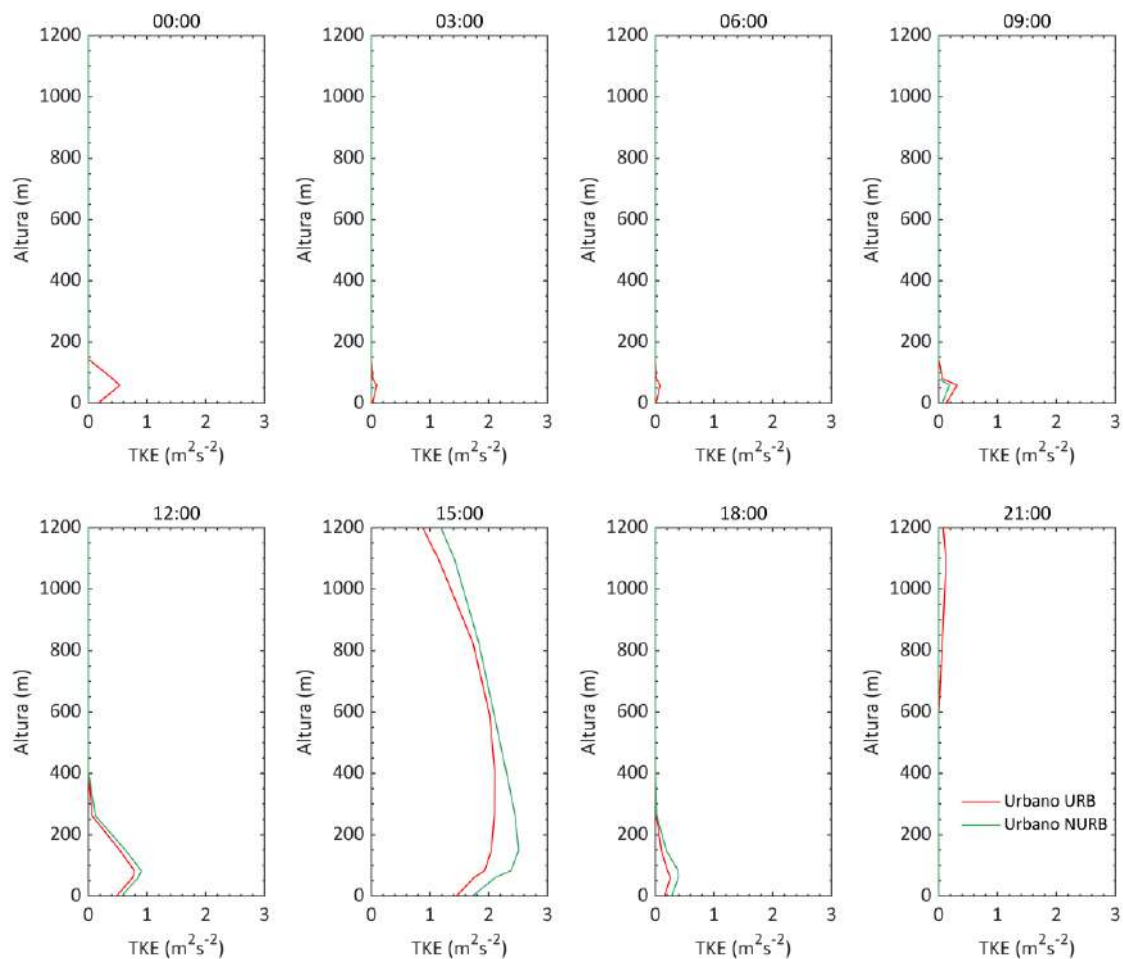


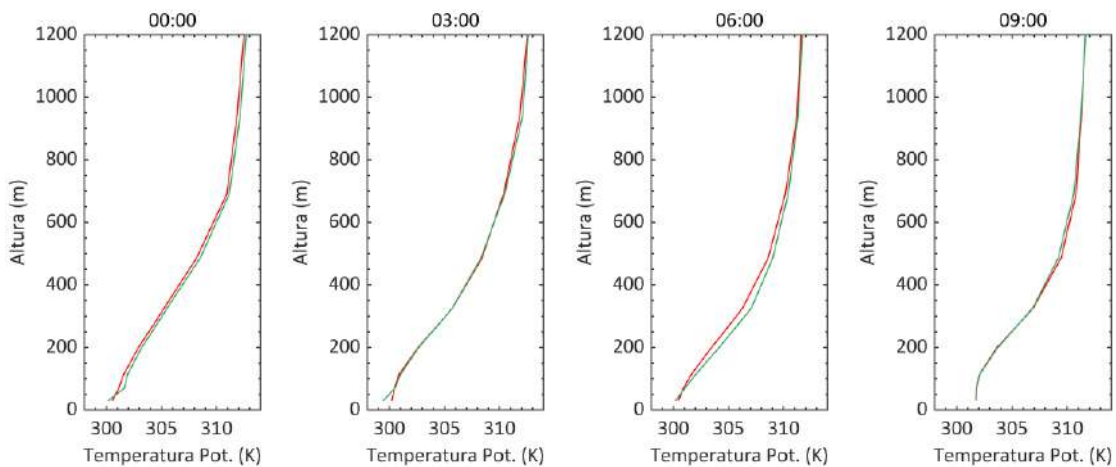
Figura 32 - Perfis verticais da energia cinética turbulenta para o dia 1 de agosto de 2003 no ponto  $x = 116$ ,  $y = 81$  das simulações URB46 (curva vermelha) e NURB46 (curva verde).

Passando à análise dos perfis verticais da temperatura potencial da Figura 33 nos mesmos pontos e períodos que a Figura 32, para além da tendência, os perfis fornecem informação



sobre a estabilidade vertical na camada limite planetária. Se a temperatura potencial aumenta com a altura, os movimentos verticais não são permitidos e a camada limite é considerada estável; se temperatura potencial é constante com a altura, a camada limite é considerada neutra. Por outro lado, se a temperatura potencial diminui com a altura, os movimentos verticais são permitidos e a camada limite planetária é considerada instável.

Durante o período noturno (21h00, 00h00, 3h00, e 6h00 UTC) nas simulações URB46 e NURB46, a atmosfera assume um perfil estável em toda sua espessura, ou seja, a temperatura potencial aumenta com a altura. Às 9h00, nos primeiros 100 metros, a camada limite planetária assume um perfil neutro, que começa a tornar-se instável com o forçamento radiativo solar à medida que o dia avança, mas permanece entre estável a neutro nos níveis superiores, principalmente às 15h00. Durante o dia, a temperatura potencial da simulação NURB46 é quase sempre superior à da simulação URB46, mas durante a noite e ao início do dia (9h00) as diferenças são pequenas.



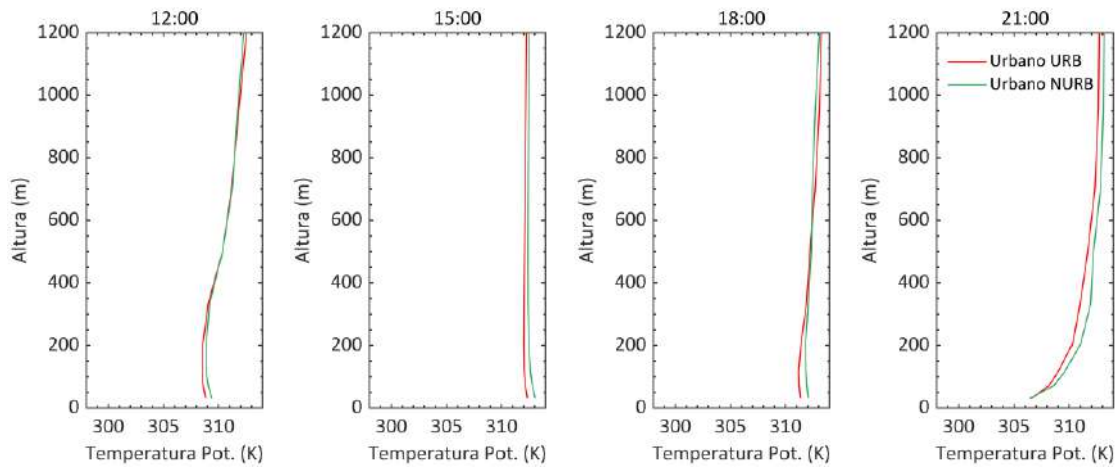


Figura 33 – O mesmo que a Figura 32, mas para a temperatura potencial.

## 4. Conclusões

Considerando a análise das simulações WRF da ICU durante a HW de agosto de 2003 (clima atual), podemos retirar as seguintes conclusões:

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 os métodos clássico e local no domínio D-5 e para no ML, mostrou resultados coerentes entre as duas abordagens, mas com intensidades diferentes. No entanto, os dois métodos mostram que para este episódio de HW, a ilha de calor urbano 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 no domínio D-5. A intensidade da ICU obtida pelo método clássico é superior à do método local tanto nos perfis do ciclo diário, como nos campos médios e máximos absolutos temporais. Para a ICU noturna, contribuem 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 tem menor impacto na ICU noturna, e é também a que mais contribui para a “ilha de frio” verificada nos pontos urbanos durante o período diurno.

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 pode ser, em alguns pontos e horas da noite, até  $6^{\circ}\text{C}$  superior ( $3.5^{\circ}\text{C}$  para a temperatura a 2 metros) à rural, segundo o método de avaliação clássico. Durante o período diurno, todas as classes urbanas apresentam valores inferiores aos rurais, com diferenças semelhantes e de sinal contrário às do período noturno. Para o método

de avaliação local, estes valores reduzem em relação ao método clássico cerca de 1°C e 2°C para a 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, aplicando o método local de avaliação da ICU, mostram valores diurnos menores na simulação URB6 do que na simulação NURB46. 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 URB46, os fluxos de calor latente são superiores aos da simulação NURB46, 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 durante o período noturno aumenta 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.

## 5. Referências

Bougeault, P. and Lacarrere, P. (1989) 'Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta--Scale Model', *Monthly Weather Review*. American Meteorological Society, 117(8), pp. 1872–1890. doi: 10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2.

Chen, F. *et al.* (2011) 'The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems', *International Journal of Climatology*. John Wiley & Sons, Ltd, 31(2), pp. 273–288. doi: 10.1002/joc.2158.

Chen, F. and Dudhia, J. (2001) 'Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity', *Monthly Weather Review*. American Meteorological Society, 129(4), pp. 569–585. doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.

Dee, D. P. *et al.* (2011) 'The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), pp. 553–597. doi: 10.1002/qj.828.

Dudhia, J. (1988) 'Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model', *Journal of the Atmospheric Sciences*. American Meteorological Society, 46(20), pp. 3077–3107. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.

Grell, G. and Freitas, S. (2014) *A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling*, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. doi: 10.5194/acp-14-5233-2014.

Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R. (1995) 'Comparison of Heat Fluxes from Summertime Observations in the Suburbs of Four North American Cities', *Journal of Applied Meteorology*. American Meteorological Society, 34(4), pp. 873–889. doi: 10.1175/1520-0450(1995)034<0873:COHFFS>2.0.CO;2.

Hong, S. and Lim, J. (2006) 'The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)', *Journal of the Korean Meteorological Society*, pp. 129–151. Available at:

[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/WSM6-hong\\_and\\_lim\\_JKMS.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/WSM6-hong_and_lim_JKMS.pdf)  
[http://search.koreanstudies.net/journal/thesis\\_name.asp?tname=kiss2002&key=2525908](http://search.koreanstudies.net/journal/thesis_name.asp?tname=kiss2002&key=2525908).

Jiménez, P. A. *et al.* (2012) 'A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation', *Monthly Weather Review*, 140(3), pp. 898–918. doi: 10.1175/MWR-D-11-00056.1.

Keyser, D. and Anthes, R. A. (1977) 'The Applicability of a Mixed-Layer Model of the Planetary Boundary Layer to Real-Data Forecasting', *Monthly Weather Review*. American Meteorological Society, 105(11), pp. 1351–1371. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<1351:TAOAMM>2.0.CO;2.

Kusaka, H. *et al.* (2001) 'A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models', *Boundary-Layer Meteorology*, 101(3), pp. 329–358. doi: 10.1023/A:1019207923078.

Kusaka, H. and KIMURA, F. (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*. doi: 10.2151/jmsj.82.67.

Markowski, P. and Richardson, Y. (2010) *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. doi: 10.1002/9780470682104.

Martilli, A., Clappier, A. and Rotach, M. W. (2002) 'An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models', *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), pp. 261–304. doi: 10.1023/A:1016099921195.

Mlawer, E. J. *et al.* (1997) 'Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. John Wiley & Sons, Ltd, 102(D14), pp. 16663–16682. doi: 10.1029/97JD00237.

Pielke, R. A. (2002) *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press (International geophysics series). Available at: <https://books.google.pt/books?id=hyUEI7NK7bUC>.

Pineda, N. *et al.* (2004) *Using NOAA AVHRR and SPOT VGT data to estimate surface parameters: application to a mesoscale meteorological model*, *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS*. doi: 10.1080/0143116031000115201.





Skamarock, W. C. *et al.* (2008) 'A Description of the Advanced Research WRF Version 3', *Technical Report*, (June), p. 113. doi: 10.5065/D6DZ069T.

Warner, T. T. (2010) *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511763243.

## 6. Anexos

Tabela 7 – Estatísticas e medidas de erro dos dados da temperatura a 2 metros observados nas estações do IPMA para o período de HW.

Station	Tst_min	Tst_max	Tst_med	std_obs
Alvalade	20,3	43,5	30,5	5,7
Amadora	20,6	43,3	30,0	5,6
Baixa	20,5	42,3	30,6	5,7
Barreiro (Cidade)	19,3	43,0	30,0	5,7
Benfica	18,7	45,3	30,5	6,6
Cacém	18,9	46,1	28,6	6,8
Estefânia	21,1	44,7	31,4	5,5
Gago Coutinho	19,8	41,5	30,0	5,1
Geofísico	20,7	41,4	30,1	4,8
Média	20,0	43,5	30,2	5,7

Tabela 8 - Estatísticas e medidas de erro dos dados da temperatura a 2 metros obtidas para a simulação URB46, através da comparação com os dados observados nas estações do IPMA.

Estação	Tmod_min	Tmod_max	Tmod_med	viés	rmse	stde	std_mod	rmsd	r
Alvalade	20,7	39,8	29,8	-0,7	2,8	2,7	5,3	2,7	0,88
Amadora	20,6	39,2	29,7	-0,3	2,5	2,5	4,9	2,5	0,89
Baixa	23,1	40,5	31,0	0,4	2,9	2,9	4,8	2,9	0,87
Barreiro (Cidade)	21,9	40,6	30,5	0,5	2,6	2,5	5,2	2,5	0,90
Benfica	20,0	40,2	29,5	-1,0	3,2	3,0	5,4	3,0	0,90
Cacém	18,9	40,3	29,0	0,4	3,4	3,3	5,5	3,3	0,87
Estefânia	22,4	40,4	30,8	-0,5	2,9	2,8	4,8	2,8	0,86
Gago Coutinho	22,7	40,1	30,9	0,9	2,8	2,7	4,7	2,7	0,86
Geofísico	21,8	40,4	30,4	0,3	2,7	2,7	5,0	2,7	0,85
Média	21,3	40,2	30,2		2,9	2,8	5,1	2,8	0,87

Tabela 9 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação NURB46.

Estação	Tmod_min	Tmod_max	Tmod_med	viés	rmse	stde	std_mod	rmsd	r
Alvalade	21,2	40,6	30,2	-0,3	2,9	2,9	5,6	2,9	0,86
Amadora	20,2	40,3	30,2	0,2	2,8	2,8	5,3	2,8	0,85
Baixa	21,6	41,4	30,9	0,3	3,2	3,2	5,6	3,2	0,87
Barreiro (Cidade)	19,8	42,0	30,4	0,4	3,2	3,2	6,3	3,2	0,80
Benfica	18,9	40,4	29,4	-1,1	3,3	3,1	5,9	3,1	0,85
Cacém	17,9	39,8	28,9	0,3	3,0	3,0	6,0	3,0	0,84
Estefânia	21,2	40,6	30,6	-0,8	3,1	3,0	5,6	3,0	0,87
Gago Coutinho	21,5	41,4	30,5	0,5	3,0	3,0	5,5	3,0	0,88
Geofísico	21,2	41,4	30,8	0,7	3,4	3,3	5,5	3,3	0,90

Média	20,4	40,9	30,2	/	3,1	3,0	5,7	3,0	0,86
-------	------	------	------	---	-----	-----	-----	-----	------

Tabela 10 – O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação CTRL46.

Estação	Tmod_min	Tmod_max	Tmod_med	viés	rmse	stde	std_mod	rmsd	r
Alvalade	22,5	40,5	31,4	0,9	3,2	3,1	5,1	3,1	0,84
Amadora	20,8	39,9	31,0	1,0	3,2	3,0	5,0	3,0	0,84
Baixa	23,6	41,5	31,9	1,4	3,2	2,9	5,0	2,9	0,86
Barreiro (Cidade)	22,1	41,3	31,4	1,4	3,4	3,1	5,5	3,1	0,85
Benfica	22,3	40,4	31,5	1,0	3,7	3,6	5,0	3,6	0,84
Cacém	19,8	40,0	29,7	1,1	3,4	3,2	5,7	3,2	0,88
Estefânia	23,0	41,7	31,7	0,3	2,9	2,9	5,0	2,9	0,86
Gago Coutinho	22,5	40,7	31,4	1,3	3,1	2,8	5,0	2,8	0,85
Geofísico	23,1	41,8	31,8	1,7	3,4	2,9	5,0	2,9	0,82
Média	22,2	40,9	31,3	/	3,3	3,1	5,1	3,1	0,85

Tabela 11 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação URB49.

Estação	Tmod_min	Tmod_max	Tmod_med	viés	rmse	stde	std_mod	rmsd	r
Alvalade	21,9	40,7	30,5	0,0	2,7	2,7	4,9	2,7	0,88
Amadora	22,5	39,7	30,4	0,4	2,8	2,7	4,5	2,7	0,87
Baixa	22,8	41,1	30,9	0,3	2,7	2,7	5,2	2,7	0,88
Barreiro (Cidade)	21,6	41,7	30,5	0,5	2,8	2,8	5,8	2,8	0,88
Benfica	22,4	40,8	30,4	-0,1	3,3	3,3	4,9	3,3	0,87
Cacém	19,5	40,0	29,3	0,6	3,0	2,9	5,4	2,9	0,91
Estefânia	22,1	41,2	30,7	-0,6	2,7	2,7	5,2	2,7	0,88

Gago Coutinho	22,2	39,9	30,5	0,4	2,6	2,6	4,9	2,6	0,87
Geofísico	22,4	40,6	30,8	0,7	2,9	2,9	5,0	2,9	0,83
Média	21,9	40,6	30,4		2,9	2,8	5,1	2,8	0,88

Tabela 12 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação NURB49.

Estação	Tmod_min	Tmod_max	Tmod_med	viés	rmse	stde	std_mod	rmsd	r
Alvalade	21,5	40,2	30,4	-0,1	2,9	2,9	5,1	2,9	0,86
Amadora	21,9	39,6	30,2	0,3	2,9	2,9	4,7	2,9	0,85
Baixa	22,3	41,3	31,0	0,4	3,0	3,0	5,4	3,0	0,86
Barreiro (Cidade)	20,5	41,5	30,5	0,5	2,9	2,9	6,0	2,9	0,88
Benfica	20,1	40,1	30,0	-0,5	3,3	3,2	5,2	3,2	0,88
Cacém	18,3	39,3	28,8	0,2	3,1	3,1	5,7	3,1	0,89
Estefânia	21,7	40,8	30,6	-0,7	3,0	2,9	5,3	2,9	0,86
Gago Coutinho	21,6	40,8	30,5	0,5	2,9	2,9	5,2	2,9	0,84
Geofísico	21,8	40,9	30,8	0,8	3,1	3,1	5,3	3,1	0,82
Média	21,1	40,5	30,3		3,0	3,0	5,3	3,0	0,86

Tabela 13 - O mesmo que a Tabela 8, mas para a simulação CTRL49.

Estação	Tmod_min	Tmod_max	Tmod_med	viés	rmse	stde	std_mod	rmsd	r
Alvalade	22,6	41,0	31,4	0,9	3,4	3,2	4,8	3,2	0,82
Amadora	22,7	39,8	31,2	1,2	3,3	3,1	4,5	3,1	0,83
Baixa	23,4	41,0	31,9	1,3	3,2	2,9	4,8	2,9	0,86
Barreiro (Cidade)	22,1	41,1	31,3	1,3	3,3	3,1	5,5	3,1	0,85
Benfica	23,3	40,8	31,6	1,1	4,0	3,8	4,5	3,8	0,83



Cacém	19,3	39,6	29,7	1,1	3,5	3,3	5,5	3,3	0,87
Estefânia	22,8	41,4	31,6	0,2	3,0	3,0	4,8	3,0	0,84
Gago Coutinho	22,4	40,5	31,3	1,3	3,2	2,9	4,8	2,9	0,83
Geofísico	22,8	41,3	31,7	1,6	3,3	2,9	4,8	2,9	0,82
Média	22,4	40,7	31,3		3,3	3,1	4,9	3,1	0,84



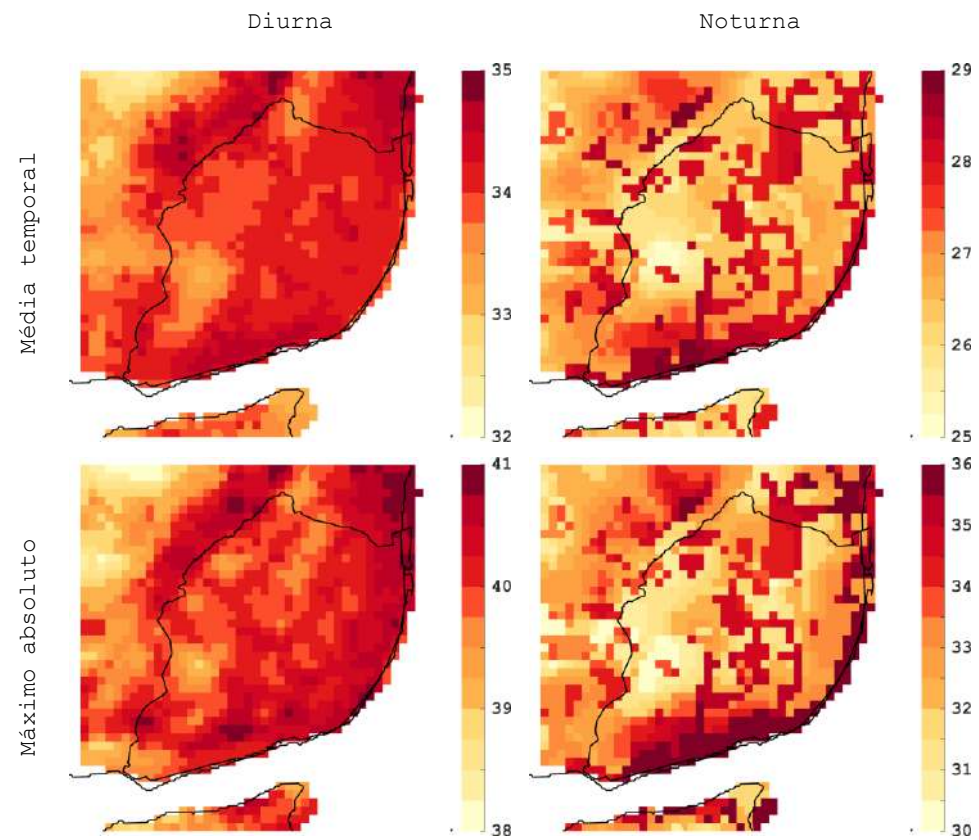


Figura 34A - Campos médios (em cima) e máximos absolutos (em baixo) temporais da temperatura a 2 metros (simulação URB46) durante o período diurno (esquerda) e noturno (direita) da HW; Valores apresentados em °C.

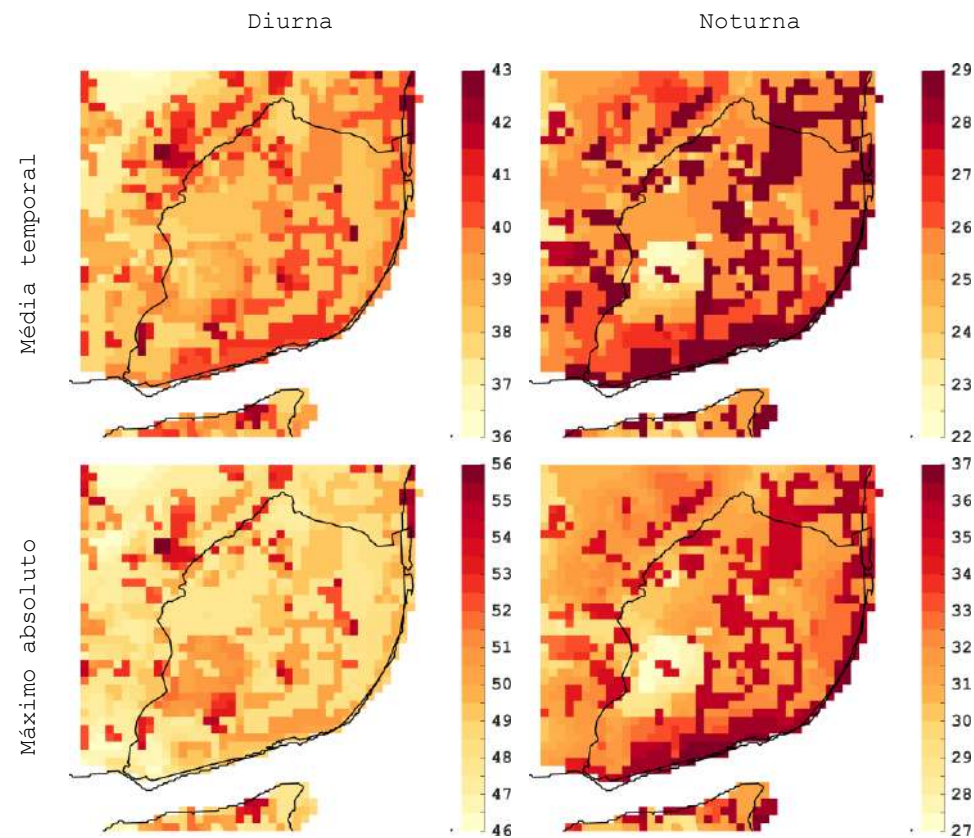


Figura 35A – O mesmo que a Figura 1A, mas para a temperatura da superfície.