

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



MAPAS BIOCLIMÁTICOS DE LISBOA

Sofia Carvalho Pereira Baltazar

MESTRADO EM GEOGRAFIA FÍSICA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



MAPAS BIOCLIMÁTICOS DE LISBOA

Sofia Carvalho Pereira Baltazar

DISSERTAÇÃO ELABORADA COM VISTA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

EM GEOGRAFIA FÍSICA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

APRESENTADA AO INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

SOB A ORIENTAÇÃO DO DOUTOR HENRIQUE ANDRADE

2010

Agradecimentos:

Ao Doutor Henrique Andrade por ter aceite ser meu orientador, pela infinita paciência e disponibilidade, conhecimentos e excelente apoio que sempre me prestou ao longo de todas as etapas deste trabalho, sem os quais teria sido impossível a sua realização.

Ao Doutor António Lopes, pela orientação e apoio prestado no tratamento e análise dos dados do vento.

À Eng^a Márcia Muñoz, ex-Directora do Departamento de Informação Geográfica e Cadastro da Câmara Municipal de Lisboa, pela disponibilização de toda a cartografia de base (ortofotomapas e cartografia digital) e sem a qual este trabalho não tinha sido possível.

À Dr^a Maria João Telhado, coordenadora do Gabinete de Análise de Risco do Departamento de Protecção Civil da Câmara Municipal de Lisboa, pela disponibilidade e incansável incentivo.

À Cristina Caetano, pela amizade, apoio incondicional, incentivo e revisão de todo o documento.

À minha família e amigos pela presença, compreensão e paciência ao longo de todo este caminho e em todos os momentos da minha vida.

Resumo

Uma das actuais preocupações nas áreas urbanas prende-se, sobretudo, com os riscos térmicos e com a sua influência no conforto e saúde da população (Curriero et al., 2002, Garcia-Herrera et al., 2005; Kovats e Hajat, 2008). Os índices bioclimáticos, pela utilização combinada de vários parâmetros atmosféricos, permitem uma melhor avaliação do efeito do clima sobre a sensação e conforto térmico. É assim, neste contexto e sobretudo na perspectiva do conforto climático da população de Lisboa, que este trabalho pretende dar o seu contributo.

Foi desenvolvida uma metodologia para a elaboração de mapas bioclimáticos e efectuada a modelação espacial de um índice bioclimático aplicado à cidade de Lisboa - a *Physiological Equivalent Temperature (PET)*. Com o recurso aos sistemas de informação geográfica, procedeu-se a modelação espacial das várias variáveis meteorológicas e físicas do território e ao cálculo do valor do *PET*, para os diferentes tipos de tempos.

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco partes fundamentais. Numa primeira parte, abordam-se e clarificam-se de forma sintética os conceitos básicos teóricos mais relevantes no contexto do presente estudo. Seguidamente, é feita uma caracterização climática e morfológica da cidade de Lisboa e, no ponto seguinte, são descritos os aspectos metodológicos subjacentes ao desenvolvimento do estudo - dados de base utilizados, definição dos tipos de tempo considerados e modelo de análise. Por fim, são apresentados os mapas finais, discutidos os resultados obtidos para cada um dos tipos de tempo e registadas as conclusões.

Espera-se que o conjunto de mapas daqui resultantes, possam constituir bons instrumentos de caracterização bioclimática da cidade e de apoio a acções de planeamento e de protecção civil, contribuindo para um melhor conhecimento do conforto térmico na cidade de Lisboa.

Palavras-chave: bioclimatologia, clima urbano, conforto térmico, *Physiological Equivalent Temperature*, mapas bioclimáticos.

Abstract

One of the major concerns in the urban areas are the thermal risks, and its influence in the comfort and health of the population (Curriero et al, 2002, Garcia- Herrera et al. 2005; Kovats and Hajet 2008). The bioclimatic índices, through a combined atmosphere parameters, allows a better evaluation of the weather effect about the sensation and human thermal comfort.

The present work pretends to contribute over a perspective of climatic comfort of Lisbon population. It was developed a methodology to elaborate bioclimatic maps, and to effectuate the special modulation of a bioclimatic index applied to the Lisbon city - Physiological Equivalent Temperature (*PET*). With the aid of a geographic information system, was proceed to the special modulation of several meteorológica and physical variables of the territory, and the calculation of *PET* for the different kinds of weather.

This work is structured in five main parts. In the first part is presented a summary approach to the basic theory concepts more relevant in the context of the present study. Then, after a weather and morphological characterization of the city of Lisbon, it was made the description of the methodological aspects of the study development - data base applied, definition of weather types considered and analysis model. At last, are presented the final maps, the discussion of the results obtained to each type of weather, and the registration of the final conclusions.

Its expected that the set of these maps, can contribute as tools of bioclimatic characterization of the city and to support to the planning and civil protection actions, allowing a better knowledge of the human thermal comfort of Lisbon's City.

Key words: bioclimatology, urban climate, human thermal comfort, *Physiological Equivalent Temperature*, bioclimatic maps.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO	1
II. BIOCLIMATOLOGIA HUMANA: UM ENQUADRAMENTO TEÓRICO	4
1. Conceitos de bioclimatologia humana	4
1.1. Evolução da bioclimatologia	4
1.2. Balanço energético do corpo humano	5
1.3. Sensação e conforto térmico	8
1.4. Índices térmicos	9
1.5. <i>Physiological Equivalent Temperature</i>	11
2. A Bioclimatologia humana em contexto urbano	12
2.1. A importância da temperatura do ar no conforto térmico e na saúde	13
2.2. A importância do vento e brisas no conforto térmico	14
III. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E MORFOLÓGICA DE LISBOA	15
1. Enquadramento Geográfico de Lisboa	15
2. Morfologia urbana	17
3. Caracterização do clima de Lisboa: o regime dos ventos e padrões térmicos, factores regionais e urbanos	20
3.1. O regime das temperaturas e a ilha de calor urbano	21
3.2. O padrão dos ventos	22
3.2.1. Regime geral	22
3.2.2. Os ventos locais - as brisas	23
IV. METODOLOGIA	25
1. Os dados	25
2. Modelo de análise	27
2.1. Esquema conceptual	27
2.2. Parâmetros morfológicos – mapas de base	29
2.2.1. Modelo Digital de Elevação (MDE)	29
2.2.2. Áreas edificadas	29
2.2.3. Áreas verdes	31
2.2.4. <i>NDVI</i>	32
2.2.5. As brisas	34
2.2.6. Distância ao rio e distância latitudinal	34
2.2.7. A rugosidade	35
2.2.8. Áreas homogéneas	36

2.2.9. Albedo	37
2.3. Parâmetros Climáticos	37
2.3.1. Temperatura	37
2.3.2. Vento	39
2.3.3. Humidade	40
2.3.4. Temperatura radiativa	40
3. Tipos de Tempo	42
4. Mapas de <i>Physiological Equivalent Temperature (PET)</i>	42
V. ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
1. Os mapas de base	43
1.1. Ocupação do solo e morfologia urbana	43
1.2. O albedo – influência no balanço térmico e radiativo	44
1.3. A rugosidade - influência da urbanização no escoamento do ar	46
2. A modelação do <i>PET</i>	48
2.1. Os dias frios	48
2.2. As noites frias	49
2.3. Os dias quentes	51
2.4. As noites quentes	53
VI. CONCLUSÕES	56
BIBLIOGRAFIA	59
ANEXOS	64

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura

1	Balço energético do corpo humano	6
2	Localização do concelho de Lisboa	15
3	Modelo Digital de Elevação de Lisboa	16
4	Mapa de declives	17
5	Localização da estação meteorológica de Gago Coutinho, dos registadores automáticos e dos percursos de medições itinerantes	25
6	Registador automático, do tipo <i>TinyTag Plus</i> , no Jardim da Torre de Belém	26
7	Esquema conceptual para espacialização e construção de mapas da <i>PET</i>	28
8	Área Edificada (quarteirões) de Lisboa	30
9	Áreas Verdes de Lisboa	32
10	Curvas típicas da percentagem de reflectância em função do comprimento de onda para a água, vegetação e solo	33
11	Índice <i>NDVI</i> para Lisboa, em 22 Julho 2007	33
12	Limite médio da penetração da brisa	34
13	Morfologias urbanas homogéneas	43
14	Albedo de Lisboa, em 22 Julho 2007	45
15	Rugosidade aerodinâmica (Z_0) em Lisboa, 2008	47
16	Rugosidade aerodinâmica (Z_0) em Lisboa, nos anos 80	47
17	Dias frios – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e <i>PET</i>	48
18	Noites frias – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e <i>PET</i>	50
19	Dias quentes – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e <i>PET</i>	52
20	Noites quentes – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e <i>PET</i>	53
21	Nortada – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e <i>PET</i>	55

ÍNDICE DOS QUADROS

Quadro

1	Isolamento térmico de diferentes tipos de roupas	8
2	Classes de <i>PET</i> para limiares de sensação térmica e esforço termoregulatório	11
3	Coeficientes de determinação e de normalidade	38
4	Classes de morfologia urbana, valores de albedo e razão de <i>Bowen</i>	41

SIGLAS E ABREVIATURAS:

CEG	Centro de Estudos Geográficos
CML	Câmara Municipal de Lisboa
DIGC	Divisão de Informação Geográfica e Cadastro
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<i>MDE</i>	<i>Modelo digital de elevação</i>
<i>MEMI</i>	<i>Munich Energy Balance Model for Individuals</i>
<i>NDVI</i>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
Pa	Tensão de vapor de água
PDM	Plano Director Municipal
<i>PET</i>	<i>Physiological Equivalent Temperature</i>
<i>PMV</i>	<i>Predicted Mean Vote</i>
<i>SVF</i>	<i>Sky view factor</i>
Ta	Temperatura do ar
Tmrt	Temperatura radiativa média
Vv	Velocidade média do vento
<i>TIN</i>	<i>Triangulated Irregular Network</i>
Z ₀	Rugosidade

I. INTRODUÇÃO

É largamente conhecida a crescente concentração humana em áreas urbanas¹, com graves implicações para a sua sustentabilidade² e qualidade de vida dos habitantes. A degradação da qualidade do ar e a diminuição dos espaços verdes e áreas de fruição e lazer na cidade, são alguns dos factores que colocam as cidades à beira dos limites da sustentabilidade e contribuem para o maior desconforto da vida urbana (Andrade, 2005). Sabe-se que as cidades têm uma clara influência nos padrões climáticos locais e regionais (Oke, 1987) e que, num contexto de previsível aquecimento global, as áreas urbanas serão particularmente afectadas e os seus habitantes vulneráveis aos efeitos deste aumento das temperaturas (Alcoforado et al, 2009b). Contudo, as questões climáticas ainda são menosprezadas nos actuais instrumentos de planeamento nacionais. Uma análise sistemática de diversos Planos Directores Municipais (PDM), efectuada por Alcoforado e Vieira (2004), demonstrou que a informação climática é escassa, pobre e nunca são incluídos mapas do clima local ou abordadas questões de conforto bioclimático. Os primeiros passos foram dados em Lisboa, no âmbito de um programa de cooperação entre a Câmara Municipal de Lisboa (CML) e o Centro de Estudos Geográficos, com a realização de um trabalho, intitulado *Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa* (Alcoforado et al, 2005).

O estudo aprofundado do clima desempenha um papel decisivo, não só no correcto e eficaz processo de planeamento e ordenamento urbanístico (Oke, 2006; Alcoforado et al, 2009), para a definição de modelos de desenvolvimento urbano sustentáveis, como também no domínio da prevenção dos riscos, salvaguardando o bem-estar e a saúde da população (Andrade, 2005). Mas é igualmente fundamental que, ao nível do quadro legislativo e normativo dos vários planos de ordenamento do território, sejam contemplados estudos climáticos e bioclimáticos (Andrade, 2005).

Embora os efeitos do clima na saúde e bem-estar sejam desde há muito reconhecidos, o desenvolvimento da bioclimatologia e a tomada de consciência da sua importância é relativamente recente. Da necessidade de quantificar e integrar num único parâmetro, o efeito combinado das diferentes variáveis atmosféricas sobre o

¹ Segundo o relatório da *UNFPA (United Nations Population Fund)* sobre o Estado da População Mundial em 2007, a população urbana no mundo, passou de 200 milhões para 2,8 biliões durante o século XX. Em 2008, mais de metade da população mundial (3,3 biliões de pessoas) estava a viver em áreas urbanas. Em 2030 espera-se que atinja os 5 biliões (80% da população mundial).

² Segundo o Relatório Brundtland (1987) sustentabilidade é a capacidade de “suprir as necessidades da geração presente sem afetar a habilidade das gerações futuras de suprir as suas”.

corpo humano, surgiram os índices bioclimáticos (Andrade, 1998). Se os primeiros índices³ eram relativamente simples, baseados unicamente em parâmetros meteorológicos e tinham aplicabilidade restrita, a ‘nova geração’, mais evoluída, já entra em consideração com o balanço energético do corpo humano (Parsons, 1993; Andrade, 2003).

Uma das actuais preocupações nas áreas urbanas prende-se, sobretudo, com os riscos térmicos e com a sua influência no conforto e saúde da população (Curriero et al., 2002, Garcia-Herrera et al., 2005; Kovats e Hajat, 2008).

Lisboa, à semelhança de outras grandes cidades mundiais, foi alvo de diversos estudos climáticos e bioclimáticos (Alcoforado, 1987, 1993, 2006; Alcoforado et al, 2005; Alcoforado e Andrade, 2006; Andrade, 2003; Andrade e Vieira, 2005; Andrade e Alcoforado, 2008; Lopes, 2002, 2003, 2006a, 2006b; Vasconcelos e Lopes, 2007, Alcoforado et al. 2008). No entanto, no âmbito da bioclimatologia aplicada não existem ainda muitos trabalhos desenvolvidos. É assim, neste contexto e sobretudo na perspectiva do conforto climático da população de Lisboa, que este trabalho pretende dar o seu contributo.

O objectivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a elaboração de mapas bioclimáticos e efectuar a modelação espacial de um índice bioclimático aplicado à cidade de Lisboa. Com o recurso aos sistemas de informação geográfica, foram integradas e cartografadas as várias variáveis meteorológicas e físicas do território e modelado espacialmente o valor do índice (correspondente a determinados níveis de conforto térmico), para os diferentes tipos de tempos. A selecção desses tipos de tempo baseou-se na sua severidade ou na sua frequência. O índice escolhido – *Physiological Equivalent Temperature (PET)* (Höppe, 1999; Matzarakis et al., 1999), tem sido largamente utilizado por diversos autores e aplicado em diversos tipos de clima (Andrade, 2003).

Para além dos mapas finais da *PET*, serão apresentados e discutidos os mapas de cada uma das variáveis climáticas utilizadas – temperatura do ar, vento e temperatura radiativa, assim como alguns mapas de base com influência directa nos elementos atmosféricos – ocupação do solo, albedo e rugosidade. Deste trabalho, resultarão,

³ Expressam de forma integrada os factores que influenciam as trocas corpo-ar (temperatura do ar, temperatura radiativa, vento e humidade relativa) ou são obtidos através de fórmulas específicas que podem implicar uma combinação de diferentes elementos climáticos (Tuhkanen, 1980).

portanto, um conjunto de mapas climáticos que se espera poderem constituir bons instrumentos de caracterização climática da cidade.

A identificação e caracterização destas áreas é particularmente importante para a definição de estratégias de prevenção e actuação em eventos de risco climático associadas a temperaturas extremas – situações de frio ou de calor. Os mapas produzidos são instrumentos de planeamento e gestão bastante úteis e de fácil utilização pelos técnicos e decisores, quer da área urbanística quer da área do socorro à população.

Assim, na primeira parte deste trabalho, abordam-se e clarificam-se de forma sintética os conceitos considerados mais relevantes no contexto do presente estudo, os índices mais utilizados e a pertinência da bioclimatologia humana em contexto urbano.

No terceiro capítulo, é caracterizada a morfologia urbana de Lisboa, aborda-se o comportamento das variáveis climáticas e descrevem-se os tipos de tempo mais frequentes na cidade.

De seguida (quarto capítulo), são descritos os aspectos metodológicos subjacentes ao desenvolvimento deste trabalho, com incidência nos dados de base utilizados e constrangimentos à sua utilização, nos modelos de análise, na definição dos tipos de tempo considerados e por fim, na cartografia.

Para terminar, são apresentados e discutidos os resultados obtidos – mapas finais e intermédios, sua análise para cada uma das situações climáticas típicas consideradas, relação com o padrão de distribuição espacial das temperaturas e com o regime do vento, e registadas as conclusões finais.

São ainda feitas algumas referências à importância dos mapas obtidos para a definição de políticas e acções de prevenção.

II. BIOCLIMATOLOGIA HUMANA: UM ENQUADRAMENTO TEÓRICO

1. Conceitos de bioclimatologia humana

1.1. Evolução da bioclimatologia

O clima é desde há muito reconhecido como um dos factores que mais fortemente condiciona o modo de vida das populações. As variáveis atmosféricas que influenciam o conforto térmico dos indivíduos (Alcoforado e Andrade, 2007) são a temperatura, a humidade do ar, a velocidade do vento e a temperatura radiativa (designados por complexo térmico) (Andrade, 2003).

Na Europa, os primeiros estudos científicos relacionados com o bem-estar climático surgiram no século XIX, com o objectivo de estabelecer critérios adequados para os trabalhadores das indústrias mineiras e têxteis, os quais sofriam frequentemente enfermidades, em consequência das altas temperaturas e humidade a que estavam sujeitos (Garcia, 1996). No início do século XX, surgem os primeiros aparelhos de refrigeração e com isso os estudos para avaliação do conforto em espaços interiores, a maior parte das vezes promovidos pela própria indústria de ar condicionado (Monteiro e Alucci, 2007).

Se inicialmente, os estudos apresentavam uma forte perspectiva determinista, em que o clima determinava e explicava o comportamento do homem, mais tarde evoluiu-se para uma visão mais possibilista, em que o clima condiciona mas raramente determina (Fernández-García, 1991). Com o desenvolvimento dos métodos quantitativos e a colaboração interdisciplinar (biologia, medicina, etc), estes estudos tornaram-se mais objectivos e a área da bioclimatologia surge como uma reconhecida ciência (Höppe, 1997).

Os termos bioclimatologia e biometeorologia surgem muitas vezes na bibliografia como sinónimos. Mayer (1993), define biometeorologia humana como a ciência que “estuda os efeitos do tempo, clima e poluição atmosférica sobre o organismo humano” e bioclimatologia como a ciência que “trata dos aspectos espaciais e aplicados das relações entre a atmosfera e os seres vivos”. Mais recentemente, Auliciems (1997) caracteriza a bioclimatologia como uma ciência interdisciplinar, que estuda as interacções entre a atmosfera e os seres vivos, o que pressupõe um carácter adaptativo dos seres humanos e das sociedades à variabilidade das condições atmosféricas. Nesta perspectiva, no presente trabalho utiliza-se o termo bioclimatologia.

A avaliação da ambiência atmosférica sobre os seres humanos é um dos grandes objectos de estudo da bioclimatologia humana. Com a crescente degradação ambiental nas cidades, o aumento da concentração de população nos centros urbanos, e o conseqüente aumento da mortalidade e morbilidade dos seus habitantes (Jauregui, 1997), esta ciência tem-se debruçado sobre os efeitos que o clima urbano e as alterações, induzidas pelo processo de urbanização, têm sobre a saúde e bem-estar dos seus habitantes (Jauregui, 1997) – a bioclimatologia urbana. Mas tem sido o complexo térmico⁴ que tem merecido mais atenção, embora a qualidade do ar e os efeitos biológicos da radiação solar (principalmente o espectro visível e ultra-violeta, devido ao seu impacte) tenham vindo a aumentar a sua importância no âmbito dos estudos de bioclimatologia humana (Höppe, 1997; Matzarakis e Amelung, 2008).

As áreas de aplicação da bioclimatologia humana estão associadas às actividades de planeamento e ordenamento urbano, tendo em vista a melhoria da qualidade do ambiente e bem-estar da população e a avaliação e mitigação de riscos relacionados com a ocorrência de eventos climáticos extremos, por exemplo ondas de calor (Andrade, 2003; Alcoforado et al., 2009).

1.2. Balanço energético do corpo humano

O corpo humano reage às alterações do ambiente atmosférico. Como o ser humano é um ser homeotérmico, ou seja, tem a capacidade de manter a sua temperatura corporal, mais ou menos constante, entre 36 e 37°C. (Fernández García, 1996; Andrade, 1998), quando o meio apresenta condições térmicas adversas, o sistema termoregulador é activado. Desencadeiam-se então respostas fisiológicas, através das quais o organismo tenta reduzir ou aumentar as perdas de calor, como reacção às variações de temperatura do ar (Parsons, 1993; Andrade, 1998). A figura 1 apresenta esquematicamente as trocas energéticas e radiativas entre a atmosfera e o corpo humano.

⁴ Complexo térmico, compreende as variáveis meteorológicas (temperatura do ar, humidade atmosférica, velocidade do vento, radiação) que exercem um efeito termofisiológico sobre os seres humanos (Matzarakis e Amelung, 2008).

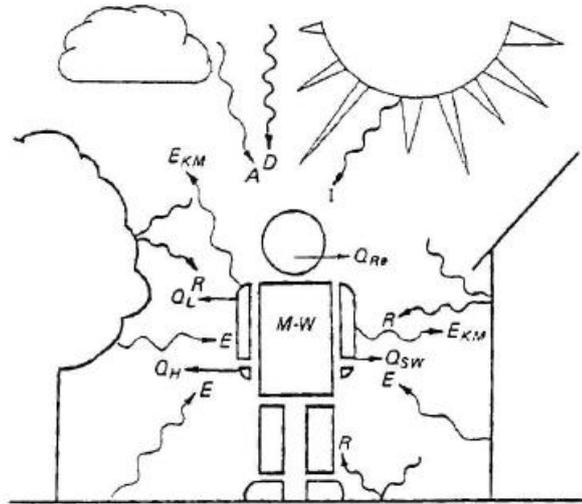


Figura 1 – Balanço energético do corpo humano (fonte: VDI 3787, 1997)

As equações do balanço energético e radiativo do corpo humano foram formuladas por Fanger (1972) e modificadas por Hoppe, 1993 e VDI, 1998 citada em Andrade e Vieira, 2005:

Balanço energético:

$$M + W + Q^* + Q_h + Q_L + Q_{sw} + Q_{re} = 0$$

Balanço radiativo:

$$Q^* = [(I + D + R) * a_k + (A + E) * a_l] - E_{km}$$

Sendo que,

Componentes do balanço energético:	Componentes do balanço radiativo:
M = taxa metabólica	I = radiação solar directa
W = energia mecânica	D = radiação solar difusa
Q* = balanço de radiação	R = radiação solar reflectida pelas superfícies envolventes
Q _h = fluxo turbulento de calor sensível (essencialmente transferência de calor por convecção)	A = radiação térmica da atmosfera
Q _L = fluxo turbulento de calor latente (difusão do vapor de água)	E = radiação térmica das superfícies envolventes
Q _{sw} = fluxo turbulento de calor latente (evaporação do suor)	E _{km} = radiação térmica emitida pelo corpo humano
Q _{re} = fluxo respiratório de calor sensível e latente	a _k = coeficiente de absorção para a radiação solar
	a _l = coeficiente de absorção para a radiação de grande comprimento de onda

As principais trocas de calor entre o corpo humano e a atmosfera fazem-se, através de fluxos de calor sensível e latente, por condução (sem grande expressão e geralmente negligenciável), convecção e evaporação (Andrade, 1998, 2003). Os fluxos respiratórios, de calor sensível e latente, têm uma importância reduzida. Os convectivos de calor sensível estão muito dependentes do movimento do ar e da diferença de temperatura entre o corpo e a atmosfera e os fluxos de calor latente da humidade atmosférica são, igualmente, dependentes do movimento do ar.

As trocas radiativas não são fáceis de determinar, pelo facto de o corpo humano ter uma forma complexa e existirem muitos factores que intervêm na quantidade de radiação solar interceptada e absorvida⁵ por um indivíduo – orientação e postura do corpo e altura do sol (Underwood e Ward, 1966), cor da pele e do vestuário, quantidade de superfície do corpo ocupada por cada um (roupa e pele descoberta). Normalmente utiliza-se a temperatura radiativa média (T_{mrt}) para estimar a quantidade de radiação (solar e térmica) recebida pelo corpo. A direcção e intensidade dos fluxos radiativos dependem da diferença entre a temperatura da pele e a T_{mrt} .

Para o controlo da produção e transferência interna de calor, por um lado, e das trocas de calor entre a pele e a atmosfera por outro, o corpo humano dispõe de três mecanismos fisiológicos principais (Parsons, 1993; Andrade, 2003):

- o controle da circulação periférica de sangue, através da vasodilatação (redução do isolamento, em situações de calor) ou vasoconstrição (aumento do isolamento, em situações de frio);

- a segregação de suor. A evaporação do suor é o mecanismo mais eficiente de arrefecimento mas a sua eficácia está muito dependente do gradiente de humidade entre a pele e a atmosfera, da velocidade do ar e do vestuário; e,

- a termogénese. Desencadeia-se quando se dá um arrefecimento do corpo e consiste numa intensificação da tonicidade muscular e da actividade de alguns outros órgãos, no sentido de aumentar a produção de calor (arrepios de frio).

Segundo a maioria dos autores, a zona de conforto, ocorre normalmente, para um indivíduo vestido e em repouso, em condições com temperaturas compreendidas entre os 20 e os 25°C, com vento muito fraco, humidade atmosférica moderada e sem radiação solar directa (Andrade, 1998). É também de ressaltar que o conforto bioclimático depende não só do complexo térmico mas também do efeito mecânico sobre o corpo humano. O vento por exemplo, acima de determinados valores de velocidade, afecta significativamente o conforto dos indivíduos, podendo chegar

⁵ Em modelos do balanço energético do corpo humano é considerada uma absorvidade de 0,67 a 0,7 (diversos autores, citados por Auliciems, 1997).

mesmo a interferir com o seu deslocamento em segurança. Um estudo efectuado por Saraiva et al. (1997) no Parque das Nações, mostra que velocidades superiores a 9m/s afectam significativamente a marcha dos indivíduos e acima de 20m/s podem ser perigosos para os mais debilitados fisicamente (citado por Lopes, 2003).

Os mecanismos de termorregulação não são unicamente fisiológicos (involuntários). Concomitantemente pode haver respostas comportamentais (voluntários) (Oke, 1987; Parson, 1993; Andrade, 1998) – ingestão de fluidos quentes ou frios, regulação do nível de actividade física, alteração do vestuário e da exposição solar, entre outros.

O vestuário tem um importante papel na regulação do conforto térmico (Höppe, 1997). As suas características influenciam as trocas de calor e de vapor de água entre o corpo humano e a atmosfera. O vestuário tem uma função de isolamento. A eficácia deste isolamento depende do tipo e espessura do material e do grau de cobertura que proporciona. A medida que expressa a resistência térmica do material é designada por Clo^6 . No quadro 1 apresentam-se alguns exemplos do isolamento térmico proporcionado por diferentes tipos de roupas. (Andrade, 1998)

Tipo de vestuário	Isolamento térmico (Clo)
Ausência de vestuário	0
Calções	0,1
Vestuário ligeiro de Verão	0,5 a 0,6
Fato completo	1
Fato pesado e sobretudo de Inverno	2
Vestuário polar	3 a 4

Quadro 1 – Isolamento térmico de diferentes tipos de roupas (Andrade, 1998 extraído de VDI 3787, 1998)

1.3. Sensação e conforto térmico

É importante distinguir entre sensação e conforto térmico: A sensação térmica corresponde à percepção objectiva do complexo térmico, através de termorreceptores (Parsons, 1993). O conforto térmico é definido como “o estado mental que expressa a satisfação do indivíduo com o ambiente térmico envolvente” (ASHRAE⁷, 1966; citado por diversos autores), estando portanto relacionado com a forma como o indivíduo sente. É, assim, uma questão do foro psicológico, em que interferem numerosos

⁶ 1 Clo = vestuário necessário para manter confortável, um indivíduo sedentário, a uma temperatura de 21°C (Parsons, 1993).

⁷ American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

factores de carácter afectivo e cognitivo (Parsons, 1993; Oliveira e Andrade, 2007), existindo, por esse facto, importantes diferenças entre indivíduos. Factores pessoais, como o comportamento, a adaptação a determinado ambiente, a motivação ou a expectativa térmica, intervêm com os parâmetros fisiológicos na definição do estado de conforto de um indivíduo.

O conforto e a sensação térmica são um fenómeno bipolar, ou seja, variam desde o desconforto pelo frio ao desconforto pelo calor, passando pela situação intermédia de neutralidade (relativa à sensação térmica) e conforto (Parsons, 1993).

Existem estudos que correlacionaram as condições físicas do ambiente e as respostas fisiológicas com a sensação térmica (exemplo de Oliveira e Andrade, 2007).

1.4. Índices térmicos

Os índices bioclimáticos, pela utilização combinada de vários parâmetros atmosféricos, permitem uma melhor avaliação do efeito do clima sobre a sensação e conforto térmico.

A primeira geração de índices térmicos, caracterizava-se pela sua simplicidade e pela utilização de um número reduzido de variáveis (apenas meteorológicas). Disso são exemplos o *Wind-Chill*, de Siple e Passel (1945), que entra em consideração com o efeito refrigerador do vento; e a Temperatura Efectiva, de Houghten e Yaglou (1923), posteriormente corrigida por Vernon e Warner (1932), determinada com a combinação da temperatura, da velocidade do vento e da temperatura do globo para efeitos da radiação (Parsons, 1993; Andrade, 2003). Muitas limitações foram apontadas a estes índices, nomeadamente o reduzido número de variáveis utilizado, a dificuldade de extrapolar os resultados para outras situações, uma vez que consideravam condições muito standartizadas, e o facto de não terem em conta as diferenças individuais (Jauregui, 1998; Andrade, 1998, 2003). A maior parte dos índices foram desenvolvidos para espaços interiores apresentando limitações quando transpostos para o exterior (Jauregui, 1998). Esforços para cartografar os bioclimas humanos em diferentes regiões proliferaram nos anos 60 e 70 do século XX – exemplo de Terjung (1966 e 1968), que aplicou diversos índices na tentativa de avaliar e classificar, do ponto de vista bioclimático, o continente africano e mais tarde o mundo (Jauregui, 1998). Das limitações apontadas, foram surgindo sugestões, de diversos autores, para a necessidade de incluir, para além dos parâmetros meteorológicos, também

características do vestuário e do balanço energético entre o homem e a atmosfera (Jauregui, 1998).

Foram ainda feitas outras abordagens tentando adicionar as reacções psicológicas ao modelo – Auliciems (1981, 1983), tentou definir critérios de conforto térmico, não só do ponto de vista fisiológico mas também incorporando factores psicológicos e de habituação (Jauregui, 1998).

Mas desde cedo (1938), Buttner reconhece e chama a atenção para a importância da modelação do balanço térmico do corpo humano (Höppe, 1999). Os índices térmicos mais recentes, têm já em consideração o balanço energético do corpo humano, traduzindo as respostas fisiológicas às condições climáticas (Höppe, 1999).

Foi Fanger, em 1970, quem estabeleceu um dos primeiros modelos de balanço térmico do corpo humano – que permite calcular o índice *Predicted Mean Vote (PMV)*. Inicialmente concebido unicamente para espaços fechados e interiores, foi posteriormente modificado por Jendritzky et al. (1979) englobando parâmetros de avaliação dos fluxos radiativos e permitindo a sua aplicação a ambientes de exteriores (Höppe, 1997). Apresenta contudo, algumas limitações na aplicação em situações extremas (ISO 7730, 1984, citado por Andrade, 1998).

Outros modelos de balanço energético do corpo humano e índices foram entretanto desenvolvidos. Modelos mais dinâmicos que possibilitam modelar, para um ambiente térmico determinado (e actividade física e vestuário definidos⁸), os mecanismos termofisiológicos do corpo humano e determinar os gastos energéticos associados à resposta fisiológica para a regulação da temperatura corporal (Höppe, 1999; Andrade, 2003). Entre estes encontra-se o modelo *MEMI – Munich Energy-balance Model for Individuals*, desenvolvido por Höppe (Höppe, 1999; Matzarakis e Mayer, 2000; Andrade, 2003; Matzarakis e Amelung, 2008), e que se encontra na base do cálculo da *Physiological Equivalent Temperature (PET)*, índice escolhido para aplicação neste trabalho e descrito seguidamente. Os resultados são dados pela quantificação dos fluxos de calor (entre o interior do corpo e a pele, por um lado e entre o corpo e o ambiente, por outro), temperatura corporal e taxa de sudação (Höppe, 1997; Andrade, 1998, 2003).

⁸ Este modelo considera valores fixos de metabolismo de 80 W/m₂ e vestuário de 0,9 Clo.

1.5. *Physiological Equivalent Temperature*

Mayer e Hoppe, desenvolveram em 1987 (alterado por Hoppe, em 1993) o índice *PET*, baseado no modelo *MEMI*, de forma a traduzir os resultados termofisiológicos obtidos por aquele modelo em temperatura do ar equivalente (Höppe, 1999).

Assim, a *PET* pode ser definida como a temperatura do ar, de um compartimento fechado e com condições padrão ($T_a = T_{mrt}$; $V = 0,1$ m/s e tensão de vapor = 12 hPa) que requeira a mesma resposta termofisiológica (em termos de temperatura corporal e temperatura da pele) que o ambiente real (Hoppe, 1999; Andrade, 1998, 2003; Matzarakis e Amelung, 2008). Considera um indivíduo padrão, do sexo masculino, com 35 anos de idade, 1,75 m de altura e 75 kg de peso. Os parâmetros meteorológicos que entram no cálculo deste índice são, a temperatura do ar (T_a), a humidade atmosférica, a velocidade do vento e a temperatura radiativa média (T_{mrt}). O isolamento térmico do vestuário e a actividade física são considerados constantes (respectivamente 0,9 *Clo* e 80 W/m^2)

Matzarakis e Mayer, estabeleceram uma relação entre a escala de conforto do *PMV* determinada por Fanger e os valores de *PET*, para níveis equivalentes de actividade e vestuário, permitindo definir limiares das classes de sensação térmica (quadro 2) (Andrade, 1998, 2003; Matzarakis et al., 1999; Matzarakis e Amelung, 2008).

<i>PET</i>	<i>PMV</i>	Sensação térmica	Nível de esforço termorregulatório
4	-3,5	Muito frio	Extremo
		Frio	Elevado
8	-2,5	Fresco	Moderado
13	-1,5	Ligeiramente fresco	Ligeiro
18	-0,5	Confortável	Ausência de esforço
23	0,5	Ligeiramente quente	Ligeiro
29	1,5	Quente	Moderado
35	2,5	Muito quente	Elevado
41	3,5	Extremamente quente	Extremo

Quadro 2 – Classes de *PET* para limiares de sensação térmica e esforço termorregulatório (para um metabolismo de 80 W/m^2 , correspondente a exercício ligeiro, e vestuário com isolamento térmico de 0,9 *Clo*) (Matzarakis et al., 1999)

É de ressaltar que a iguais valores de *PET* podem corresponder diferentes ambientes térmicos – por exemplo, um valor de temperatura do ar mais baixa pode ser compensada por uma temperatura radiativa mais elevada.

Tendo em conta o objectivo do presente trabalho, a escolha deste índice para a modelação bioclimática na cidade de Lisboa teve como fundamentos:

- ser válido em todos os climas, estações e escalas (Matzarakis et al., 1999; Andrade, 2003);
- expressar-se em graus centígrados, o que assegura a sua fácil compreensão e utilização (Matzarakis et al., 1999; Andrade, 1998);
- manter constantes os parâmetros pessoais, sendo por isso adequado à análise espacial e temporal das condições bioclimáticas (Andrade, 2003);
- existirem já alguns estudos realizados para Lisboa (Andrade, 2003; Andrade e Vieira, 2005; Andrade e Alcoforado, 2008) com a aplicação deste índice; e,
- permitir fazer previsões ou simulações mediante alterações dos parâmetros ambientais (Matzarakis et al., 1999, 2008).

2. A Bioclimatologia humana em contexto urbano

Nas áreas urbanas, pela grande concentração de população, pela elevada densidade de construção e de actividades antrópicas, assiste-se crescentemente a uma degradação do clima e da qualidade do ar - aquecimento, poluentes, alérgenos. Este facto, associado às alterações climáticas, como o aumento das temperaturas médias e da frequência e intensidade dos fenómenos extremos (nomeadamente das vagas de calor), faz das cidades espaços particularmente vulneráveis à acção dos elementos meteorológicos. O efeito global é potenciado pelos fenómenos locais, nomeadamente pela ilha de calor urbano (Alcoforado et al, 2009).

Assim sendo, embora os factores atmosféricos com efeito bioclimático nas áreas urbanas não se resumam ao complexo térmico, e se alarguem ao ruído e à qualidade do ar, entre outros, no presente trabalho apenas vamos considerar os elementos atmosféricos que influenciam directamente o balanço térmico do corpo humano e consequentemente o seu nível de conforto.

É na atmosfera urbana inferior (*urban canopy layer*), camada de ar entre o nível do solo e o nível médio do topo dos edifícios (Oke, 1987; Alcoforado, 1993; Andrade, 2003) que as características e estrutura dos elementos urbanos têm mais influência

sobre as condições climáticas da camada inferior da atmosfera – a que directamente interfere no estado de conforto dos indivíduos (Andrade, 2003).

2.1. A importância da temperatura do ar no conforto térmico e na saúde

A temperatura do ar é dos parâmetros atmosféricos que mais condiciona o conforto humano e melhor caracteriza o clima da cidade (Fernández-García, 1996). As profundas e constantes alterações na cobertura do solo e composição da atmosfera, provocadas pelo crescimento urbano e actividades antrópicas associadas, conduziram a um aumento da temperatura nas cidades em relação às áreas não urbanizadas mais próximas - a ilha de calor urbano (Alcoforado, 1993; Alcoforado et al., 2005).

A ilha de calor tem impactes no conforto dos habitantes das cidades. Se nos climas frios aquela pode revelar-se benéfica, elevando o nível de conforto e contribuindo para menores gastos energéticos, já num clima como o de Lisboa, com Verões quentes, poderá ter efeitos negativos sobre o conforto e saúde da população (Alcoforado et al., 2005; Andrade, 2003). O seu efeito poderá ser particularmente nocivo durante os eventos de ondas de calor (exemplo de Julho e Agosto de 2003), que podem ter um forte impacto nas taxas de mortalidade e morbidade (Nogueira e Paixão, 2005).

Mas se o baixo albedo, a elevada condutividade térmica dos materiais, as reflexões múltiplas entre edifícios, a redução do *Sky View Factor (SVF)*⁹, entre outros factores, são a causa do aumento da temperatura na cidade, a presença de espaços verdes e de planos de água têm um efeito regulador. O estudo climático de Andrade e Vieira (2005), sobre o jardim da Fundação Calouste Gulbenkian, põe em evidência a importância destes espaços enquanto amenizadores das temperaturas extremas, particularmente no Verão. A posição geográfica de Lisboa, junto ao estuário do Tejo, permite-lhe tirar partido do ar fresco e húmido transportado pelas brisas vindas do rio, contribuindo para um significativo arrefecimento da temperatura da cidade (Alcoforado, 1987, 1993; Alcoforado et al. 2006; Lopes, 2003).

A ilha de calor da cidade de Lisboa e o sistema de brisas serão sucintamente caracterizadas no capítulo seguinte.

⁹ Corresponde à razão entre a porção de céu observado a partir de um determinado ponto da superfície terrestre e máximo potencialmente visível, na ausência total de obstáculos (Oke, 1987).

2.2. A importância do vento e brisas no conforto térmico

O vento tem uma importância extrema no ambiente climático das cidades, não só enquanto factor amenizador da ilha de calor, como enquanto elemento de transporte e dispersão de poluentes (Oke, 1987; Alcoforado et al., 2005; Lopes, 2003).

O efeito do vento sobre o conforto térmico é difícil de avaliar e depende, não só da sua interacção com as outras variáveis atmosféricas mas também das características dos indivíduos (vestuário, actividade física, estado psicológico, saúde).

Em Lisboa, os diversos estudos efectuados por vários autores (Alcoforado, 1987, 2006; Alcoforado et al., 2005, 2006; Lopes, 2003; Andrade, 1998, 2003; Andrade e Alcoforado, 2008), revelaram uma forte relação entre o campo térmico da cidade e as condições de advecção, particularmente nos meses de Verão. As brisas vindas do Tejo, com um ar mais fresco e húmido, interrompem o aumento das temperaturas diurnas, principalmente nas áreas mais ribeirinhas e ao longo dos arruamentos perpendiculares ao rio que permitem a entrada da brisa para o interior da cidade. Nas áreas ou dias sob a forte influência do vento dominante de norte, também se verifica um maior arrefecimento da cidade. O vento tem, por isso, aqui um significado bioclimático importante, contribuindo para uma diminuição do desconforto provocado pelo excessivo aquecimento da cidade. No entanto, no Inverno a presença de um vento forte pode contribuir para acentuar a sensação de desconforto (Andrade, 2003).

Já foi referido que o vento exerce também um efeito mecânico sobre os indivíduos com impacte negativo no seu grau de conforto. Saraiva et al. (1997) estabeleceram para a zona da Expo 98, em Lisboa, limiares de conforto e segurança tendo em conta a velocidade do vento (citado por Alcoforado et al., 2005): com velocidades superiores a 5m/s sente-se já algum desconforto, com 10m/s torna-se francamente desconfortável e ultrapassando os 16m/s constitui já algum perigo, principalmente para pessoas mais debilitadas.

Também é reconhecida a influência da morfologia e geometria da cidade na modificação dos campos de ventos, sobretudo devido ao aumento do atrito da superfície do solo (Oke, 1997; Lopes, 2002, 2003). Lopes (2003) no seu trabalho sobre os campos de vento na cidade de Lisboa aponta para uma redução de 26 a 30% da velocidade do vento junto ao solo (cerca de 3m/s), com a expansão urbana verificada no norte da cidade. Esta diminuição é particularmente sentida no Verão, podendo contribuir para uma degradação das condições de conforto na cidade.

III. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E MORFOLÓGICA DE LISBOA

A caracterização que seguidamente se apresenta, não pretende ser exaustiva, mas apenas dar uma ideia geral das características topográficas, climáticas e urbanísticas da cidade.

1. Enquadramento Geográfico de Lisboa

A cidade de Lisboa está localizada na faixa ocidental de Portugal Continental, à latitude aproximada de 38°42' norte e a uma longitude de 9°10' oeste. A sua posição geográfica próximo do litoral – a cerca de 30km do Oceano Atlântico e na margem norte do estuário do Tejo (figura 2), as suas características topográficas – com um relevo algo acidentado, dominado pela Serra de Monsanto, a oeste (com altitudes superiores a 200m), e urbanísticas, modelam as suas condições climáticas (Alcoforado, 1987).

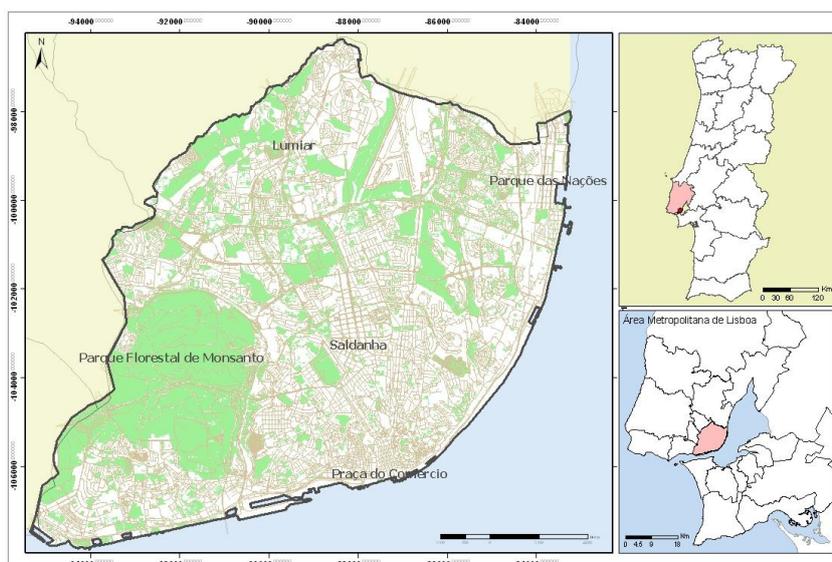


Figura 2 – Localização do concelho de Lisboa

É enquadrada a oeste pela Serra de Sintra (com cerca de 500m) e a norte pela Serra da Carregueira (com aproximadamente 300m), pela depressão de Loures e pela Ribeira de Odivelas.

Do ponto de vista topográfico, o relevo da cidade caracteriza-se por alguns contrastes apesar de não haver grandes variações altitudinais. A oeste situa-se a colina de Monsanto, com 216m de altitude máxima. A este de Monsanto, estende-se um planalto (frequentemente referido como o “Planalto de Lisboa”), antiga superfície de erosão (Alcoforado, 1993), com altitudes compreendidas entre os 80 e os 100m, que desce progressivamente em direcção ao

rio Tejo. A norte, esta superfície apresenta-se mais bem conservada e com alguns vales largos (Campo Grande, Av. Gago Coutinho, Benfica), mas à medida que se aproxima do rio, aquela superfície vai-se apresentando mais degradada e cortada por vales mais estreitos e encaixados, com direcção sensivelmente norte-sul (Andrade, 2003). Estes vales apresentam, em alguns troços, vertentes com um forte declive.

Na zona oriental, o “Planalto de Lisboa” desce progressivamente em direcção ao rio Tejo, atingindo uma altitude máxima no Parque da Bela Vista, superior a 100m e mínima junto à área ribeirinha.

A sul, junto ao estuário do Tejo, o relevo apresenta-se mais acidentado com interflúvios pouco extensos e onde as altitudes não ultrapassam os 100m (Alcoforado, 1992) (figura 3).

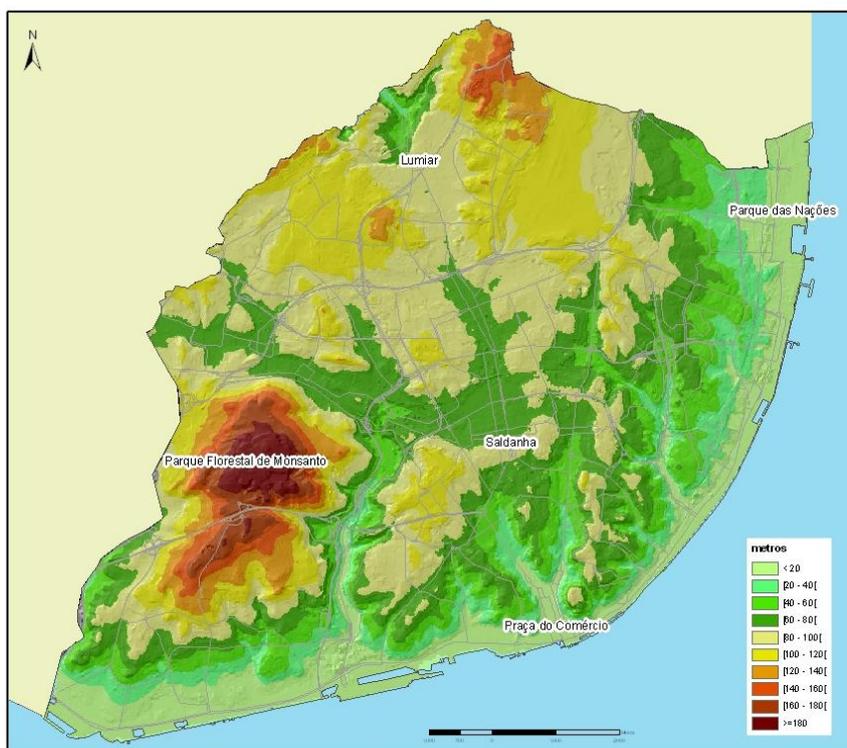


Figura 3 – Modelo Digital de Elevação de Lisboa (MDE) (Fonte: CML/DPC, 2009)

Estes são recortados por ribeiras de direcção aproximada norte-sul que desaguam no Tejo - Alcântara, eixos das Avenidas da Liberdade e Almirante Reis e Chelas. Os vales das ribeiras de Alcântara e de Chelas apresentam áreas de declive bastante acentuado (figura 4).

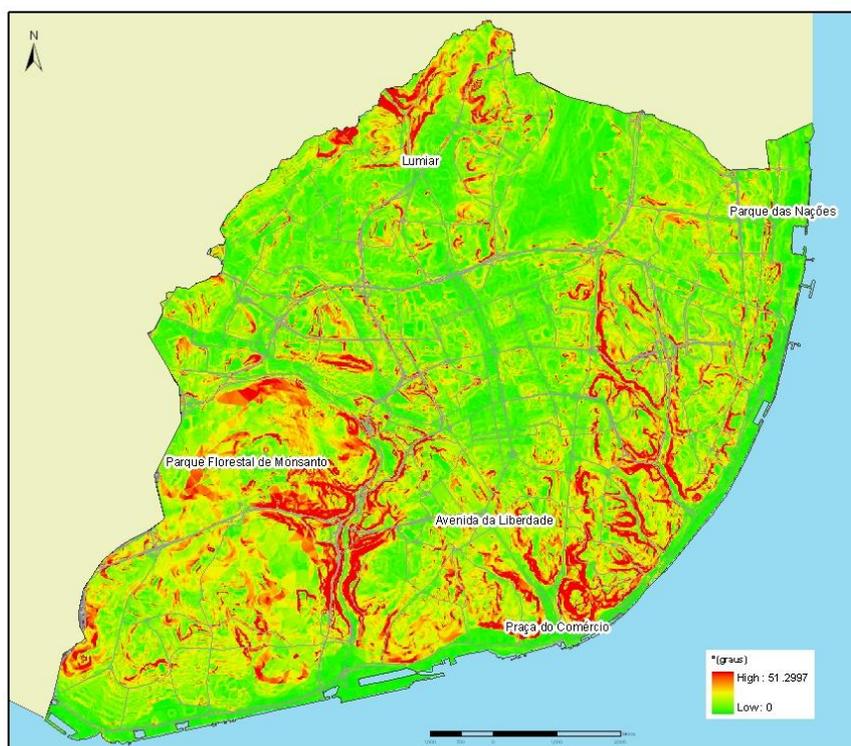


Figura 4 – Mapa de declives (Fonte: CML/DPC, 2009)

As áreas baixas situam-se ao longo de toda a faixa ribeirinha (coincidente com os limites sul e este do concelho) e nas numerosas zonas de vale, dispersas por todo o concelho. São vales jovens, que possuem pequenas bacias de alimentação, pelo que muitos deles apenas se apresentam bem definidos no sector terminal (CML/DPC, 2009).

2. Morfologia urbana

A cidade de Lisboa conheceu diversas fases e ritmos de crescimento. Apresenta por isso, actualmente, uma morfologia diversificada e heterogénea, com contrastes bem marcados em termos de tipologias arquitectónicas e construtivas. Coexistem assim, frequentemente, edifícios e estruturas urbanas de idades muito diferentes, evidenciando descontinuidades em altura, planta e ocupação e funções muito diferenciadas (Salgueiro, 2001; CML/DPC, 2009).

Lisboa apresenta um núcleo primitivo, no sul da cidade, que se desenvolveu na proximidade e virada para o estuário do Tejo. Nesta área central mais antiga, que se implantou e cresceu em torno da colina original e muralhada, desenvolve-se uma ocupação densa, de características muçulmanas e medievais que rapidamente se expande para fora dos muros, para sul (Alfama) até onde é hoje a Baixa (Gaspar, s/d citado por Lopes, 2003) e que mais tarde se estende para as colinas adjacentes - bairros históricos de Alfama, Castelo,

Graça e Mouraria. Esta estrutura urbana, fruto da topografia acidentada, é formada por ruas estreitas e sinuosas que cortam um tecido de malha irregular (Salgueiro, 2001) de forte densidade constructiva. Os edifícios são predominantemente pequenos, com cobertura de telha, não ultrapassando os três pisos e o espaço público é exíguo e praticamente inexistente.

Na época dos Descobrimentos verifica-se uma maior ocupação das zonas ribeirinhas, com a edificação de armazéns e estaleiros navais, por efeito da actividade marítima e mercantilista constante. É também, neste período, que se inicia a urbanização do Bairro Alto, com um traçado rectilíneo e ortogonal (CML/DPC, 2009).

Na sequência da destruição provocada pelo terramoto de 1755, surge uma grande renovação urbana, da responsabilidade do Marquês de Pombal, que reconstrói a Baixa segundo um desenho urbano mais regularizado e rectilíneo, substituindo a anterior estrutura medieval. A malha urbana é caracterizada por ruas longitudinais (norte-sul) e transversais (oeste-este), hierarquizadas, cortadas por ângulos rectos (Sanchez, 1994, citado por Lopes, 2003; Salgueiro, 2001). Os edifícios de 4 pisos, são constituídos por alvenaria e pedra e um pioneiro sistema anti-sísmico (a gaiola pombalina¹⁰).

Esta malha ortogonal, adoptada frequentemente para áreas planas, em épocas distintas, encontra-se expresso também noutros bairros da cidade (Salgueiro, 1992, 2001) – exemplos, do Bairro Alto (Século XVI), e nos finais do século XIX e século XX, Campo de Ourique, Avenidas Novas (Século XX), Bairro das Colónias, Alto de Santo Amaro, Estefânia, Alvalade e, mais recentemente, Telheiras (CML/DPC, 2009).

Com a construção de novos eixos de comunicação que fazem a ligação com algumas aldeias periféricas, o crescimento da cidade passa a fazer-se então para Norte, a partir da Baixa, em direcção ao planalto. A abertura das Avenidas da Liberdade e Almirante Reis (e de outras avenidas secundárias), na segunda metade do século XIX, veio estruturar o desenvolvimento posterior da cidade – surgem as ruas de passeios largos com árvores ou placas centrais arborizadas (Salgueiro, 1992). Com a ocupação dos espaços adjacentes a estas avenidas a cidade adquire uma estrutura radiocêntrica. Os bairros então construídos – Bairro da Estefânia, Campo de Ourique, Avenidas Novas, Calvário – são já estruturados obedecendo a um plano hierarquizado e de desenvolvimento ortogonal. Em 1903, são impostas algumas regras na edificação através da publicação do Regulamento de Salubridade das Edificações Urbanas. Este normativo definia a relação entre a altura do

¹⁰ “Estrutura tridimensional de madeira no interior dos edifícios, que não é visível por se encontrar embebida nas paredes de alvenaria, mas que permite a absorção de parte das acções e deslocamentos quando da ocorrência de um sismo” (site do LNEC, Departamento de Estruturas, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, consultado em Setembro de 2010).

edificado e a largura das ruas, o que permitiu assegurar boas condições de ventilação nestas áreas da cidade (Rodrigues, 2000, citado por Lopes, 2003).

Com a construção de grandes eixos estruturantes de saída/entrada na cidade, em direcção a norte (Queluz, Mafra, Porto, Sintra), o desenvolvimento dos transportes públicos e o êxodo do campo para a cidade verificado após a 2ª Grande Guerra Mundial, Lisboa conhece um maior crescimento (Salgueiro, 1992). O uso do solo, primitivamente rural, começa a ser alterado. Começam a ser promovidos e construídos pelo estado diversos bairros disseminados pela cidade. Os bairros de Encarnação, Santa Cruz ou Madre de Deus – moradias geminadas, com pequenos jardins; e mais tarde, os bairros de Alvalade, Restelo, Quinta do Charquinho e Pedralvas em Benfica - edifícios baixos (3 pisos) com áreas verdes, são alguns exemplos.

As principais vias de comunicação desenvolveram-se preferencialmente ao longo dos vales – Avenida de Ceuta, Avenida D. Carlos I, Avenida da Liberdade, Avenida Almirante Reis, expressando-se aqui o condicionamento do relevo sobre o crescimento urbanístico da cidade (Alcoforado, 1992).

A faixa ribeirinha foi muito cedo dotada de infra-estruturas de transporte e consequentemente grandes espaços ocupados por indústrias e armazéns que tentaram aproveitar as boas condições de acessibilidade existentes – Alcântara, Xabregas e Janelas Verdes (Salgueiro, 1992). Actualmente, enquanto na faixa ribeirinha oriental persistem e dominam ainda os grandes armazéns e infraestruturas portuárias e ferroviárias (excepção é feita pela área do Parque das Nações, com desenvolvimento urbanístico mais recente), a faixa ocidental (Alcântara a Belém) foi sendo ocupada com espaços verdes de lazer e alguns equipamentos de recreio e turismo.

Durante o Estado Novo, com o aparecimento de novas ligações aos concelhos limítrofes (auto-estradas para Sintra, Cascais e Ponte 25 de Abril), a cidade apresenta um decréscimo populacional e a fixação de habitantes nos concelhos limítrofes, assistindo-se a uma suburbanização. Os concelhos limítrofes da cidade continuam a ser, actualmente, áreas de grande crescimento urbanístico.

A oriente, implementam-se pela primeira vez os princípios da Carta de Atenas¹¹ nos planos de urbanização dos Olivais e Chelas, dominando aqui uma malha nucleada baseada numa implantação pontual (Salgueiro, 1992) rodeada por áreas verdes, procurando assim uma maior exposição solar e melhor arejamento das habitações.

¹¹ Manifesto urbanístico, resultante do IV Congresso Internacional de Arquitetura Moderna (CIAM), realizado em Atenas em 1933, que defende a separação das áreas residenciais, de lazer e de trabalho, propondo uma cidade-jardim, na qual os edifícios se localizam em áreas verdes pouco densas.

No final do século XX, novas urbanizações crescem na coroa mais periférica da cidade, nomeadamente o bairro de Telheiras (anos 70), com ruas largas, arborizadas, edifícios com harmonia geométrica, espaços verdes e equipamentos; a urbanização do Alto do Lumiar a norte, com elevada densidade de ocupação; e a oriente, o espaço ocupado pela EXPO' 98 – uma vasta área de habitação, serviços e equipamentos, de elevada densidade constructiva e alguns parques verdes.

A multiplicação de novas vias rodoviárias alteraram em muito o padrão de acessibilidades, promovendo o aparecimento de novas urbanizações, não só no interior da cidade como nos concelhos próximos (Salgueiro, 2001). A mancha urbanizada estende-se actualmente muito para além dos limites administrativos de Lisboa, ligando-se aos concelhos de Oeiras, Amadora, Loures, Sintra e Cascais num contínuo urbano. Com isto intensificou-se o ritmo e intensidade de vida na cidade – maior densidade construtiva, mais trânsito, mais fluxo de pessoas durante o dia, mais gastos energéticos, mas sem que com isso se tenha evitado uma forte perda populacional em Lisboa - nas últimas décadas (entre 1981 e 2001), perdeu mais de 240 mil habitantes (CML, 2009).

Em relação aos espaços verdes, olhando para o mapa da estrutura verde da cidade (figura 8), ressalta a ocidente o Parque Florestal de Monsanto (frequentemente apelidado de “pulmão da cidade”) que ocupa uma área muito representativa. Salientam-se ainda outros parques urbanos com expressão e importância na cidade – o Parque Eduardo VII, o Jardim do Campo Grande, o Parque do Vale do Silêncio e o Parque da Bela Vista. Existem ainda disseminados pela cidade diversos jardins públicos de proximidade que servem de espaços de lazer para os habitantes da cidade.

3. Caracterização do clima de Lisboa: o regime dos ventos e padrões térmicos, factores regionais e urbanos

Apesar da proximidade com o oceano Atlântico, a sua localização em posição de ‘abrigo’ face aos ventos dominantes, dificulta a penetração das influências marítimas de ocidente (Andrade, 2003), apresentando por isso características climáticas diferenciadas da faixa marítima mais próxima. O clima de Lisboa é de tipo mediterrâneo e caracteriza-se pela sua moderação térmica. Individualizam-se duas estações térmicas bem marcadas: um Verão quente e seco, e um Inverno, com temperaturas mais baixas e chuvoso. A temperatura média em Agosto (um dos meses mais quente) é cerca de 28,1°C e em Janeiro (um dos meses mais frios), a temperatura mínima média ronda os 8°C. A média anual de precipitação é de 763mm, mas entre Junho e Setembro é inferior a 62mm (Ventura, 1986; Alcoforado e Dias, 2002, citados por Alcoforado e Andrade, 2004). A taxa de insolação em Julho (típico mês de Verão)

é superior a 0,6 em 90% dos dias, enquanto em Janeiro esta percentagem desce para 45% dos dias. Os rumos de vento dominantes são de norte e noroeste (Alcoforado, 1993).

Lisboa possui actualmente duas estações meteorológicas principais (figura 5): Lisboa/Gago Coutinho, com localização periférica em relação ao centro da cidade, perto do aeroporto, na área oriental da cidade; e outra, Lisboa/Geofísico, perto do centro da cidade, inserida num espaço verde (o Jardim Botânico) e, por esse motivo, pouco representativa da estrutura urbana mais próxima. Existem ainda outras estações mas são actualmente pouco utilizadas, pela descontinuidade de registos.

3.1. O regime das temperaturas e a ilha de calor urbano

No interior da cidade, as variações térmicas observadas são explicadas pelas características topográficas e urbanas dos, embora o cálculo da intensidade da ilha de calor se revele complexo. A ilha de calor urbano em Lisboa está bem estudada e documentada em diversos estudos (Alcoforado, 1987, 1993; Alcoforado et al, 1995, 1998, 1999a, 1999b, 2000, 2003, 2005; Andrade, 1994, 1998, 2003a, 2003b; Andrade et al, 1999; Lopes, 1994, 1998, 2003; Lopes et al, 2001a, 2001b, 2002a, 2002b). De acordo com estes autores, verifica-se que, em média, a cidade permanece mais quente que os arredores próximos, sendo esta diferença máxima durante o Inverno (1°C e 0,5°C no Verão) (Alcoforado, 1987). A sua intensidade média situa-se, em geral, entre 1°C a 4°C (Alcoforado, 1992; Andrade, 2003; Alcoforado e Andrade, 2005) e é máxima durante a noite.

Quando o fluxo dominante é de norte/noroeste (predominante no Verão), as temperaturas mais elevadas ocorrem geralmente nas áreas com maior densidade de construção e em situação de abrigo aos ventos dominantes - Baixa e eixos de circulação adjacentes e faixa ribeirinha próxima. Em situações de calma, o padrão espacial da distribuição das temperaturas é muito variável em função da existência de brisa e da sua rotação diurna (Alcoforado et al., 2006). Sob a influência de brisas provenientes do oceano e do Estuário do Tejo, a temperatura na Baixa e de outros bairros ribeirinhos pode ser bastante menos elevada - uma 'ilha de frescura' substitui então a 'ilha de calor', podendo a Baixa estar 3 a 4°C mais fresca que o aeroporto. O núcleo da ilha de calor urbano migra então para uma posição mais setentrional (Avenidas Novas) (Alcoforado, 1993, 2005; Alcoforado et al, 2005).

Nos dias de Inverno, foram identificados por Alcoforado (1992) dois padrões térmicos: quando Lisboa está sujeita a ventos do quadrante norte e o céu se apresenta limpo, verifica-se um ligeiro aumento das temperaturas em direcção ao centro da cidade; em condições de instabilidade, com nebulosidade elevada, são as áreas ribeirinhas que se apresentam mais frescas, aumentando a temperatura com a maior distância ao rio e a altitude. A variação

espacial pode ser grande, enquanto Monsanto se apresenta quente e com sol, a zona oriental da cidade pode estar sob forte nevoeiro e registarem-se diferenças de 10°C entre os dois locais.

Nas noites de Verão com nortada (cerca de 40%), as temperaturas mais altas observam-se nas áreas deprimidas do centro da cidade – Baixa, Restauradores, etc, enquanto os interflúvios se apresentam mais frescos pelo seu arrefecimento pelo vento. Quando a situação é calma em termos de ventos, são os interflúvios próximos da Baixa que se apresentam mais quentes, enquanto os vales arrefecem pela penetração da brisa estuarina (mais fresca e húmida) e que aí persiste. Em noites sob a influência de massas de ar muito quentes e secas oriundas do continente africano, a intensidade da ilha de calor pode atingir os 4 ou 5°C em alguns locais (Alcoforado, 1992). As noites de Inverno apresentam um comportamento térmico semelhante às noites de Verão, com um aumento da intensidade da ilha de calor em direcção ao centro da cidade.

3.2. O padrão dos ventos

3.2.1. Regime geral

O vento desempenha um papel fulcral no ambiente climático nas cidades, as suas características particulares em Lisboa foram referidas em diversos trabalhos por Alcoforado (1987, 1993, 2005), Alcoforado et al. (2006) e Andrade (1994, 2003a; Lopes, 1998, 2003). Se no Verão, principalmente em situações de ondas de calor, um vento moderado pode minimizar o desconforto térmico, evitando o aquecimento excessivo da cidade, no Inverno, um vento forte actua como factor negativo no conforto térmico da população.

Em Lisboa, o regime do vento à superfície é dominado por um fluxo forte vindo de norte (50% das observações), embora apresente alguma variabilidade anual (Lopes, 2003). Este rumo apresenta maior expressão durante os meses de Verão, enquanto o Inverno regista uma maior oscilação – rumos de nordeste, este e sudoeste (Alcoforado et al, 2008).

Ao longo dos meses da Primavera e Verão, dominam claramente os ventos dos quadrantes norte e noroeste (Alcoforado et al, 2006; Lopes, 2003), assistindo-se a um aumento progressivo da sua frequência. Nos meses de Junho, Julho e Agosto, verifica-se uma quase ausência de ventos de este e sudeste (Alcoforado et al, 2006) e que só se lentamente se vai modificando ao longo do ano. Segundo Alcoforado et al (2006), 70% das tardes de Verão apresentam registos de nortada, registando velocidades médias horárias superiores a 15km/h em 27% dos dias, e em 45% dos dias sopra continuamente durante todo

o dia. No Outono (Setembro a Novembro) assiste-se à progressiva rotação destes para os quadrantes este e sul (Lopes, 2003).

Durante o Verão, a origem destes ventos de norte e noroeste está associada ao forte gradiente de pressão à superfície que se forma entre o anticiclone dos Açores e uma depressão térmica localizada no interior da Península Ibérica (Alcoforado et al, 2006; Lopes, 2003).

No Inverno, os rumos norte e nordeste atingem cerca de 27%, enquanto o vento sopra de sudoeste e sul em aproximadamente 29% das ocasiões (Alcoforado et al, 2006). Segundo estes autores, a rosa dos ventos apresenta, neste período do ano, um eixo predominante com sentido sudoeste-nordeste, explicado pela ocorrência de perturbações de sudoeste e pela trajectória nordeste e este das massas de ar frias e secas.

É certo que o rumo e a velocidade do vento sofrem modificações na cidade, sobretudo devido ao atrito acrescido da superfície do solo (Oke, 1996; Lopes, 2002). Vários estudos (Lopes, 2002; 2003) demonstram que a velocidade da nortada diminuiu cerca de 2 a 3m/s com o crescimento dos bairros setentrionais da cidade. A continuação do crescimento urbanístico de Lisboa, a norte, poderá travar e mesmo impedir a progressão do vento dominante até ao centro e, com isso, afectar de forma séria as condições de ventilação e arrefecimento da cidade, conduzindo, em algumas áreas, a um aumento do desconforto térmico da população e degradação da qualidade do ar (Alcoforado et al, 2005).

3.2.2. Os ventos locais - as brisas

Devido às diferenças de temperatura que se estabelecem entre a atmosfera continental e o ar marítimo ou estuarino, estabelece-se um regime de ventos locais (as brisas). As brisas transportam ar fresco e húmido do oceano e/ou do estuário do Tejo e, por isso, têm um papel bastante importante no arrefecimento e arejamento da cidade, fundamentalmente das áreas mais próximas do rio (Alcoforado, 1987; Lopes, 2003). A frente ribeirinha é em média 3,5°C mais fresca que as outras áreas da cidade (Vasconcelos e Lopes, 2006), podendo essas diferenças ultrapassar, em certas situações, os 10°C (Alcoforado et al., 2007).

As brisas do Oceano e do estuário do Tejo ocorrem em 30% dos dias de Verão, fundamentalmente durante a tarde, quando as diferenças térmicas entre a cidade e o mar/estuário são maiores. Geralmente verifica-se a sua redução ao fim da tarde, período em que a nortada é mais frequente (Alcoforado, 1987, 1992; Andrade, 2003; Lopes, 2003). Enquanto ao início do dia a brisa poderá restringir-se apenas ao estuário do Tejo, à tarde, pelo aumento das temperaturas entre o continente e o mar, poderá chegar directamente do

oceano. É frequente verificar-se uma variação do rumo do vento ao princípio da tarde. Esta rotação da direcção, muito observada na zona oriental da cidade¹², faz-se progressivamente de este (ao início da tarde) para sudeste e sul. Em dias de nortada mais intensa, a brisa é normalmente enfraquecida ou mesmo anulada pela circulação geral (Alcoforado et al, 2006).

¹² Segundo Alcoforado (1987), poderá ser justificada ou pela canalização da brisa pelo Tejo, ao início da manhã, e sua divergência quando o estuário alarga, adquirindo então a direcção sudeste, ou pela formação de brisas locais pelo próprio estuário.

IV. METODOLOGIA

1. Os dados

Os dados meteorológicos da rede nacional utilizados neste trabalho - vento (direcção e velocidade), humidade e temperatura, são da estação de Gago Coutinho (figura 5), uma vez que a sua localização, mais periférica, assegura uma menor influência dos factores urbanos nas observações.

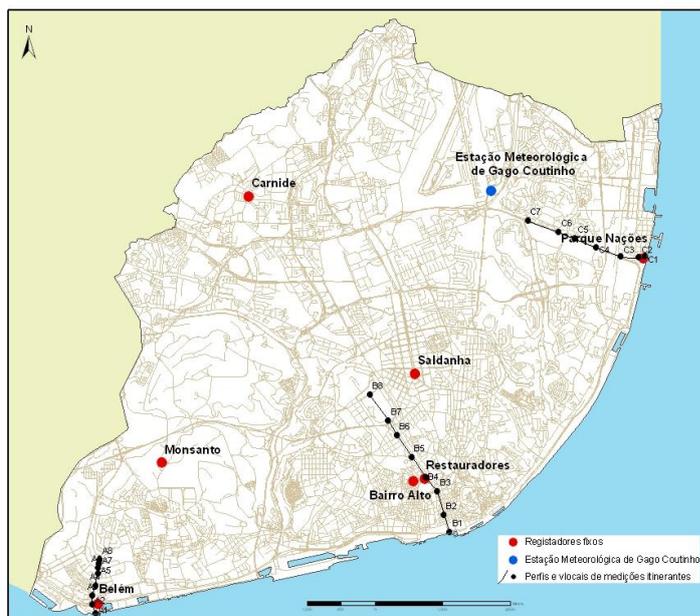


Figura 5 – Localização da estação meteorológica de Gago Coutinho, dos registadores automáticos e dos percursos de medições itinerantes

Estes dados foram complementados com os dados provenientes da rede de sete registadores automáticos, do Centro de Estudos Geográficos (CEG) do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa. Estes encontram-se distribuídos por diversos locais da cidade (localização descrita no anexo 2) (figura 5). Estes aparelhos (figura 6) estão instalados em postes de iluminação pública, a cerca de 3m de altura e em locais com elevado *sky view factor* (*SVF*)¹³, para evitar a influência de factores microclimáticos.

¹³ *SVF* – Factor de visão do céu. “Corresponde à razão entre o céu visível, a partir de um determinado ponto e o máximo possível, na ausência de obstáculos. Varia entre 1 (ausência total de obstáculos) e 0 (céu completamente oculo).” (Andrade e Vieira, 2005).



Figura 6 – Registador automático, do tipo *TinyTag Plus*, no Jardim da Torre de Belém.

Os registadores são do tipo *TinyTag Plus* (da *Geminy data loggers*), com uma precisão de 0,4°C a 0,5°C. Estão instalados em abrigos plásticos do tipo “multi-pratos” e colocados na extremidade de um braço com cerca de 1m de comprimento, para evitar o efeito térmico do material que constitui os postes. Destes registadores, foram extraídos e utilizados dados diários horários, referentes à T_a e humidade de 2004 a 2007, representativos de diferentes tipos de tempo – dias quentes, noites quentes, dias frios e noites frias (seleccionados pelo seu significado bioclimático) e nortada, de Verão (seleccionada pela sua elevada frequência – Alcoforado et al, 2006).

Efectuaram-se ainda algumas medições itinerantes (percursos e pontos de medição descritos no anexo 3), ao longo de três eixos (figura 5) perpendiculares em relação ao rio, para tentar perceber e estabelecer o limite de penetração das brisas na cidade. Para a recolha destes dados foi utilizado um *data logger* digital (*Testo 650*) e foi registada informação da temperatura do ar, velocidade do vento e humidade relativa. Foi ainda avaliada manualmente a direcção do vento em cada local de medição.

Para as restantes variáveis climáticas (humidade e temperatura radiativa) que entram no cálculo do *PET* não foram utilizados dados reais. Estes foram estimados/simulados ou utilizados valores-tipo. Os métodos e critérios utilizados encontram-se descritos mais à frente.

Foi ainda utilizada uma imagem de satélite – *Landsat 5*, de 22 de Julho de 2007, de onde foi extraída a informação sobre o albedo e o *NDVI*¹⁴.

Quanto à informação cartográfica de base utilizada – curvas de nível a 1/25000 e pontos cotados, edificado, áreas verdes e vias, foi disponibilizada pelo Departamento de Informação Geográfica e Cadastral (DIGC) da CML. Os dados geográficos e alfanuméricos fornecidos datam de 2008. Os ortofotomapas da cidade também facultados por aquele serviço,

¹⁴ *Normalized Difference Vegetation Index*.

correspondem a levantamentos aéreos de 2006. A informação cartográfica foi trabalhada e produzida no sistema de coordenadas *Hayford Gauss*, projecção *Transverse Mercator*, datum 73.

Alguma desta informação cartográfica contém erros associados, nomeadamente ao nível dos atributos dos elementos cartográficos. Na tentativa de minimizar, ou pelo menos, perceber a sua real expressão e o seu impacte nos mapas produzidos e nos resultados finais, procedeu-se à aferição e correcção da cartografia referente aos espaços verdes e vias arborizadas com base nas fotografias aéreas da cidade. Quanto à informação da altura do edificado, nomeadamente a cota do ponto mais alto dos edifícios, foi efectuada e validada a informação numa amostra considerada e quantificado o peso dos erros nela contidos, e ainda verificados os dados dos edifícios com maior expressão na cidade em termos de altura.

2. Modelo de análise

2.1. Esquema conceptual

A construção dos mapas bioclimáticos e a espacialização das variáveis, meteorológicas e de caracterização física e morfológica da cidade, foi efectuada com recurso a um sistema de informação geográfica – software *ArcGis*, 9.2.. Foram ainda utilizados os softwares *WA^SP* (versão 8.3 – Mortensen et al., 1993), para o cálculo e simulação do vento, a aplicação *Rayman*¹⁵ (Matzarakis et al., 2007) no cálculo da *Tmrt* e do *PET* e ainda o *Idrisi Andes* para tratamento e extracção de informação da imagem de satélite.

Este trabalho tem um desenvolvimento metodológico assente, fundamentalmente, no tratamento e espacialização automática de dados. O recurso à modelação automática, permite uma representação contínua no espaço das variáveis e a extrapolação para áreas sem registo de dados.

Sabendo que as características físicas do território influenciam marcadamente o padrão de distribuição espacial das variáveis climáticas, estas foram modeladas baseando-se fortemente naquela informação. Como tal, a qualidade da informação cartográfica de base assume reforçada importância. A sua correcção e boa representatividade são determinantes para a qualidade e validade dos resultados obtidos. Foi, assim, imprescindível construir e elaborar diversos mapas (fontes secundárias) que integrassem o modelo. A figura 7 traduz, de forma esquemática, o modelo de análise adoptado no desenvolvimento do presente trabalho.

¹⁵ Software, desenvolvido pelo Instituto de Meteorologia da Universidade de Freiburg, concebido para a modelação de parâmetros climáticos e bioclimáticos (Matzarakis et al., 1999).

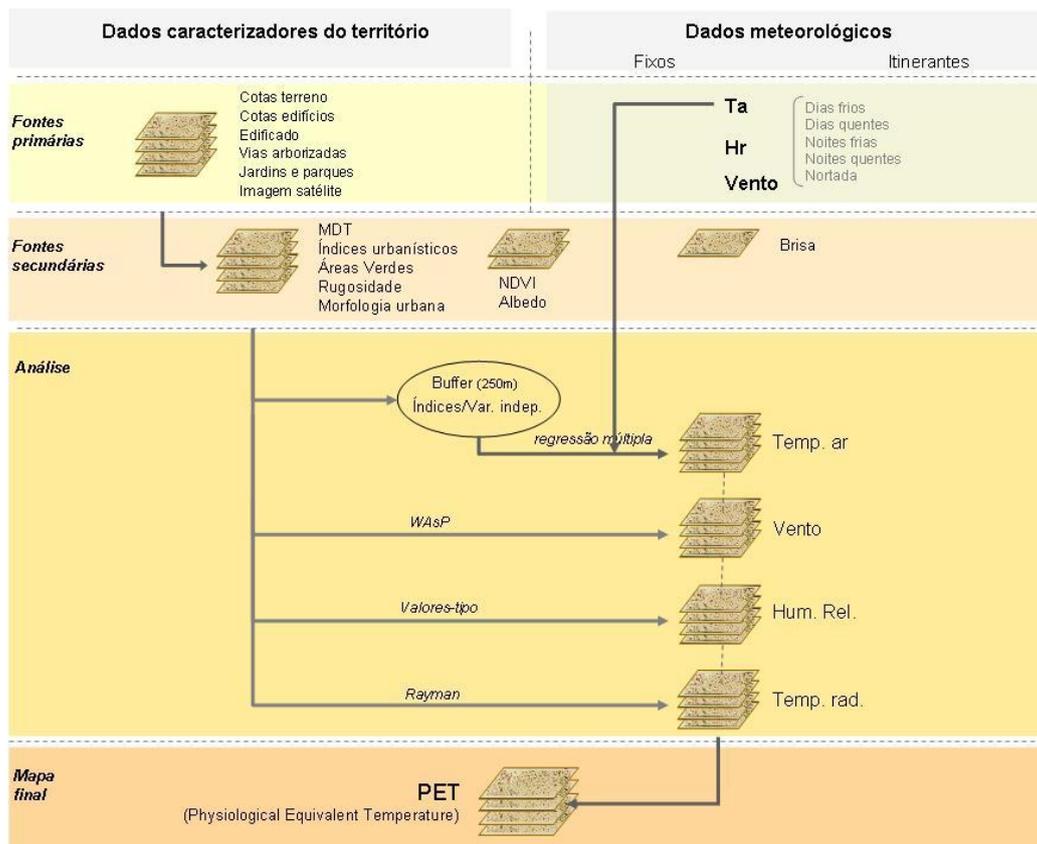


Figura 7 – Esquema conceptual para espacialização e construção de mapas da *PET*

Após a elaboração dos mapas de cada uma das variáveis climáticas que a *PET* incorpora - temperatura do ar, humidade atmosférica, velocidade do vento e temperatura radiativa média, estes foram integrados no modelo *Rayman* para a produção dos mapas finais da *PET*. O cálculo da *PET* foi efectuado, assim como todos os mapas produzidos, segundo uma grelha de 100x100m que abrange toda a cidade, para cada um dos tipos de tempo considerados.

Uma vez que a informação cartográfica em formato *raster* oferece uma série de potencialidades em termos de análises espaciais, cálculos matemáticos e estatísticos entre os dados cartográficos - extração de dados, generalização, reclassificações, entre outros, ela foi preferencialmente utilizada, neste formato, no modelo de análise espacial. Apenas as fontes primárias de dados geográficos e a grelha final contendo a informação das variáveis climáticas a serem incorporadas no modelo de cálculo do *PET*, foi trabalhada em formato vectorial.

Seguidamente, é descrita de forma mais exhaustiva os procedimentos efectuados para a elaboração de cada um dos mapas utilizados.

2.2. Parâmetros morfológicos – mapas de base

2.2.1. Modelo digital de elevação (MDE)¹⁶

A altimetria e a fisiografia do relevo são dois aspectos essenciais na explicação do padrão espacial das variáveis climáticas. Se a morfologia é um parâmetro mais difícil de quantificar, já a altitude é directamente utilizável e por isso foi uma das variáveis independentes consideradas para o modelo explicativo da variação da temperatura.

Com base na informação cartográfica das curvas de nível, com equidistância de 25m, e dos pontos cotados foi construído um modelo *TIN* (*Triangulated Irregular Network*¹⁷) que posteriormente foi convertido para *raster*, com uma resolução de 100m (figura 3).

2.2.2. Áreas edificadas

A intersecção espacial dos *layers* (vectoriais) da área de implantação dos edifícios (figura 8) com o da informação pontual da altitude, referente ao ponto mais alto dos edifícios, permitiu adicionar esta informação ao *layer* base do edificado. A altura dos edifícios foi depois obtida, subtraindo a cota máxima dos edifícios e a cota do terreno (considerando uma altitude média num *buffer* de 25m em torno do edifício).

Para colmatar a ausência de dados em alguns edifícios, foi feita uma estimativa da altura com base na contagem do número de pisos¹⁸. Esta contagem, assim como a validação da qualidade da informação disponível, foi efectuada com recurso à ferramenta ‘*bird’s eye*’ da aplicação web *Bing Maps*. Para a avaliação da qualidade dos dados do edificado, foram utilizados cerca de 100 pontos (edifícios) de aferição aleatórios. Destes, 89 apresentavam valor de altura de edifício muito aproximada ao cálculo efectuado com base no número de pisos (diferença inferior a 2m), o que representa uma estimativa de erro de cerca de 11%.

Por fim, agregaram-se os polígonos dos edifícios em quarteirões, recalculando-se automaticamente a respectiva área de implantação e a altura média por quarteirão. Considerou-se que o nível do quarteirão seria o adequado para a modelação espacial ao nível da cidade, minimizando e diluindo também os erros associados aos atributos dos edifícios.

¹⁶ Na bibliografia é possível encontrar frequentemente a designação de modelo digital de terreno (MDT), com aplicação também ao relevo.

¹⁷ Estrutura de dados utilizada frequentemente para a representação de valores altitudinais (valores de elevação) de uma superfície. Utiliza o método de triangulação para a construção do modelo digital de elevação.

¹⁸ Considerou-se para cada piso, uma altura média de 3m (atendendo às alturas definidas para os diferentes pisos, no Regulamento Geral de Edificações Urbanas). O número de pisos foi determinado tendo em conta os andares visíveis na fachada principal. As antenas, clarabóias, estatuárias, e outros elementos presentes no topo do edifício não foram considerados para o cálculo.

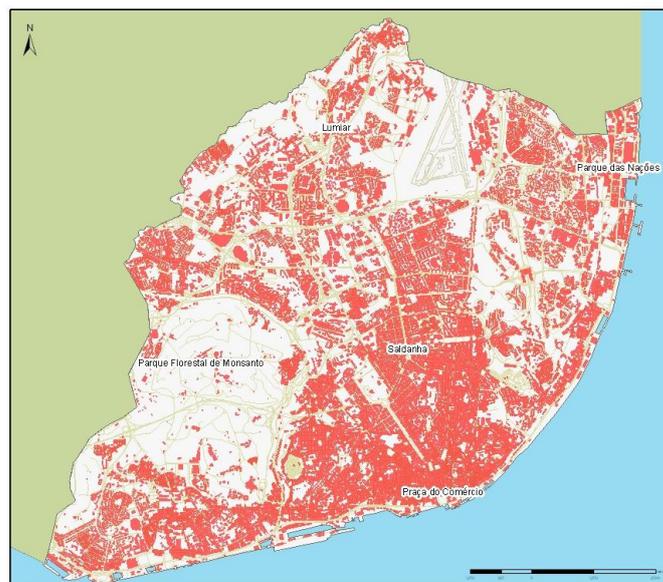


Figura 8 - Área Edificada (quarteirões) de Lisboa (Fonte: CML/DIGC, 2008)

Para a expressão numérica de alguns parâmetros morfológicos da cidade considerados importantes para a modelação espacial da temperatura, calcularam-se e cartografaram-se os seguintes índices:

Descritivo	
Área Verde(m ²) (AV)	Total de área verde
Índice de Área Verde (%)	Percentagem de área verde, numa determinada unidade territorial em análise
Área Impermeabilizada (m ²) (IMP)	Diferença entre a área total da unidade territorial em análise e a área verde total dessa unidade
Índice de Impermeabilização	Razão entre a área impermeabilizada da unidade territorial em análise e a área total dessa unidade
Área de Implantação (m) (AI)	Total da área ocupada pelo edificado
Índice da Área de Implantação (%)	Razão entre o total das áreas de implantação do edificado da unidade territorial em análise e a área total dessa unidade
Área Construída (m ²) (AC)	Produto entre o número médio de pisos por quarteirão e a sua área total de implantação
Índice de Área Construída	Razão entre o total da área de construção da unidade territorial em análise e a área total dessa unidade
Volumetria (m ³) (VOL)	Produto entre a altura média do quarteirão e a sua área total de implantação
Coeficiente Volumétrico (m ³ /m ²)	Razão entre a volumetria total da unidade territorial em análise e a área total dessa unidade
Altura Média do Quarteirão (m)	
Altura Máxima do Quarteirão (m)	

A análise das áreas impermeabilizadas por asfalto (rede viária) não foi individualizada por se considerar que só seriam relevantes numa abordagem a uma escala de bairro ou superior (microescala).

2.2.3. Áreas verdes

Neste trabalho, foi considerada como área verde da cidade, toda a estrutura verde de utilização pública da cidade, incluindo os arruamentos arborizados, partindo do pressuposto que as copas das árvores constituem também uma cobertura vegetal que não deve ser negligenciável no comportamento climático da cidade e na sua qualidade ambiental.

Para o mapa da área verde da cidade (figura 9), foram utilizados os *layers* base (de 2008), cedidos pelo Departamento de Ambiente e Espaços Verdes da CML, da estrutura ecológica da cidade e que englobam, segundo o Relatório da Proposta Preliminar da Estrutura Ecológica Municipal (CML, 2009):

- espaços exteriores verdes de recreio e lazer, entendidos como espaços não edificados, permeáveis e plantados, que podem ter os usos de recreio, produção e lazer;
- espaços exteriores verdes de conservação, que são áreas *non aedificandi* e visam a salvaguarda dos valores naturais;
- espaços exteriores verdes de enquadramento a áreas edificadas, que compreendem os espaços verdes de uso público e os logradouros privados;
- espaços exteriores verdes de enquadramento a infraestruturas viárias e ferroviárias, que são áreas de protecção a infraestruturas viárias e ferroviárias; e,
- eixos arborizados, que são eixos pedonais e viários de uso público, marcados por sistemas arbóreos lineares.



Figura 9 – Áreas Verdes de Lisboa

No entanto, por se detectarem algumas desactualizações, nomeadamente nas vias arborizadas, procedeu-se à sua correcção com recurso às fotografias aéreas da cidade, de Agosto de 2006. Foram validadas todas as vias constantes no *layer* de base fornecido, corrigidas e digitalizados novos arruamentos com presença de alinhamentos de árvores. Foi identificado o tipo de alinhamento – no eixo central, lateral (esquerdo/direito) ou ambos, e posteriormente construído um *buffer* em função da estimativa da área média coberta – de 3m, quando apenas um dos lados da via é arborizada, e de 2m nas restantes situações (árvores no separador central ou nos dois passeios simultaneamente). Estes valores foram definidos considerando que a copa média das arvores de arruamento em Lisboa é geralmente média ou pequena (não cobrindo mais do que uma faixa de rodagem). Da área verde global foram posteriormente retirados os edifícios existentes no seu interior.

2.2.4. NDVI

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é um dos índices mais divulgados e utilizados como indicador da presença e da densidade do coberto vegetal. A vegetação, tal como todos os elementos da superfície terrestre, têm comportamentos distintos quanto à energia que absorvem, reflectem (figura 10) e que é captada e medida pelos sensores de detecção remota. A vegetação caracteriza-se por uma intensa absorção (para a fotosíntese) na região do vermelho (entre 0,4 e 0,7 μ m) e uma elevada reflexão em comprimentos de onda na região do infravermelho próximo (entre 0,7 e 1,1 μ m).

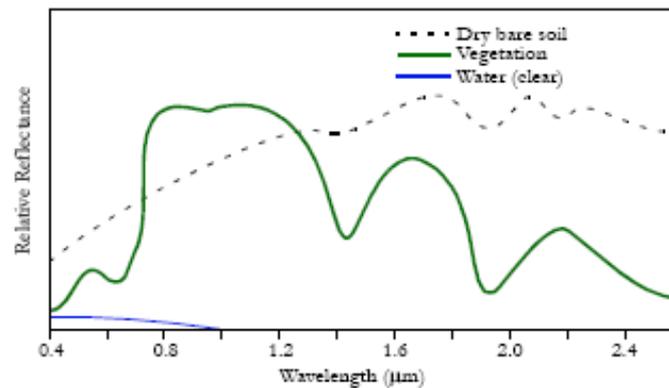


Figura 10 - Curvas típicas da percentagem de reflectância em função do comprimento de onda para a água, vegetação e solo (fonte: Manual do *Idrisi Andes*, adaptado de Lillesand and Kieffer, 1987).

As diferenças de reflectâncias apresentadas pelas plantas são função da densidade da folhagem, do tipo estrutura da folha, da sua dimensão, entre outros factores.

Assim, a fórmula de cálculo do *NDVI* combina as bandas do vermelho (Ver) e do infravermelho próximo (IVP) sendo expressa por:

$$NDVI = (IVP - Ver) / (IVP + Ver)$$

O índice *NDVI* varia entre -1 e 1, sendo que os valores mais próximos de zero indicam ausência de vegetação, os próximos de 1 a maior presença e densidade de vegetação verde.

Com base numa imagem *Landsat*, de 22 de Julho de 2007, foi calculado, com recurso ao software *IDRISI Andes*, o *NDVI* para Lisboa (figura 11).

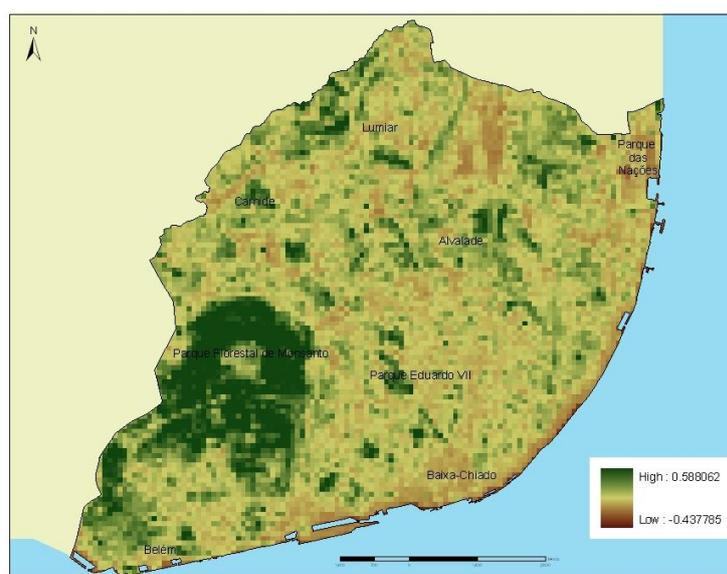


Figura 11 - Índice *NDVI* para Lisboa, em 22 Julho 2007

concelho – mapa da distância latitudinal. Esta medida pretende traduzir a variação posicional norte-sul e a posição de ‘abrigo’ em relação aos ventos dominantes de norte. Para esse efeito, foi utilizada a função ‘*Euclidian Distance*’, do *Spatial Analyst Tools*, do *ArcGis*.

2.2.7. A Rugosidade

O edificado constitui a maior percentagem de elementos com influência na rugosidade da superfície urbana. A quantificação das características de uso do solo no interior da cidade e da morfometria da área construída é essencial para o estudo e descrição da sua relação com o modelo aerodinâmico urbano.

A presença de árvores ou áreas ocupadas por vegetação verde é outro factor que aumenta o atrito e exerce influência no escoamento do ar.

Com base na cartografia da altura média do quarteirões, densidade de construção e mapa da estrutura verde, e com auxílio da fotografia aérea para aferições e correcções de pormenor, foram delimitadas as áreas de rugosidade – procurando representar áreas homogéneas em termos de atrito e resistência aerodinâmica, e construído o respectivo mapa (figura 12). A definição dos valores médios de rugosidade (Z_0)¹⁹ adoptados no presente trabalho, tiveram como referência os trabalhos de Grimmond e Oke (1999) e de A. Lopes (2003, 2006b, 2008) para Lisboa e os cálculos de rugosidade efectuados em áreas amostra de diferentes bairros da cidade, representativos dos vários padrões urbanos. A equação utilizada foi a de Lettau (1969), descrito pelos autores do programa WA^SP ,

$$Z_0 = 0.5 \times \frac{H \times S}{A_h}$$

e relaciona a área exposta ao vento dominante (H - altura média dos edifícios e S – secções/fachadas expostas), com a área não ocupada pelas construções (A_h), e considera uma porosidade fixa igual a zero uma vez que a maior parte dos elementos da cidade são sólidos.

Embora Mortensen et al. (1993) (citado por Lopes, 2003) tenham considerado que este algoritmo sobrestima os valores de rugosidade quando área deixada vaga (A_h) e a secção exposta (S) são idênticas, os resultados obtidos são bastante satisfatórios quando a área disponível (A_h) é superior à secção exposta (S).

¹⁹ Z_0 , “ corresponde à altura a partir do solo, onde a velocidade do vento é igual a zero, se o perfil do vento tiver uma variação logarítmica com a altitude” (Mortensen et al., 1993 citado por Lopes, 2003).

Para as áreas verdes, não foram efectuados cálculos e foram considerados dois valores de Z_0 distintos apenas em função da densidade e do tipo de ocupação vegetal, não se entrando em consideração com valores de porosidade.

Desta forma, chegaram-se aos seguintes índices de rugosidade:

Z_0 (m)	Descrição
0,01	Aeroporto
0,02	Áreas de vegetação pouco densa, frequentemente relvadas. Jardins urbanos, áreas expectantes não ocupadas ou de ocupação esparsa e pontual, muitas vezes vestígios de antigas quintas
0,03	Áreas de ocupação mista, verde com baixa densidade urbana. Áreas ribeirinhas
0,5	Áreas de baixa densidade de construção. Bairros de moradias e vivendas com áreas verdes privadas, edifícios com 3 pisos ou menos, com jardins públicos
0,7	Áreas de vegetação densa, essencialmente de porte arbóreo. Parque Florestal de Monsanto, Jardim do Campo Grande
0,8	Áreas de média densidade de construção.
1	Área de elevada densidade de construção. Edifícios altos,
1,2	Área de elevada densidade de construção. Edifícios com mais de 9 pisos

Valores baseados em Grimmond e Oke, 1999 e Lopes, 2003

A área exterior ao limite do concelho (concelhos limítrofes e rio) foi classificada e introduzida no WA^SP com valor de $Z_0 = 0,0$, para diferenciar da restante área.

2.2.8. Áreas Homogéneas

Para a identificação de áreas homogéneas (figura 13), em termos urbanísticos, de Lisboa, foram tidos em consideração critérios relacionados com o tipo de ocupação do solo – construído/impermeabilizado ou não construído (permeável), a estrutura e morfologia do edificado e a altura dos edifícios. Assim, consideraram-se as seguintes classes:

- Áreas não edificadas:
 - Verde denso
 - Verde pouco denso
 - Outros espaços não ocupados
- Áreas edificadas:
 - Baixa densidade – moradias unifamiliares
 - Outras áreas de baixa densidade
 - Média densidade

- Elevada densidade – bairros de morfologia ortogonal
- Elevada densidade – bairros de implantação pontual
- Elevada densidade – bairros com verde no interior dos quarteirões
- Elevada densidade – bairros medievais
- Outras áreas de elevada densidade

A exposição solar e o declive não foram considerados por a cidade se encontrar densamente construída e os dados retirados do MDE não serem representativos do actual modelo de superfície.

2.2.9. Albedo

O albedo é definido como a razão entre a radiação (directa ou difusa) reflectida e a radiação recebida (Alcoforado et al., 2005). É basicamente uma medida de reflectividade das superfícies e depende muito das propriedades e capacidades de absorção dos materiais presentes uma vez que estes têm valores de calor específico²⁰ diferentes. O mapa de albedo de Lisboa (figura 14), foi elaborado com base nas imagens do satélite *Landsat 5*, datadas de 22 de Julho de 2007 (com recurso ao *EnviMet 4.6.1*) e resultou da média do conjunto de bandas espectrais (excepto a de infravermelho térmico). Esta variável foi utilizada no modelo de cálculo da temperatura radiactiva.

2.3. Parâmetros Climáticos

2.3.1. Temperatura (Ta)

A série de dados de Ta utilizada, foi uma série horária, de 2004 e 2007, dos sete registadores fixos do CEG. Para os dias e noites frios de Inverno os dados correspondem a registos dos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Para as situações de Verão - dias quentes, noites quentes e situações de nortada, os registos abrangem os meses de Junho a Setembro.

O carácter pontual das observações existentes, quer sejam das estações meteorológicas da rede nacional quer seja dos registadores do CEG, coloca sempre problemas de representatividade e extrapolação espacial. É conhecido e mencionado em diversos estudos, que as características da cidade influenciam determinantemente a variação espacial da temperatura.

²⁰ “Quantidade de calor necessário para aumentar 1°C a temperatura da unidade de massa dessa substância” (Retallack, B. (1985) – Meteorologia, vol. II. IM, Lisboa).

Assim, com base neste pressuposto, foi utilizada a regressão linear múltipla para estabelecer as relações numéricas entre a temperatura do ar (variável dependente) e diversos parâmetros geográficos da cidade (variáveis independentes), e assim estimar e modelar a variação espacial da temperatura, para cada tipo de tempo considerado. Foi analisado um conjunto alargado de factores que se sabe influenciam a temperatura do ar na camada mais baixa da atmosfera urbana (*urban canopy layer* – Oke, 1987). A capacidade explicativa do modelo foi avaliada através do coeficiente de determinação (R^2), sendo selecionados os factores que apresentam uma correlação mais forte com a T_a .

Para garantir uma maior homogeneidade da série, os valores de T_a foram normalizados, calculando, para cada momento, as diferenças entre cada T_a registada e a média das observações do conjunto dos sete locais. O desvio espacial obtido é que constituiu a variável dependente.

Como parâmetros descritivos das características situacionais, morfológicas e urbanísticas de cada local de registo (variáveis independentes), e para um raio de 250m, foram utilizadas e calculadas as seguintes variáveis (atrás descritas): altimetria, distância à linha de costa, distância latitudinal relativa, *NDVI*, ocupação do solo e índices urbanísticos (altura dos edifícios, área de implantação, área de construção, coeficiente volumétrico, entre outros) No quadro 3 apresentam-se os parâmetros (variáveis independentes) que apresentaram melhor coeficiente de determinação, para cada um dos tipos de tempo e sua importância relativa (coeficiente de normalidade, β).

Variáveis explicativas		a	R^2	β
Dias frios	coeficiente volumétrico	1,304	0,540	0,33301
	altitude			0,01311
	distância ao rio			0,00034
	latitude			0,00030
	área impermeabilizada			0,000014
	área verde			0,000014
Noites frias	NDVI	0,624	0,847	2,93569
	coeficiente volumétrico			0,17380
	altitude			0,00719
	distância ao rio			0,00018
	latitude			0,00016
Dias quentes	coeficiente volumétrico	-13,626	0,637	-12,65999
	altitude			-0,53262
	distância ao rio			-0,01329
	latitude			-0,01185
	área verde			-0,00055
	área impermeabilizada			-0,00055
Noites quentes	NDVI	-0,297	0,534	-1,49270
	coeficiente volumétrico			-0,08987
	altura dos edifícios			-0,08731
	altitude			-0,00377
	distância ao rio			-0,00010
	latitude			-0,00009
Nortada	Índice de Área Verde	-3,003	0,768	-7,78655
	coeficiente volumétrico			-0,92951
	altitude			-0,03866
	distância ao rio			-0,00101
	latitude			-0,00089

Quadro 3. – Coeficientes de determinação e de normalidade

Os mapas de temperatura do ar foram construídos com base nas equações de regressão obtidas para cada tipo de tempo, extrapolando assim os dados para a restante área da cidade.

2.3.2. Vento

Para o modelo de simulação do campo de ventos na cidade foi utilizado o programa *WA^SP* (*Wind Atlas Analysis and Application Program*). Foram utilizados os dados horários de vento, da estação meteorológica de Gago Coutinho, para os dias selecionados e considerados na análise da temperatura do ar, verificando-se que cada tipo de tempo regista e apresenta um padrão de vento típico. Quando a série de vento utilizada, pela sua reduzida dimensão, não apresentava registos para todos os rumos, optou-se por adicionar os rumos em falta atribuindo-lhes um valor de velocidade do vento com pouca expressão. Embora as séries de vento utilizadas sejam de pequena dimensão, não deixam de ser representativas do comportamento do vento em cada uma das situações. Na tentativa de trabalhar com séries de dimensão mais expressiva e com maior significado, tentou-se a construção e simulação de séries de vento baseadas no rumo dominante em cada tipo de tempo. Este procedimento não revelou grandes vantagens ou diferenças em relação aos resultados obtidos com as séries reais de menor dimensão.

A simulação pelo *WA^SP* do padrão médio de vento, para cada um dos tipos de tempo, é efectuada com base na superfície topográfica (curvas de nível, equidistância de 25m) e no mapa de rugosidade (atrás descrito), para uma altura de 10m acima do solo (altura da estação meteorológica de referência). Foi posteriormente efectuada a sua correcção para a altura de 1,5 m acima do solo, recorrendo à equação potencial do perfil do vento (Karlson, 1986; Deacon, 1949 citado por Linacre, 1992)

$$V_z = v_s (z/z_s)^a$$

Sendo:

V_z = velocidade do vento à altura z (m/s)

v_s = velocidade do vento a 10m (m/s)

Z_s = 10m

a = expoente dependente da rugosidade, segundo a fórmula:

$$a = 0,24 + 0,096 \log(z_0) + 0,016 (\log(z_0))^2$$

Uma vez que as áreas mais ribeirinhas estão, particularmente no Verão e nos dias quentes, sob o efeito das brisas do estuário do Tejo e do mar, efectou-se uma simulação para vento de sudoeste (direcção frequente da brisa), construindo uma série de vento onde os

outros rumos apresentam valores pouco significativos e a estação de referência seria a do Lisboa/Geofísico (no centro da cidade, mais próximo do rio). A este mapa aplicou-se uma máscara do limite da penetração da brisa determinado através das observações itinerantes, já descritas.

Ao mapa do vento dos dias quentes, para toda esta área com influência da brisa, foram então aplicados os valores de velocidade obtidos na simulação para o rumo de sudoeste.

2.3.3. Humidade

Uma vez que os dados de humidade atmosférica existentes para as estações meteorológicas de Lisboa são, por um lado, escassos e de fraca fiabilidade, e por outro, não apresentam segundo diversos autores e corroborado por medições efectuadas, grande variabilidade (Andrade, 2003), optou-se por aplicar o mesmo valor de tensão de vapor de água (Pa) a toda a cidade. Uma vez que a variação da humidade atmosférica é função da temperatura, os valores atribuídos são diferentes para os vários tipos de tempo considerados. Apenas nos dias quentes se diferenciou a faixa ribeirinha sob o efeito de brisa da restante área da cidade. Assim, utilizaram-se os seguintes valores-tipo, que constituem valores médios das séries de dados:

- dias frios = 8,7 hPa
- noites frias = 6,8 hPa
- noites quentes = 14,8 hPa
- dias quentes, áreas sob o efeito da brisa = 18 hPa
- dias quentes, restante área = 14,8 hPa
- nortada = 15 hPa

2.3.4. Temperatura radiativa média (T_{mrt})

Face à grande complexidade do balanço radiativo e à inexistência de registos para as estações meteorológicas clássicas e registadores presentes na cidade, não foi possível utilizar dados reais de T_{mrt}. Foi, então, efectuada uma simulação e modelação para a cidade da T_{mrt}. Este parâmetro foi estimado para áreas-tipo seleccionadas na cidade e consideradas representativas dos diferentes padrões de morfologia urbana. Foi utilizado o software *Rayman*²¹, tendo por base a altura dos obstáculos presentes no local (edificado ou coberto arbóreo), o albedo das respectivas superfícies (valores retirados do mapa de albedo, através

²¹ Software, desenvolvido pelo Instituto de Meteorologia da Universidade de Freiburg, concebido para a modelação de parâmetros climáticos e bioclimáticos (Matzarakis et al., 1999).

referido) e a razão de Bowen²² (quadro 4), para a qual foram utilizados os valores típicos de razão de Bowen segundo Parlow, 1999.

Classes Morfologia urbana		Albedo	Razão de Bowen (dia) ²³
Áreas não edificadas	Verde denso	0,14	0,5
	Verde pouco denso	0,18	0,6
	Outras áreas não ocupadas	0,21	0,6
Áreas edificadas	Baixa densidade - moradias unifamiliares	0,21	0,8
	Outras áreas de densidade baixa	0,21	0,8
	Média densidade	0,22	1
	Elevada densidade - bairros de traçado ortogonal	0,21	1,5
	Elevada densidade - bairros de implantação pontual	0,20	1,5
	Elevada densidade - bairros com verde no interior dos quarteirões	0,22	1,5
	Elevada densidade - bairros de traçado medieval	0,21	1,5
	Outras áreas de densidade elevada	0,21	1,5

Quadro 4 – Classes de morfologia urbana, valores de albedo e razão de Bowen

As variáveis climáticas incorporadas no cálculo da T_{mrt} são a temperatura do ar (T_a média para cada tipo de tempo), a humidade relativa (adoptou-se um valor constante de 50%, dado que a interferência desta variável na T_{mrt} é muito reduzida), a velocidade do vento (foi considerada a velocidade média registada em cada tipo de tempo) e a porção de céu coberto (nebulosidade média para cada tipo de tempo).

Foi selecionado e modelado um local representativo de cada classe de morfologia urbana (anexo 4).

Para cada tipo de tempo e para cada um destes locais selecionados, foi calculada a T_{mrt} à sombra e ao sol. A T_{mrt} final resulta da média destes dois valores.

²² É a razão entre o fluxo de calor sensível e de calor latente e é frequentemente utilizado na estimativa da evapotranspiração e como indicador da maior ou menor presença de vegetação no solo.

²³ À noite foi aplicado o valor 1.

3. Tipos de Tempo

Para a abordagem das condições de conforto bioclimático da cidade são particularmente importantes os tipos de tempo representativos, das situações mais frequentes, por um lado; e por outro, das condições climáticas extremas que se podem manifestar na cidade e que afectam com maior severidade a ambiência térmica e o conforto humano. Foi, portanto, sob este pressuposto e partindo do conhecimento adquirido sobre o clima de Lisboa, que se optou por considerar como representativos das situações extremas, os tipos de tempo: dias quentes, quando T_a máxima diária é igual ou superior a 32°C (Nogueira e Paixão, 2005); noites quentes, quando T_a nocturna é igual ou superior a 22°C (as designadas noites tropicais); e dias frios, noites frias (de Inverno), quando a T_a mínima é igual ou inferior a 11°C e 7°C respectivamente (Marques, 2007); e a nortada²⁴, por ser bastante frequente em Lisboa, ocorrendo em 70% dos dias de Verão (Alcoforado et al, 2006).

4. Mapas de *Physiological Equivalent Temperature (PET)*

A modelação espacial do *PET* foi efectuada com o recurso ao modelo *Rayman*, utilizando as variáveis da temperatura do ar, tensão de vapor de água, velocidade do vento e temperatura radiativa média; neste modelo, os valores de isolamento térmico de vestuário e produção metabólica de calor são mantidos constantes (respectivamente 0,9 Clo e 90 W/m²). Os dados destas variáveis foram transpostos, dos respectivos mapas raster, para uma grelha de 100x100m e integrados no modelo de cálculo do *PET*, obtendo-se os valores para os mapas finais, para cada um dos tipos de tempo. O valor associado a cada célula corresponde a um valor médio calculado automaticamente.

²⁴ Vento de norte ou de noroeste que sopra na costa ocidental de Portugal Continental, atingindo o máximo de intensidade durante a tarde e sendo característico dos meses de verão. Resulta essencialmente da localização e configuração do Anticiclone dos Açores (a noroeste de Portugal) e da depressão de origem térmica sobre a Península Ibérica, estando associado ao diferencial da temperatura à superfície, entre o mar e a terra e ainda ao efeito de Coriolis (Alcoforado, 1993).

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

1. Os mapas de base

O uso do solo determina o tipo e a intensidade das trocas radiativas e energéticas entre a superfície e a atmosfera (Alcoforado, 1987, Alcoforado et al, 2005, Lopes, 2003, Lopes, 2006, Andrade, 2003); procedeu-se por isso, à elaboração de mapas de uso do solo e da morfologia urbana, da rugosidade aerodinâmica e do albedo médio das superfícies.

1.1. Ocupação do solo e morfologia urbana

Em termos de ocupação do solo Lisboa (figura 13) foi dividida em duas classes principais – áreas não edificadas e áreas edificadas, e dentro destas, foram criadas subclasses em função da geometria urbana e densidade de ocupação, conforme já descrito na metodologia.

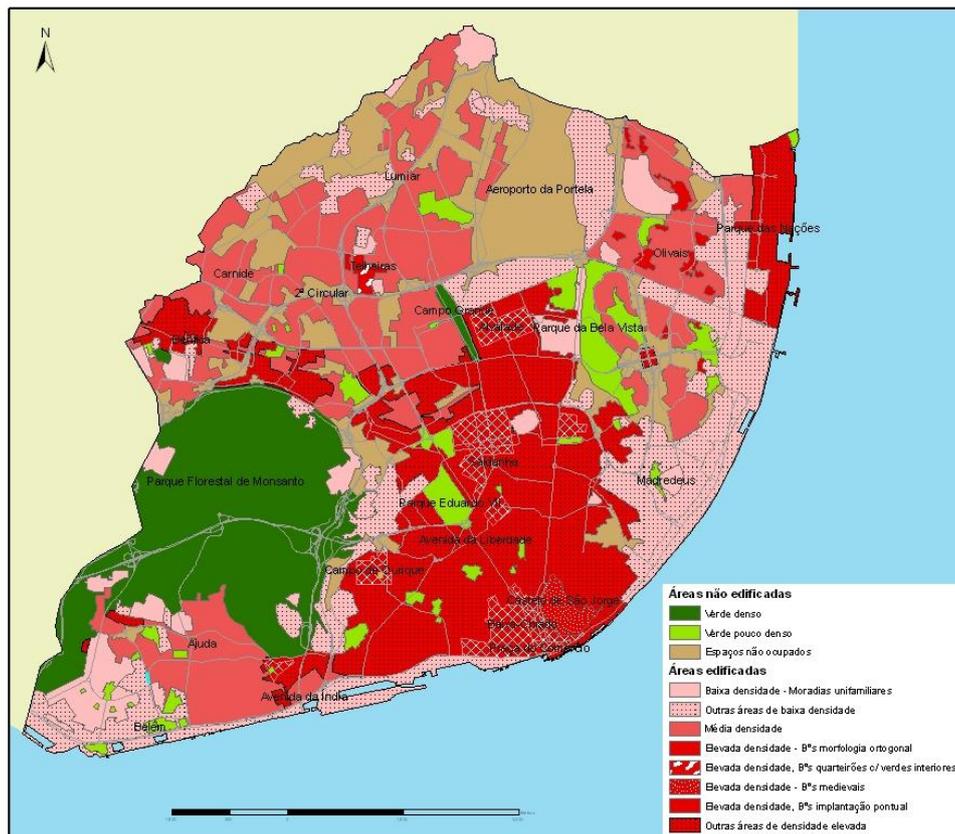


Figura 13 – Morfologias urbanas homogêneas

As áreas não edificadas representam cerca de 37% da área total do concelho e foram divididas em três subclasses: a dos *Verdes densos*, quase exclusivamente dominada pelo Parque Florestal de Monsanto; a dos *Verdes pouco densos*, que engloba a maioria dos jardins públicos e corresponde a espaços relvados, com vegetação arbustiva e árvores esparsas; e a

dos outros *Espaços não ocupados*, que é composta essencialmente por áreas a norte da cidade, restos de antigas quintas ainda não ocupadas pelas novas urbanizações. O aeroporto foi incluído nesta subclasse por apresentar vastas áreas, marginais à pista, não impermeabilizadas. Os espaços edificados (63% da área da cidade), caracterizam-se por alguma heterogeneidade e complexidade de estrutura e forma. É na área central da cidade que se observa a maior densidade de construção, prolongando-se esta ampla mancha até ao Campo Grande e Alvalade, a norte, Campo de Ourique a ocidente e Olaias a oriente. Outros três locais de forte densidade de edificação, correspondendo a áreas de crescimento recente, são o Parque das Nações, Benfica e Telheiras. A classe de média densidade, engloba áreas que têm sofrido grande pressão urbanística nas últimas décadas (Lumiar, Carnide, Ameixoeira e Vale de Chelas), assistindo-se a uma acelerada densificação, reduzindo substancialmente as áreas livres (não edificadas) até aí existentes. As áreas de baixa densidade, correspondem a bairros de moradias unifamiliares, dispersos por toda a cidade mas com uma mancha significativa a ocidente (Restelo/Belém) e/ou áreas de ocupação mista (habitação, armazéns e equipamentos), localizadas sobretudo no sector oriental da cidade e faixa ribeirinha.

1.2. O albedo – influência no balanço térmico e radiativo

Da radiação incidente, uma parte é reflectida e outra será absorvida. O albedo é essencialmente uma medida de reflectividade das superfícies, condicionada pelas características de admitância térmica dos materiais. O albedo urbano é geralmente fraco, devido à geometria das ruas e edifícios e ao facto de o asfalto e os materiais de construção terem uma elevada capacidade de absorção de radiação. (Alcoforado et al, 2005; Lopes, 2003). O albedo condiciona consequentemente o balanço térmico e radiativo e os ritmos e padrões térmicos urbanos (Alcoforado et al, 2005, Lopes, 2003, 2006).

Segundo Oke (1987), o valor típico do albedo nas cidades ronda os 0,15. O albedo médio obtido para Lisboa, no dia 22 Julho de 2007 (figura 14), foi de 0,18, embora apresente uma grande dispersão de valores, oscilando estes entre 0,69, de valor máximo (ocorrem fundamentalmente a norte da cidade), e 0,04 para o valor mínimo (na faixa ribeirinha, correspondendo possivelmente às extensas áreas asfaltadas do Porto de Lisboa).

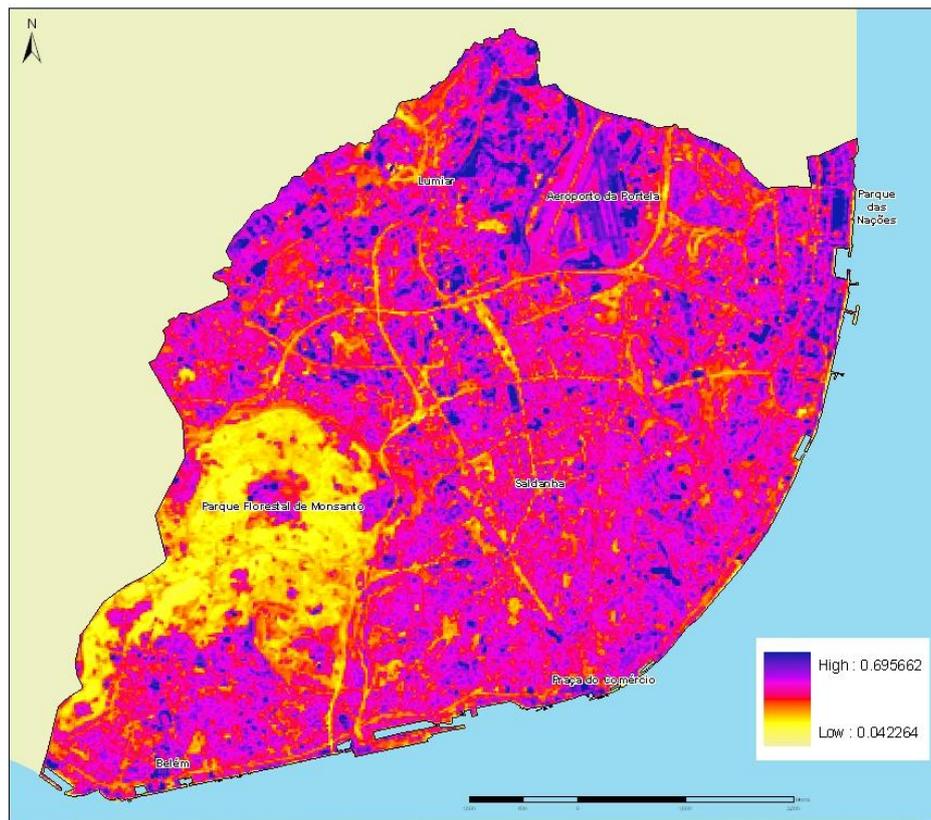


Figura 14 – Albedo de Lisboa, 22 Julho de 2007

A coexistência de diferentes materiais e superfícies num mesmo local, e a grande heterogeneidade de valores, remete-nos para que a análise espacial do albedo se faça, preferencialmente numa primeira análise, considerando os valores médios de cada classe de ocupação do solo e de morfologia urbana (quadro 4). Assim, são as áreas verdes que registam os valores médios mais baixos – 0,14, para o *Verde denso* e 0,18 para o *Verde pouco denso*. O valor médio de albedo para as áreas edificadas oscila entre os 0,20 e os 0,22, sendo mais elevado que o das áreas verdes, provavelmente devido ao predomínio das cores claras nas fachadas dos edifícios. Também os terrenos não ocupados apresentam valores relativamente altos (0,21 de média), podendo ser explicado, segundo Lopes (2003), pela reduzida rugosidade destes espaços.

Uma análise mais fina põe no entanto em evidência, diferenças de reflectividade entre materiais. Note-se, por exemplo, que:

- as principais vias de comunicação (por exemplo, a 2ª Circular) individualizam-se bem das superfícies adjacentes, pelo seu fraco albedo (alcatrão tem uma elevada admitância térmica);

- nos pequenos jardins da cidade (exemplo do Parque Eduardo VII e Jardim do Campo Grande), é possível distinguir as áreas ajardinadas dos pavimentos e terrenos não ocupados; e,

- no topo de Monsanto, a clareira central destaca-se do resto do parque pelos seus valores mais elevados de albedo (ocupação é feita por vegetação rasteira e alguns edifícios).

1.3. A rugosidade - influência da urbanização no escoamento do ar

No espaço urbano, o edificado é o principal responsável pelas alterações do comportamento aerodinâmico da atmosfera. Embora não provoque grandes alterações na frequência dos fluxos de vento, é no entanto responsável pelo aumento da rugosidade e, consequentemente, de alterações nos rumos e numa redução significativa da velocidade média do vento (V_v) junto ao solo (Lopes, 2003). Podem, no entanto, ocorrer acelerações locais devido ao efeito de canalização provocado por algumas ruas.

Os valores mais altos de Z_0 ($Z_0 = 1,2$) concentram-se na área central da cidade (figura 15) – Avenidas Novas e ao longo da Avenida da República, e no Parque das Nações, no sector oriental, onde a renovação urbana trouxe um aumento significativo das volumetrias. É de salientar que, comparando com o mapa de rugosidades de Lisboa nos anos 80 (figura 16) (Lopes, 2003), elaborado no âmbito de um estudo sobre as modificações do campo de vento induzidas pelo crescimento urbano, verifica-se que estas áreas registaram um acréscimo significativo de construções.

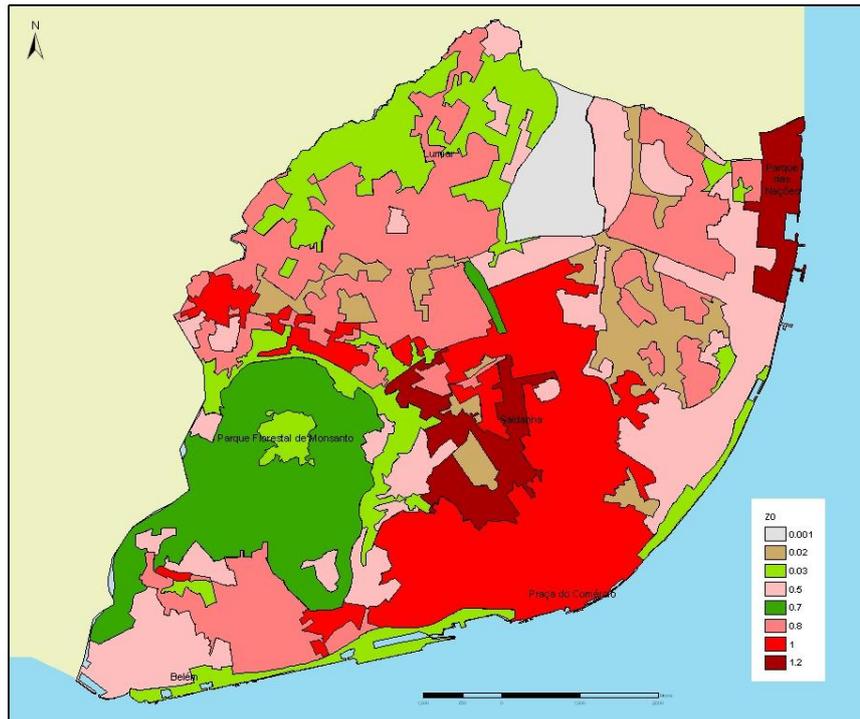


Figura 15 – Rugosidade aerodinâmica (Z_0) em Lisboa, 2008

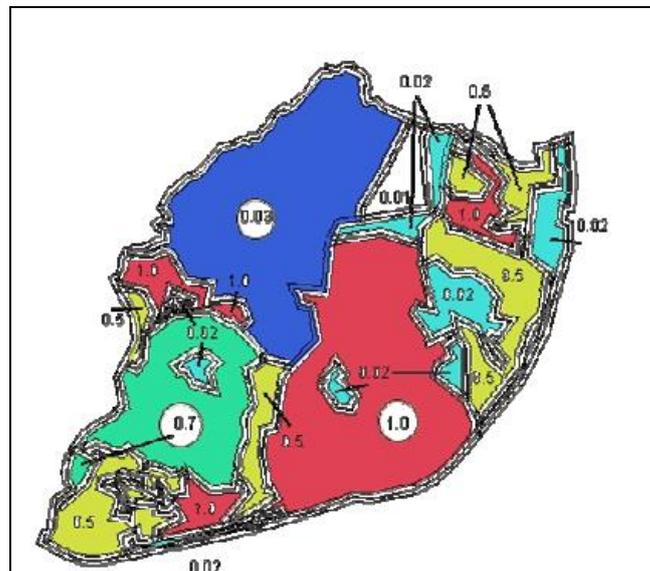


Figura 16 – Rugosidade aerodinâmica (Z_0) em Lisboa, nos anos 80 (Lopes, 2003)

O índice agora apresentado, decorre de estimativas realizadas em áreas amostra que determinaram a criação de uma nova classe. Mas outras áreas de Lisboa houve que registaram um aumento da rugosidade: áreas do norte e sector oriental da cidade que ainda mantinham algumas características rurais e que vêm sendo ocupadas por novas urbanizações (exemplo, Alta de Lisboa no Lumiar e Alto dos Moinhos em Benfica), onde o $Z_0=0,03$, nos anos 80, passou a 0,8, actualmente.

Globalmente, pode considerar-se ter havido um aumento da rugosidade da cidade. Com isto, como referiu Lopes (2003), é esperado uma diminuição da V_v em Lisboa, nomeadamente no sector norte, especialmente sendo expectável a continuação do crescimento urbanístico nos anos futuros.

2. A modelação do *PET*

2.1. Os dias frios

Nos dias frios os valores de *PET* tendem a ser cerca de 4°C abaixo das temperaturas do ar (figuras 17a e 17d) mas apresentam uma amplitude semelhante à da T_a (10°C).

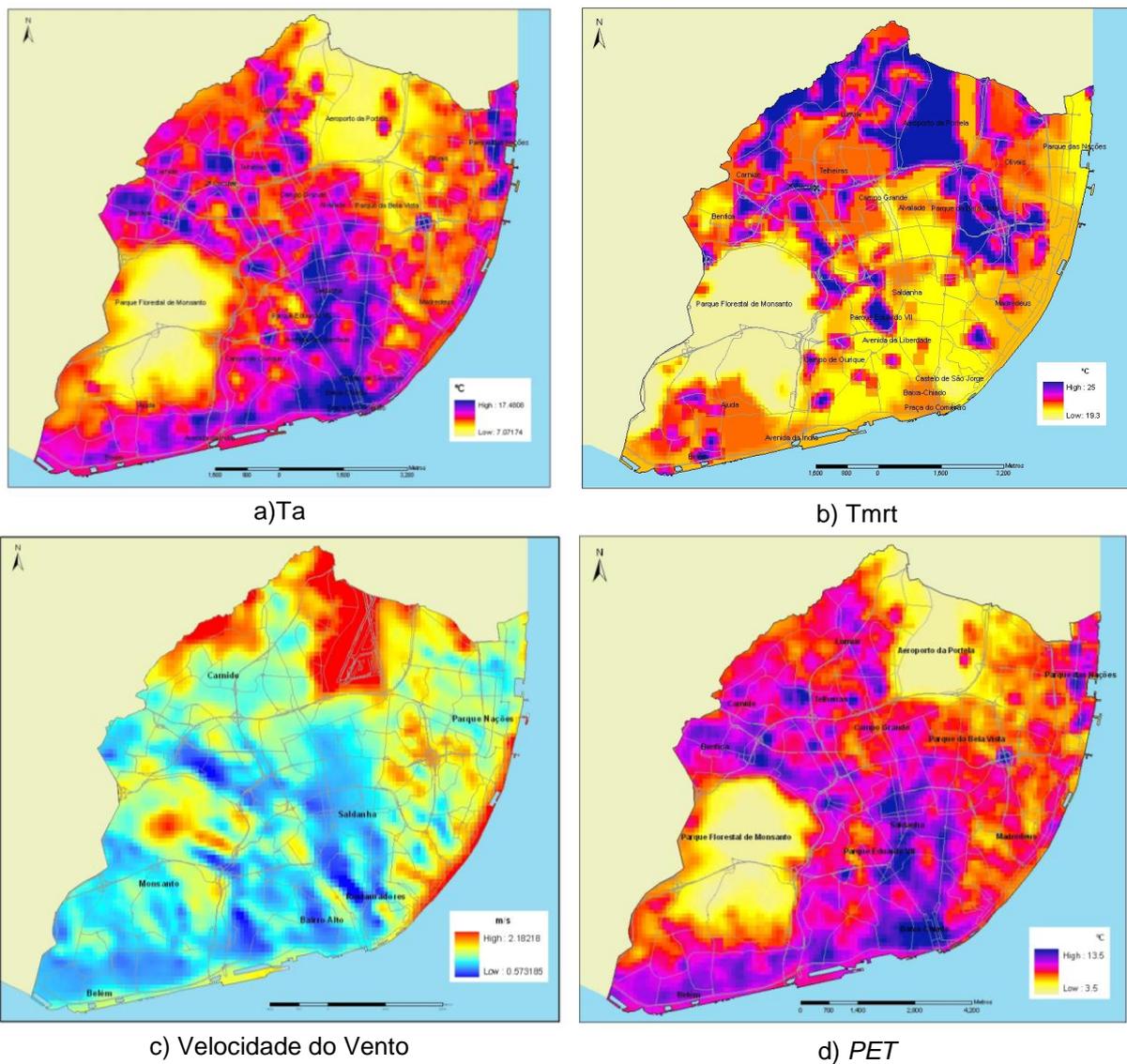


Figura 17 – Dias frios – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e PET

Monsanto, a ocidente e o aeroporto (e terrenos próximos desocupados ou com baixa densidade), a norte, à semelhança com o que se passa com a T_a , são os locais com os valores mais baixos de PET (cerca de $3,5^{\circ}\text{C}$). Monsanto apresenta também valores de T_{mrt} bastante baixos (figura 17b). A sua densa cobertura vegetal, contribui para um aumento da evapotranspiração e, conseqüentemente, uma maior libertação de energia, provocando o arrefecimento destas áreas. O aeroporto e áreas próximas, correspondem a espaços abertos desocupados (ou com baixa densidade de construção, e portanto menor Z_0) que estão sob a maior influência dos ventos dominantes (nordeste e norte – anexo 7.1.), os quais contribuem para o acentuado arrefecimento destas áreas.

As áreas centrais da cidade, alguns quarteirões em Benfica, no Parque das Nações e na faixa ribeirinha ocidental, são os locais onde a PET é mais elevada (máxima de $13,54^{\circ}\text{C}$). Nas áreas de maior densidade de construção (maior coeficiente volumétrico – anexo 5), o armazenamento de energia pelos edifícios, a retenção da radiação nos *canyons*²⁵ urbanos, por múltiplas reflexões, a diminuição da velocidade de escoamento do ar (visível na estimativa de velocidade de vento efectuada para este tipo de tempo - figura 7c) e a posição deprimida - casos dos eixos Estrada de Benfica, Av. Almirante Reis e Avenida da Liberdade-Avenida Fontes Pereira de Melo-Avenida da República, justificam um menor desconforto nestas áreas durante os dias mais frios. No sector ocidental e ribeirinho da cidade os valores elevados de PET podem ser justificados pela situação de abrigo em relação aos ventos frios de nordeste.

2.2. As noites frias

Nas noites frias, os níveis de desconforto são bastante acentuados em toda a cidade, registando-se valores de PET sempre inferiores a 0°C (mínima de $-3,7^{\circ}\text{C}$) (figura 18c). Estes valores são muito inferiores às da T_a (máxima = $7,2^{\circ}\text{C}$ e mínima = $4,7^{\circ}\text{C}$) (figura 18a). O desconforto agrava-se com o aumento da distância ao rio. Tal como nos dias frios, também aqui há uma reprodução da repartição espacial da T_a .

É na faixa ribeirinha, sobretudo ocidental, que se registam os valores mais elevados de PET (menor desconforto), justificada pela sua posição de maior abrigo em relação aos ventos dominantes de nordeste (a exemplo do que acontece nos dias frios).

²⁵ “tipo de geometria urbana composta por uma ou mais ruas, mais ou menos rectilíneas, ladeadas por edifícios geralmente altos” (Lopes, 2006a).

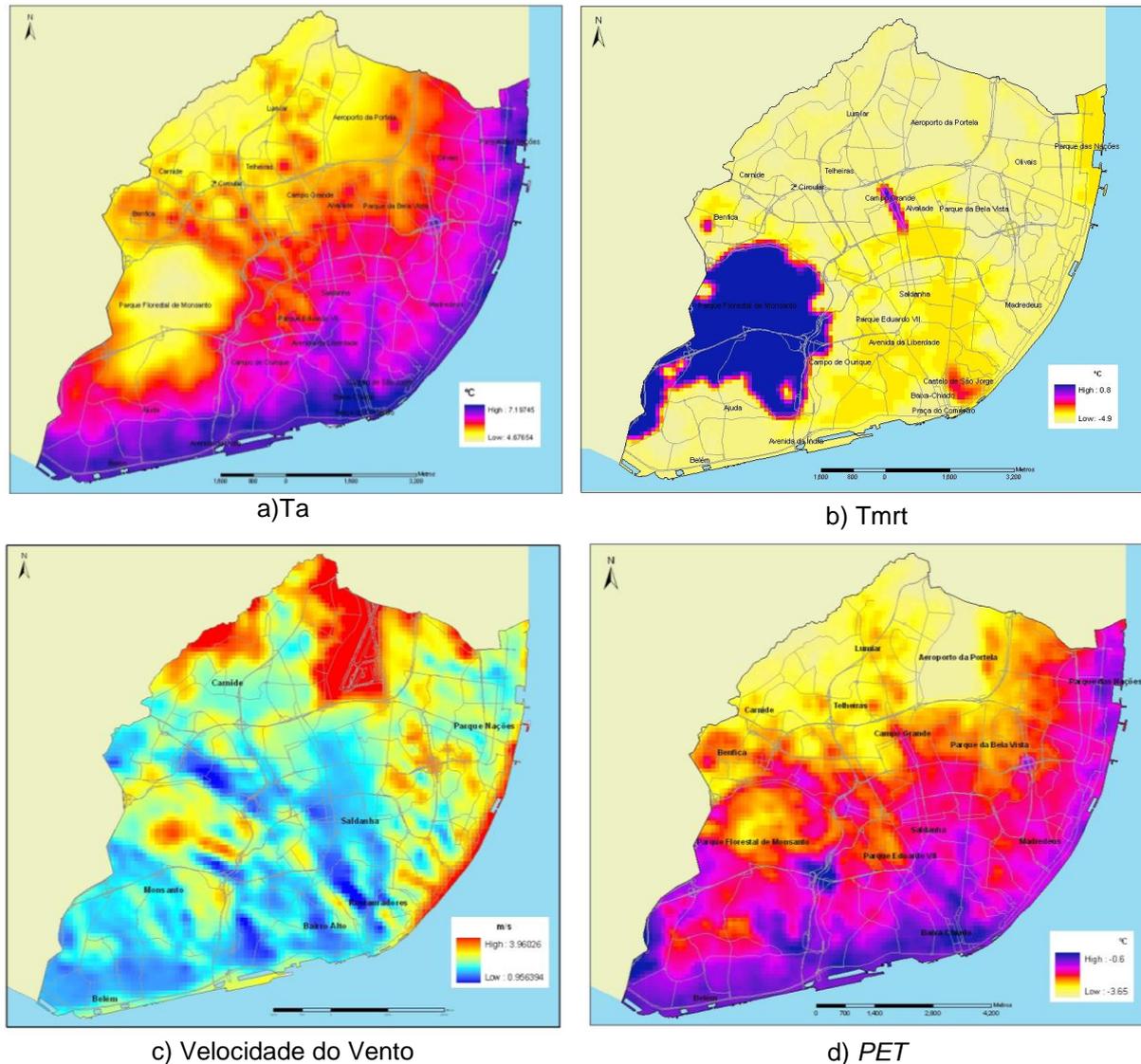


Figura 18 – Noites frias – modelação espacial da Ta, Tmrt, Vv e PET

As classes menos frias, que ocorrem na área central (Baixa), prolongam-se para norte ao longo dos dois principais eixos da cidade (Avenida da Liberdade e Avenida Almirante Reis). Também o Parque das Nações (a oriente) apresenta-se numa situação de menor desconforto devido à sua elevada densidade de construção.

Monsanto e o norte da cidade são as áreas da cidade que apresentam os valores de PET mais baixos. A dominância de espaços abertos e de baixa densidade de ocupação, permitem uma maior velocidade de escoamento de ar (figura 18c) e com isso um maior arrefecimento.

O padrão espacial de Tmrt obtido para as noites frias apresenta algumas incoerências em relação aos resultados apresentados nos estudos consultados. Monsanto e o Jardim do Campo Grande destacam-se aqui pela Tmrt mais elevada quando por efeito da elevada evapotranspiração se verifica geralmente um forte arrefecimento e menores Tmrt. Este

resultado poderá ser consequência de alguma instabilidade no funcionamento do *Rayman*, utilizado no cálculo da T_{mrt} .

2.3. Os dias quentes

É em situações de dias quentes que a *PET* regista a maior amplitude de valores - cerca de 20°C (figura 19d). Em termos de distribuição espacial, observa-se uma quase divisão da cidade em duas áreas distintas (figura 19d): uma mais fresca, a ocidente (Monsanto e toda a faixa ribeirinha a sul prolongando-se para norte até ao centro da cidade), com valores de *PET* pouco acima dos 20°C; e outra englobando a restante área da cidade, com níveis de desconforto bastante acentuado, atingindo em alguns locais valores de *PET* superiores a 40°C (máximo = 42°C). Estas situações mais extremas ocorrem nos bairros contíguos ao Parque das Nações, na Baixa e em alguns troços da Avenida Almirante Reis e Avenida da República.

Este padrão espacial do *PET* é semelhante ao da T_a , com as temperaturas do ar mais elevadas a concentrarem-se no sector oriental da cidade e variando segundo um eixo de orientação nordeste-sudoeste, aumentando progressivamente neste sentido.

Nos dias quentes de Verão, a velocidade do vento é em média mais elevada (figura 19c) em toda a cidade. As maiores velocidades na faixa ribeirinha ocidental traduzem a presença da brisa oceânica, com direcção de sul/sudoeste, o que contribui decisivamente para valores mais baixos de T_a e um maior nível de conforto. No sector norte da cidade, os locais com menor rugosidade (exemplo, o aeroporto) registam também valores elevados embora não se traduzam num maior conforto térmico. A prolongada exposição destas áreas à radiação solar (particularmente elevada nesta altura do ano) provoca um grande aumento da T_{mrt} e T_a , reflectindo-se por consequência nos elevados valores de *PET*. Em toda a cidade os valores de T_{mrt} são extremamente elevados – superiores a 50°C e perto dos 60°C nos locais mais abertos e menos ocupados.

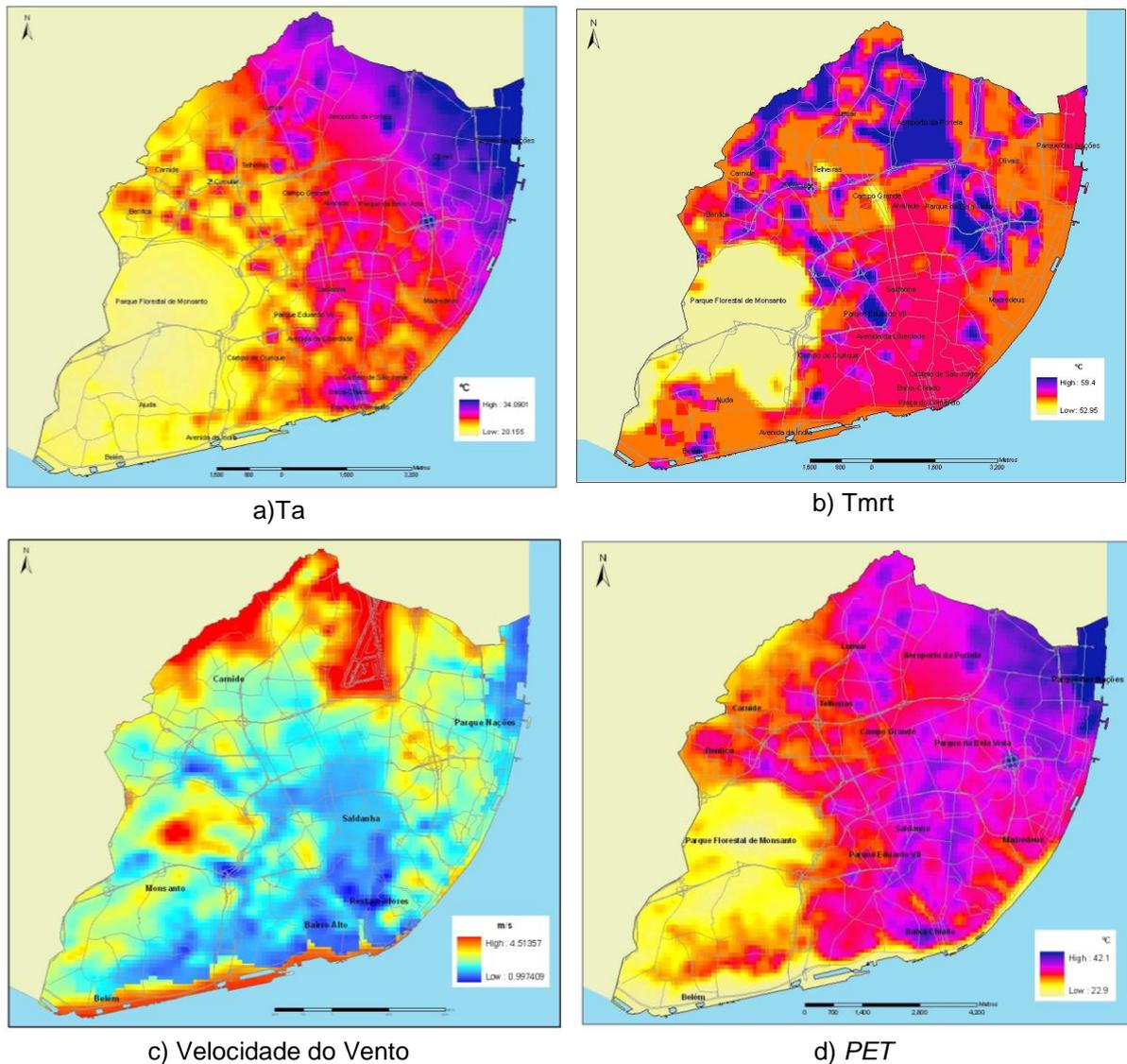


Figura 19 – Dias quentes – modelação espacial da Ta, Tmrt, Vv e PET

Também os locais com maior densidade de construção (exemplo, Parque das Nações e centro da cidade), como consequência do fraco arejamento (baixa velocidade de vento) e menor SVF (maior retenção de calor) apresentam um elevado desconforto, com valores de PET bastantes elevados.

Os maiores níveis de conforto obtidos em Monsanto, possibilitam confirmar a importância dos espaços verdes para a amenização das elevadas temperaturas.

2.4. As noites quentes

O padrão espacial de T_a e PET , nas noites quentes, apresenta-se mais tentacular e fragmentado (figuras 20a e 20d). A sua amplitude no interior da cidade é relativamente pequena, variando o PET entre os 13 e os 18°C e ficando abaixo da T_a .

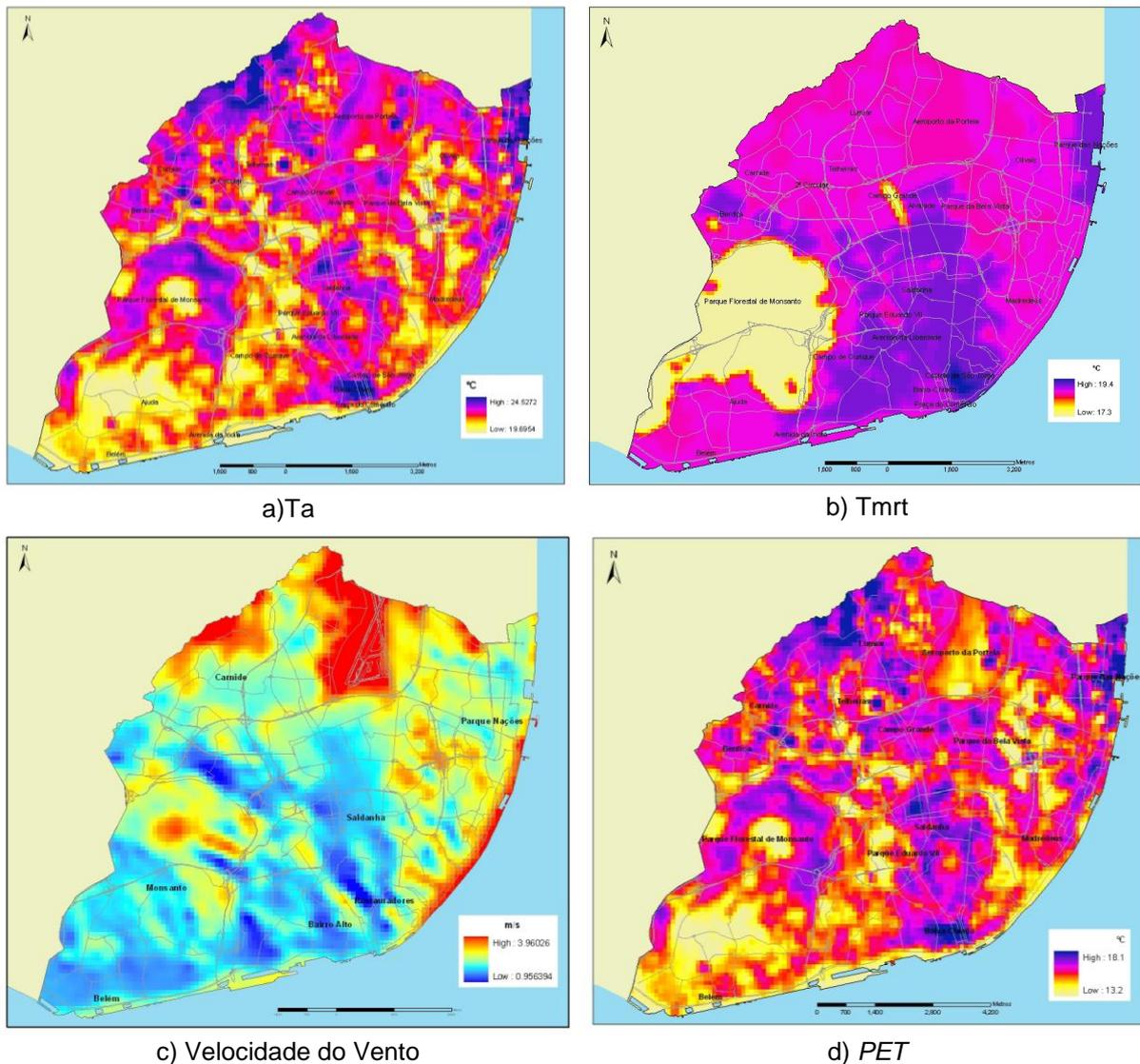


Figura 20 – Noites quentes – modelação espacial da T_a , T_{mrt} , V_v e PET

Os locais com PET mais elevado (com menor desconforto), correspondem à Baixa e alguns sectores do centro da cidade mais densamente ocupados (ao longo da Avenida Almirante Reis, Avenida da Liberdade, Saldanha e Avenidas Novas), ao Parque das Nações e a algumas 'ilhas' no norte da cidade que correspondem a áreas de expansão urbanística recente (Lumiar, Benfica e Telheiras). Aqui, o baixo SVF devido à densa malha urbana e altura dos edifícios, retém o calor armazenado durante o dia pelos materiais, retardando o arrefecimento destas áreas.

As áreas com menores valores de *PET* correspondem a locais mais abertos e expostos e, portanto, sujeitos a rápidas perdas radiativas (exemplo, aeroporto). A menor rugosidade e consequentemente maiores velocidade de vento destas áreas também contribui para o seu arrefecimento. Estes locais correspondem ao aeroporto, interflúvios e áreas não edificadas do sector oriental, faixa ribeirinha e áreas mais altas de Monsanto. O sector ocidental, a sul de Monsanto, apresenta-se também com valores baixos de *PET*. O facto de ser uma área com baixa densidade de construção (predomínio de moradias) e bastantes áreas verdes (*NDVI* elevado), concorre para um arrefecimento mais significativo pela maior evapotranspiração.

2.5. A nortada

O padrão espacial do *PET* (figura 21d) em dias de nortada é, mais uma vez, semelhante ao da *Ta*, caracterizando-se pela grande variação de valores entre áreas próximas. As amplitudes quer da *Ta* quer do *PET* são bastante elevadas, atingindo respectivamente 12 e 17°C entre os locais menos e mais quente. A nortada ocorre tipicamente no Verão e, por isso, os valores máximos estimados da *PET* são elevados (máximo= 37°C), embora ligeiramente mais baixos que os dos dias quentes que são amenizados pelo efeito de arrefecimento do vento.

É a posição topográfica (de maior ou menor abrigo), em relação ao vento dominante de norte, que determina as variações espaciais. As maiores velocidades de vento (valores máximos médios = 3,9m/s) são esperadas nos locais mais altos e expostos – o topo de Monsanto, o aeroporto e algumas áreas a norte da cidade ainda desocupadas. São estas áreas que apresentam um maior grau de conforto, registando os valores mais baixos de *PET* (cerca de 20°C).

Por oposição encontram-se as áreas densamente construídas de fundo de vale e outras áreas mais deprimidas e/ou em posição de abrigo. Estas, pelas deficientes condições de arejamento (velocidades < 1m/s) e sobreaquecimento do ar por efeito da elevada temperatura radiativa das áreas edificadas, registam um desconforto extremo por calor - é o caso de toda a área central da cidade, do Parque das Nações e de alguns bairros a sul de Monsanto. No sector norte da cidade ocorrem também algumas 'ilhas' de calor (*Ta* > 30°C) e níveis bastante elevados de desconforto (*PET* > 35°C).

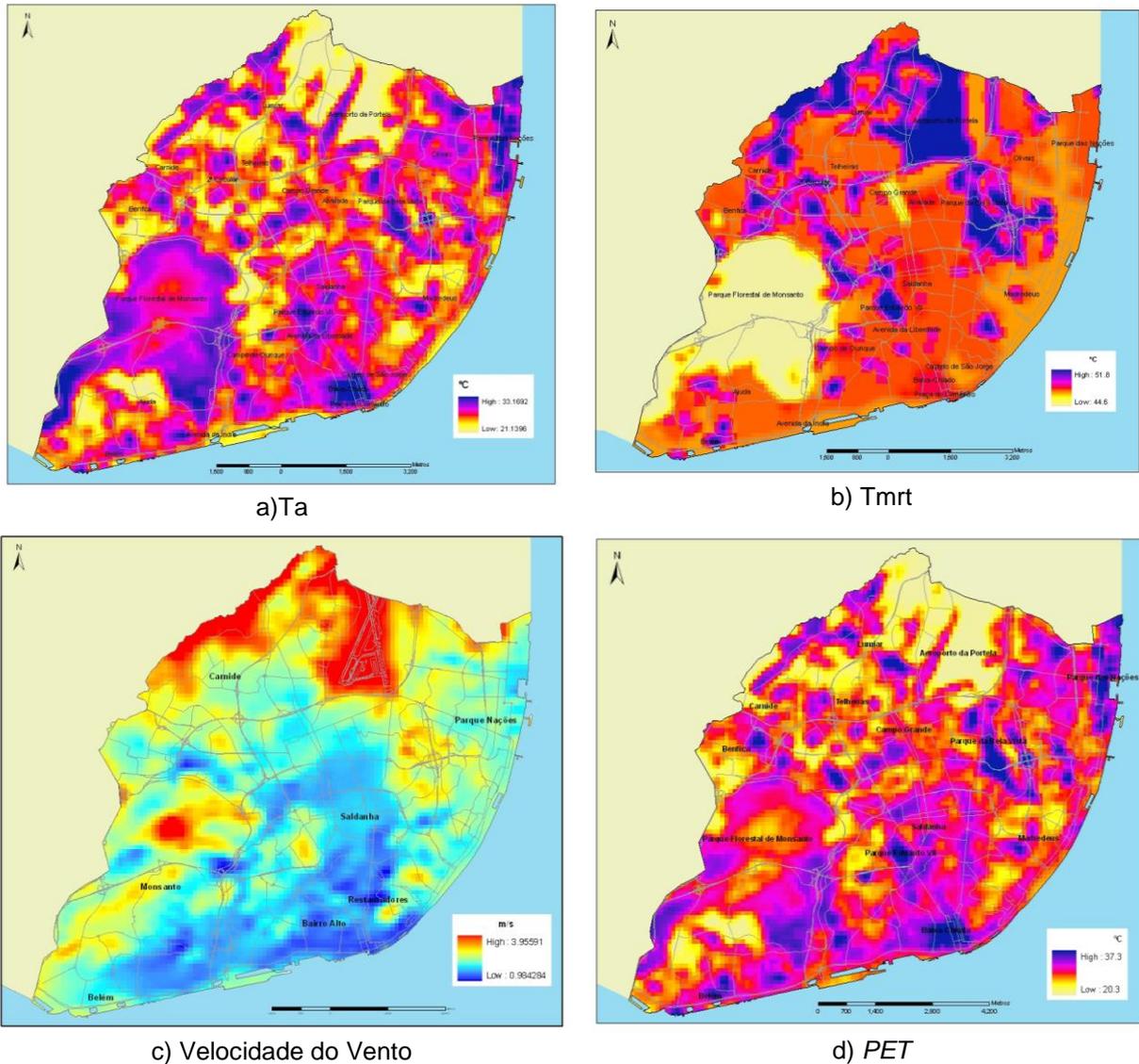


Figura 21 – Nortada – modelação espacial da Ta, Tmrt, Vv e PET

Por outro lado, a ocorrência de ventos fortes e persistentes do quadrante norte que caracterizam estes dias, anulam as brisas sentidas junto às áreas ribeirinhas. Estas deixam assim de usufruir do ar mais fresco e húmido vindo do oceano/rio tornando-se também mais quentes e desconfortáveis.

Há que salientar que em situações de nortada forte e persistente, ao efeito térmico poderá acrescer o efeito mecânico do vento, contribuindo para agravar o nível de desconforto sentido pelos indivíduos.

VI. CONCLUSÕES

A qualidade de vida dos habitantes de uma cidade passa muito pelos níveis de conforto e bem-estar que esta consegue proporcionar à sua população. As condições bioclimáticas nos espaços exteriores são particularmente importantes para a vivência da cidade e saúde dos habitantes. E estas são particularmente importantes nos períodos diurnos, quando o número de população presente na cidade aumenta exponencialmente, quando se desenvolvem grande parte das actividades de ar livre – de circulação, de lazer e convívio, quando a população se encontra mais exposta aos elementos atmosféricos. Os idosos, crianças e indivíduos com patologias sensíveis às condições atmosféricas são os grupos populacionais mais vulneráveis às situações climáticas extremas (Auliciems, 1997; Andrade, 2003).

Em Lisboa, a expansão urbanística das últimas décadas, tende a afectar e alterar as condições de conforto de muitos locais da cidade. A crescente edificação a norte (com o expectável aumento da rugosidade) constitui uma barreira à penetração dos ventos dominantes (do quadrante norte) e um factor de degradação das condições de arejamento e arrefecimento das áreas centrais da cidade (Lopes, 2003; Alcoforado et al, 2005).

Em todos os tipos de tempo considerados, são o centro da cidade e os bairros de maior densidade que registam os valores mais elevados de *PET*. A ocupação do solo mais densa e a geometria urbana mais fechada facilitam a conservação da energia radiativa no interior destes espaços.

Se no Inverno, do ponto de vista exclusivamente térmico, poderá não ter grandes consequências e até ser vantajosa, contribuindo para a diminuição da aclimatização e do consumo energético, já no Verão esta situação assume particular importância e gravidade, acentuando o desconforto térmico por excesso de calor.

Neste estudo, verifica-se efectivamente que é nos dias quentes de Verão que ocorrem as maiores amplitudes e valores de *PET*, no interior da cidade. Os valores mais elevados de *PET* ultrapassam os 40°C no centro de cidade, podendo registar-se uma diferença de cerca de 20°C para os locais mais frescos – áreas verdes e espaços desocupados, como Monsanto e algumas áreas do sector oriental da cidade. Sendo o período do ano por excelência para vivências em espaços exteriores (não aclimatizados), este facto assume particular relevância no bem-estar e saúde da população.

Mas não podemos deixar de salientar o importante papel que as brisas oceânicas têm, no Verão, no arrefecimento do ar contribuindo para atenuar o desconforto térmico. Os espaços ribeirinhos, principalmente do sector ocidental e central da cidade, apresentam valores de *PET* mais baixos que o resto da cidade.

As noites (quentes e frias) apresentam sempre menores amplitudes de *PET* e *Ta* (nunca ultrapassando os 5°C e os 6°C, respectivamente). No período diurno as diferenças de exposição à radiação solar directa contribuem para as grandes variações térmicas na cidade.

No Inverno, o grau de desconforto pelo frio excessivo pode ser provocado pela forte intensidade (ou persistência) do vento (caso do aeroporto) ou pelo maior arrefecimento das superfícies abertas ou não edificadas (Monsanto, áreas não edificadas no norte da cidade), fazendo baixar as temperaturas; ou pelo contrário, o desconforto ser atenuado pelas maiores temperaturas radiativas, nos locais de forte densidade de construção e menores velocidades do vento (áreas mais abrigadas e deprimidas) (Baixa e Avenidas da Liberdade e da Almirante Reis).

Conclui-se assim, que em presença da ocorrência de tipos de tempo mais extremos, como aqueles aqui analisados, grande parte da cidade apresenta níveis de desconforto acentuado e que as condições bioclimáticas esperadas são quase sempre mais desfavoráveis que as dadas pela *Ta*.

As principais diferenças bioclimáticas verificadas na cidade são determinadas pela geometria e morfologia urbana – a presença ou ausência de áreas verdes (variações da taxa de evapotranspiração), o desenho urbano (variação do *SVF*) e o tipo de materiais (maior ou menor capacidade de armazenamento de calor), influenciam as condições de arejamento e o balanço radiativo e térmico da cidade.

Este tipo de informação bioclimática assume particular relevância para as áreas do planeamento e da protecção civil da cidade. Enquanto instrumentos de síntese climática espera-se que possam, por um lado, servir de apoio aos processos de análise e desenho urbanístico da cidade, procurando soluções que promovam boas condições bioclimáticas; e por outro, concorrer para a definição de acções de prevenção e mitigação de riscos associados a situações térmicas extremas. O conhecimento das áreas mais problemáticas em termos de conforto térmico é já uma ajuda preciosa na definição das áreas prioritárias de intervenção e de aviso e alerta às populações em caso de ocorrência de eventos térmicos extremos.

Num cenário provável de alterações climáticas como os preconizados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* para as próximas décadas, as situações climáticas extremas serão cada vez mais intensas e frequentes. Diversos autores sustentam um aumento da morbilidade e mortalidade em situações de ondas de calor e de frio. O estudo de Marques (2007) sobre o impacto das condições climáticas de Inverno na mortalidade diária no distrito de Lisboa, evidencia a existência de correlações significativas entre a mortalidade e a *PET*.

Era interessante em análises futuras incorporar no modelo de análise, cenários climáticos e de crescimento urbano futuros, considerando as projecções realizadas pelo *IPCC* para o aumento da temperatura do ar e as alterações de uso do solo apontadas nos planos de ordenamento da cidade, de forma a quantificar as condições bioclimáticas esperadas para a cidade.

BIBLIOGRAFIA

ABRANTES, T. (2004) - Onda de calor 2003 – situação meteorológica. *Actas da Conferência Ícaro 2004. Ondas de calor e seus efeitos na saúde. Perceber, prever, prevenir*. IM/ONSA, Lisboa: 15.

ALCOFORADO, M. J. (1987) - Brisas estivais do Tejo e do Oceano na região de Lisboa. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa, XXII (43): 71-112.

ALCOFORADO, M. J. (1993) - *O clima da região de Lisboa. Contrastes e ritmos térmicos*. CEG/UL, Lisboa.

ALCOFORADO, M. J. (2006a) - Planning procedures towards high climatic quality cities. Example referring to Lisbon. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa, XLI (82): 49-64.

ALCOFORADO, M. J. (2006b) – A ilha de calor das cidades. Características e medidas de mitigação. *Actas das VI Jornadas de Climatização*, Lisboa, 26 de Outubro.

ALCOFORADO, M. J. ET AL. (2005) - *Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa*. Relatório nº4, CEG/UL, Lisboa.

ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H. (2006a) – Nocturnal temperature in Lisbon (Portugal): thermal patterns, description and modelling. *Estudos de Clima Urbano em Lisboa*. CEG/UL, Lisboa: 45-72.

ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H. (2006b) – Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, 84: 151-159.

ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H. (2007) – Clima e Saúde na cidade. Implicações para o ordenamento. In SANTANA, P.. *A cidade e a saúde*. Ed. Almedina, Coimbra: 100-118.

ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H.; LOPES, A.; VASCONCELOS, J.; VIEIRA, R. (2006) - Observational studies on summer winds in Lisbon (Portugal) and their influence on daytime regional and urban thermal patterns. *Merhavim*, 6: 90-112.

ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H. ; LOPES, A.; OLIVEIRA, S. (2007) – A ilha de calor de Lisboa. Aquisição de dados e primeiros resultados para aplicação ao ordenamento urbano. In ESTEVES, A. ET AL., *Geophilia, O sentir e os sentidos da Geografia*, CEG/UL, Lisboa: 593-612.

- ALCOFORADO, M. J., H ANDRADE, A. LOPES, J. VASCONCELOS (2008) - Application of Climatic Guidelines to Urban Planning. The example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning*, Volume 90, Issues 1-2: 56-65.
- ALCOFORADO, M.J.; ANDRADE, H.; OLIVEIRA, S.; FESTAS, MJ.; ROSA, F. (2009) *Alterações climáticas e desenvolvimento urbano (Climate Change and Urban development)*. DGOTDU, Lisboa.
- AML (2003) – *Atlas da AML - Infraestruturas, transportes e acessibilidades*. AML, Lisboa.
- ANDRADE, H. (1998) – O desconforto térmico estival em Lisboa. Uma abordagem bioclimática. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa, XXXIII (66): 41-58.
- ANDRADE, H. (2003) – *Bioclima humano e temperatura do ar em Lisboa*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras. Universidade de Lisboa.
- ANDRADE, H. (2005) - O clima urbano – natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa XL (80): 67-91.
- ANDRADE, H. & VIEIRA, R. (2005) – *Estudo climático de um espaço verde de Lisboa: o Jardim da Fundação Calouste Gulbenkian*. Relatório nº 5, CEG/UL, Lisboa.
- ANDRADE, H., M. J. ALCOFORADO (2008) - Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night. *Theoretical and applied climatology*. 225 (3–4): 225–237.
- AULICIEMS, A. (1997) – *Advances in Bioclimatology. Human Bioclimatology*. Springer, Berlin.
- CASIMIRO, E., CALHEIROS, J., SANTOS, F.; KOVATS, S. (2006) - National assessment of human health effects of climate change in Portugal: approach and key findings. *Environmental Health Perspectives*, vol. 114 (12): 1950-1956.
- CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA (2001) - *Diagnóstico Sócio-urbanístico da cidade de Lisboa. Uma perspectiva censitária (2001)*. Coleção de Estudos Urbanos – Lisboa XXI.
- CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA (2009) – *Lisboa 2012, uma visão estratégica*. CML.
- ESPÍRITO SANTO, F. (2004a) - Changes in temperature related índices in Portugal mainland. *Actas da Conferência Ícaro 2004. Ondas de calor e seus efeitos na saúde. Perceber, prever, prevenir*. IM/ONSA, Lisboa: 18-19.

- ESPÍRITO SANTO, F. (2004b) - Variações nos indicadores de temperatura em Portugal Continental. *Actas da Conferência Ícaro 2004. Ondas de calor e seus efeitos na saúde. Perceber, prever, prevenir*. IM/ONSA, Lisboa: 22-23.
- FERNÁNDEZ GARCIA, F. (1996) – *Manual de Climatología Aplicada. Clima, medio ambiente y planificación*. Ed. Sintesis, S.A., Madrid.
- FERRER, F. J.; CABRERA, A. GARCÍA; NICOLÀS, J. P. (1996) – Metodología sobre cartografía bioclimática in MARZOL, M.V. ET AL. – *Clima y agua: gestión de um recurso climático*: 365-378.
- GARCÍA-HERRERA, R.; DÍAZ J., TRIGO R.M.; HERNANDEZ E. (2005) - "Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions". *Annales Geophysicae*, 23: 239-251.
- GRIMMOND, S.; OKE, T. R. (1999) – Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38: 1262-1292.
- GRIMMOND, S. (2007) - Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Cities and global environmental change*. Royal Geographical Society: 83-88.
- HÖPPE, P. (1997) – Aspects of human biometeorology in past, present and future. *International Journal of Biometeorology*, 40: 19-23.
- HÖPPE, P. (1999) - The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2): 71-75.
- HÖPPE, P. (2002) – Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy Build*, 34:661-665.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC (2001) – *Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report*.
- JAUREGUI, E. (1997) – The Last Ms for 40th anniversary issue. Aspects of urban human biometeorology. *International Journal of Biometeorology*, 40: 58-61.
- KOVATS, R. S.; HAJAT, S. (2008) - Heat Stress and Public Health - A Critical Review. *Annual Review of Public Health*, 29: 41-55.
- LETTAU, H. (1969) – Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element distribution. *Journal of Applied Meteorology*, 8: 828-832.

- LOPES, A. (2002) - The influence of the growth of Lisboa on Summer wind fields and its environmental implications. *Proceedings of International Conference on Climate change and the built environment*, UMIST, Manchester, 8-9 April.
- LOPES, A. (2003) - *Modificações no clima urbano de Lisboa como consequência do crescimento urbano. Vento, ilha de calor de superfície e balanço energético*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras. Universidade de Lisboa.
- LOPES, A. (2006a) - A ilha de calor das cidades. Características e medidas de mitigação. *Actas das VI Jornadas de Climatização*, Lisboa, 26 de Outubro.
- LOPES, A. (2006b) - A microclimatological study of an urban canyon in Lisboa (Portugal). As a tool to suggest climate guidelines in local urban planning. *6th International Conference on Urban Climate*, Goteborg, Sweden.
- MARQUES, J. (2007) – Condições climáticas de Inverno e a mortalidade diária no distrito de Lisboa. Dissertação de Mestrado em Geografia. Faculdade de Letras. Universidade de Lisboa.
- MAYER, H. (1993) - Urban Bioclimatology. *Experientia*, 49: 957-963.
- MAYER, H.; MATZARAKIS, A. (s/d) – *Human-biometeorological assessment of urban microclimates. Thermal component*. (consultado em Agosto 2010). <http://www.lib.kobe-u.ac.jp/repository/00044728.pdf>.
- MATZARAKIS, A., MAYER, H. (2000) - Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas. In: *11th Seminar on Environmental Protection "Environment and Health"*, 20.-23, November 2000, Thessaloniki, Greece, 155-166.
- MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; IZIOMON, M. (1999) – Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperatures. *International Journal of Biometeorology*, 43: 76-84.
- MATZARAKIS, A., RUTZ, F., MAYER, H. (2007) - Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51, 323-334.
- MATZARAKIS, A.; AMELUNG, B. (2008) – Physiological Equivalent Temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In THOMSON ET AL (Eds.). *Seasonal Forecasts, Climate Changes and Human Health*: 161-172.

- MONTEIRO, L.; ALUCCI, M. (2007) – Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. *Ambiente Construído*, 3: 43-58.
- MORTENSEN, N. G.; LANDBERG L.; TROEN, I.; PETERSEN, E. L. (1993) – *Wind Atlas Analysis and Application Program (WA^sP)*, vol. 1: *getting started*. RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- NOGUEIRA, P.; PAIXÃO, E. J. (2002) - *Estudo da onda de calor de Julho de 1991 em Portugal: efeitos na mortalidade*. Relatório científico, Out. 2002, ONSA, Lisboa.
- NOGUEIRA, P.; PAIXÃO, E. J. (2005) - *Modelos para a mortalidade associada a ondas de calor: actualização do sistema de vigilância e alerta de ondas de calor português*. ONSA, Lisboa.
- OLIVEIRA, S.; ANDRADE, H. (2007) – An initial assessment of the bioclimatic comfort in an outdoor public space in Lisbon. *International Journal of Biometeorology*, 52, 69-84.
- OKE, T. R. (1987) - *Boundary layer climates*. Routledge, London.
- OKE, T. R. (1997) - Urban climates and global environment change. In THOMPSON, R. D.; PERRY, A. *Applied climatology. Principles and practice*. Routledge, London.
- OKE, T. R. (2006) - Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 84, Issue 1-3: 179-190.
- Parlow (1999) - Remotely sensed heat fluxes of urban areas. *Proc. of the 15th Intern. Congress of biometeorology and Intern, conference of urban climatology*. Sidney – Austrália, Macqyarie University.
- PARSONS, K.C. (1993) - *Human thermal environments*. Taylor & Francis, London.
- PEIXOTO, J. P. (1987) - *As variações do clima e o ambiente. O Homem, o clima e o ambiente II*. MPAT, Lisboa.
- SALGUEIRO, T. B. (1992) – *A cidade em Portugal. Uma geografia urbana*. Edições Afrontamento, Porto.
- SALGUEIRO, T. B. (2001) – *Lisboa. Periferia e Centralidades*. Oeiras. Celta.
- UNDERWOOD, C. R.; WARD, E. J. (1966) - The solar radiation area of man. *Ergonomics*, 9, 2: 155-168.
- VASCONCELOS, J.; LOPES, A. (2007) - *Recent urban development trends and its implication on the estuarine breezes in Lisbon, Portugal*.

ANEXOS

Anexo 1 – Localização das Estações Meteorológicas, em Lisboa

Estações Meteorológicas	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Lisboa/G. Coutinho	38°46' N	9°08'W	104
Lisboa/Inst. Geofísico	38°43' N	9°09'W	77

Anexo 2 – Caracterização dos registadores do CEG

Local	Bairro Alto	
Altitude	71 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	Área central da cidade. Posição alcandorada no topo da vertente Oeste do vale da Av. da Liberdade.	
Presença de vegetação	Proximidade de jardim de uso público, com algumas árvores de grande porte.	
Morfologia urbana dominante	Caracteriza-se por malha urbana bastante fechada, constituída por pequenos quarteirões, com edifícios de 2 a 3 pisos, entrecortados por arruamentos estreitos.	
Rugosidade	$Z_0 = 1$	

Tabela 1

Local	Belém	
Altitude	4 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	Sudoeste de Monsanto. Área plana na faixa ribeirinha do Tejo.	
Presença de vegetação	Espaço verde, aberto, essencialmente relvado com algumas árvores dispersas.	
Morfologia urbana dominante	Área aberta, pouco impermeabilizada e construída.	
Rugosidade	$Z_0 = 0,03$	

Tabela 2

Local	Carnide	
Altitude	110 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	Área norte da cidade, no planalto de Lisboa.	
Presença de vegetação	Existência de algumas áreas ainda não ocupadas por construção e ocupadas com vegetação rasteira.	
Morfologia urbana dominante	Eixos de circulação largos com rotundas e troços desnivelados, grandes áreas intersticiais desocupadas e não edificadas.	
Rugosidade	$Z_0 = 0,03$	

Tabela 3

Local	Monsanto	
Altitude	167 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	Topo de colina, na parte ocidental da cidade, a cerca de 2 km do rio, a sul. Limitado a este pelo vale de Alcântara e a oeste pela ribeira de Algés.	
Presença de vegetação	Parque florestal, com aproximadamente 1000ha, composto essencialmente por vegetação de porte arbóreo de carácter florestal.	
Morfologia urbana dominante	Área verde de carácter florestal densa, com alguns edifícios no seu interior, nomeadamente equipamentos militares e prisionais.	
Rugosidade	$Z_0 = 0,7$	

Tabela 4

Local	Restauradores	
Altitude	16 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	Área sul e central da cidade, localizada junto ao Tejo.	
Presença de vegetação	Praticamente ausente, resumindo-se a uma ou outra árvore isolada em pequenos largos.	
Morfologia urbana dominante	Malha urbana ortogonal com ruas orientadas N-S e O-E. A altura dos edifícios ronda os 25-30m e a largura das ruas 8-14m.	
Rugosidade	$Z_0 = 1$	

Tabela 5

Local	Saldanha	
Altitude	82 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	No planalto central da cidade.	
Presença de vegetação	Resumem-se a algumas árvores de arruamento.	
Morfologia urbana dominante	Área de elevada densidade construtiva, na área central da cidade.	
Rugosidade	$Z_0 = 1,2$	

Tabela 6

Local	Parque das Nações	
Altitude	4 m	
Posição geográfica e topográfica na cidade	Parte oriental da cidade, área plana na faixa ribeirinha, sem exposição dominante.	
Presença de vegetação	Existência de alguns jardins com relvado e árvores esparsas.	
Morfologia urbana dominante	Área com edificações novas e de elevada altura, arruamentos ortogonais com algumas árvores.	
Rugosidade	$Z_0 = 1,2$	

Tabela 7

Anexo 3 - Caracterização dos percursos de medições itinerantes

Percurso A: Olivais

		Orientação	Altitude (m)	Distância ao Rio (m)	Descrição local	
A1	EXPO/Passoio neptuno		-	2	15	Parte oriental da cidade. Área junto ao rio e de novas urbanizações, superfície empedrada
A2	R. Argonautas (descampado)		-	4	150	Parte oriental da cidade. Área aberta asfaltada, próxima do rio
A3	Av Marechal G. Costa/Av. Fernando Pessoa		WNW - ESSE	25	490	Parte oriental da cidade. Junto a um eixo viário largo e com bastante tráfego. A sul de edifícios novos de 7 pisos
A4	Av Marechal G. Costa, 12B		WNW - ESSE	47	990	Parte oriental da cidade. Eixo viário largo e com tráfego intenso. Ocupação por grandes armazéns
A5	Av Marechal G. Costa/Bombeiros		WNW - ESSE	60	1420	Parte oriental da cidade. Eixo viário largo e com tráfego intenso. Área de edifícios de 3 pisos com algumas árvores de arruamento
A6	Av Marechal G. Costa/R. Cidade Bissau (vivendas)		WNW - ESSE	73	1750	Parte oriental da cidade. Eixo viário largo e com tráfego intenso, ladeado por alguma vegetação arbórea e moradias
A7	Av Marechal G. Costa/R. Vila Teixeira Pinto		-	100	2400	Parte oriental da cidade. Área aberta, relvada, em rotunda ampla. Local de tráfego intenso

Percurso B: Baixa

		Orientação	Altitude (m)	Distância ao Rio (m)	Descrição local	
B1	Praça do Comércio		-	2	5	Parte central da cidade. Espaço aberto, empedrado, junto ao rio
B2	Rua do Ouro		NNW - SSE	5	360	Parte central da cidade. Arruamento com tráfego intenso em malha urbana ortogonal com edifícios antigos de 5 pisos, com cobertura em telha
B3	Rossio		NNW - SSE	12	820	Parte central da cidade. Largo amplo, empedrado, sem vegetação em malha urbana com edifícios de 4/5 pisos
B4	Restauradores		NNW - SSE	17	1140	Parte central da cidade. Praça ampla, várias faixas de rodagem, separadores centrais e tráfego intenso. Edifício antigo, de 5 pisos e cobertura de telha
B5	Avenida da Liberdade (Estatua Grande Guerra)		NNW - SSE	28	1600	Parte central da cidade. Arruamento largo, com várias faixas de rodagem e tráfego intenso. Passeios com alinhamento de árvores e pequeno jardim central. Edifício muito heterogéneo, edifícios novos alternam com edifícios antigos
B6	Avenida da Liberdade, cruzamento com Avenida Alexandre Herculano		NNW - SSE	47	1970	Parte central da cidade. Arruamento largo, com várias faixas de rodagem, passeios com alinhamento de árvores e pequeno jardim central. Edifício muito heterogéneo, edifícios novos alternam com edifícios antigos
B7	Marquês		-	60	2250	Parte central da cidade. Rotunda ampla, com várias faixas de rodagem, onde confluem diversos arruamentos. Praça central empedrada e com pequenas áreas ajardinadas
B8	Parque Eduardo VII (topo)		-	105	2800	Parte central da cidade. Área verde no centro da cidade, em interflúvio a sudoeste das Avenidas Novas

Percurso C: Belém

		Orientação	Altitude (m)	Distância ao Rio (m)	Descrição local	
A1	Torre de Belém/Cais da Princesa		-	2	12	Parte ocidental da cidade. Área aberta, relvada, mesmo junto ao rio
A2	Torre de Belém/Jardim		-	2	165	Parte ocidental da cidade. Área relvada, com pouca cobertura arbórea
A3	Avenida da Torre de Belém/Largo da Princesa		-	5	320	Parte ocidental da cidade. Cruzamento amplo, com pequeno largo onde estão presentes algumas árvores de arruamento, em bairro de moradias unifamiliares e edifícios de 2/3 pisos
A4	Av Torre Belém, nº 16 (Embaix Uruguai)		N - S	15	525	Parte ocidental da cidade. Arruamento com algumas árvores de arruamento, em bairro de moradias unifamiliares com espaços verdes privados
A5	Av Torre Belém, nº 28		N - S	30	740	Parte ocidental da cidade. Arruamento com algumas árvores de arruamento, em bairro de moradias unifamiliares com espaços verdes privados
A6	Av Restelo/Jardim		W - E	35	870	Parte ocidental da cidade. Área aberta, relvada e com elementos arbóreos esparsos. Exposição a S
A7	Jardim Ducla Soares (1º Patamar)		W - E	45	930	Parte ocidental da cidade. Área aberta, relvada e com elementos arbóreos esparsos. Exposição a S
A8	Capela S. Jerónimo		-	50	1000	Parte ocidental da cidade. Área aberta, relvada mas com alguns elementos arbóreos. Exposição a S

Anexo 4 – Locais representativos das classes de morfologia urbana

Áreas não edificadas

Verde denso



Verde pouco denso



Outras áreas não ocupadas



Áreas edificadas

Baixa
densidade

Moradias unifamiliares



Outras áreas



Média
densidade



Elevada
densidade

Bairros de traçado ortogonal



Bairros de implantação
pontual



Bairros com verde no interior
dos quarteirões



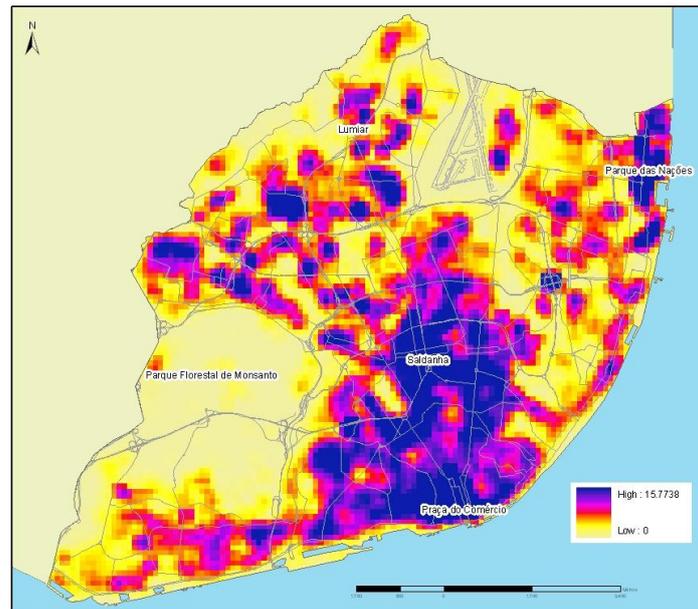
Bairros de traçado medieval



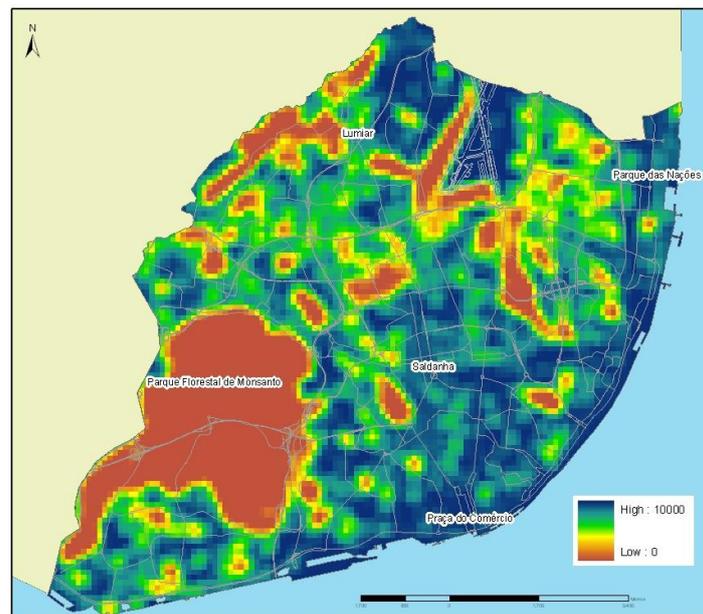
Outras áreas



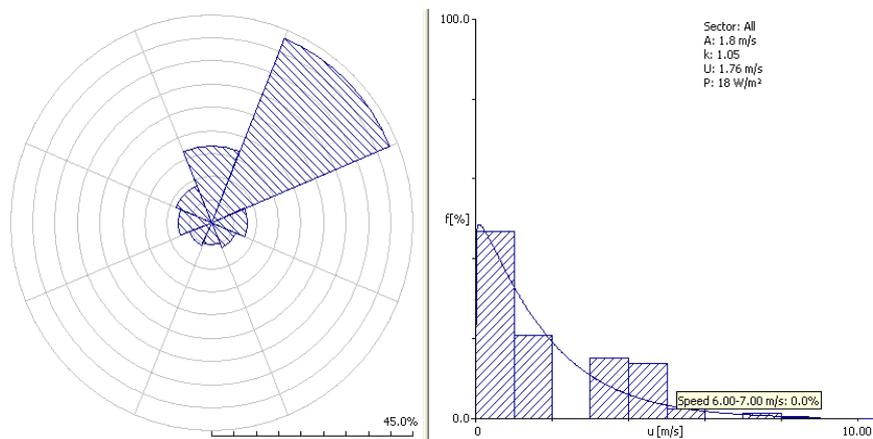
Anexo 5 – Coeficiente volumétrico



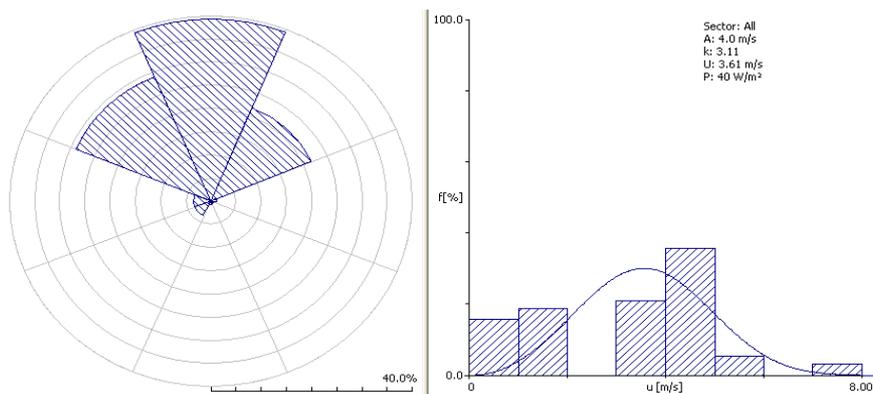
Anexo 6 – Área impermeabilizada



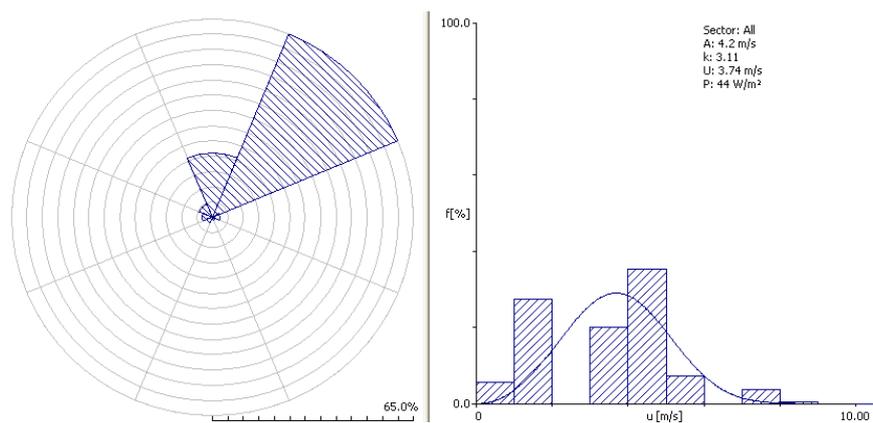
Anexo 7 – Regime dos ventos nos diversos tipos de tempo: rosa dos ventos e curva de Weibull



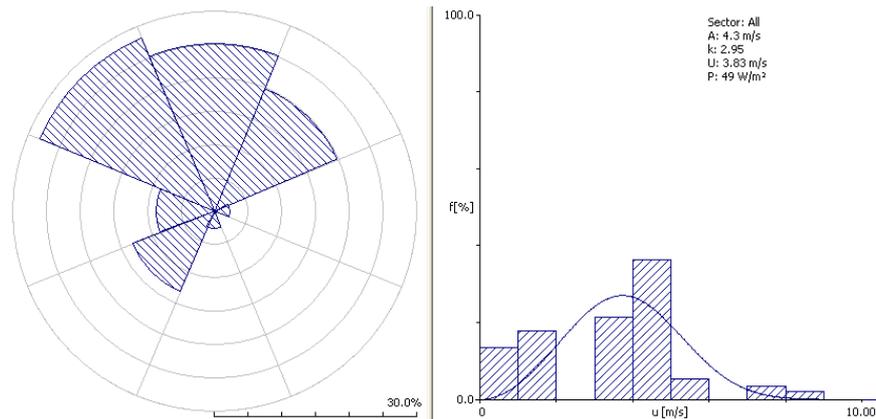
7.1. - Dias frios



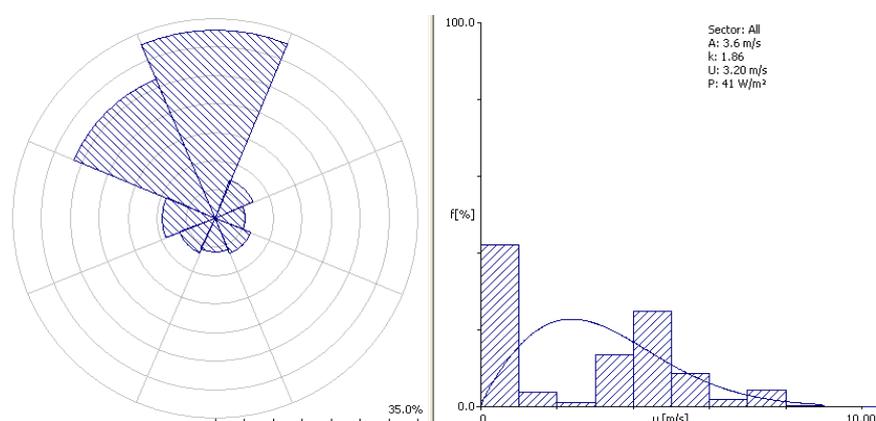
7.2. – Dias quentes



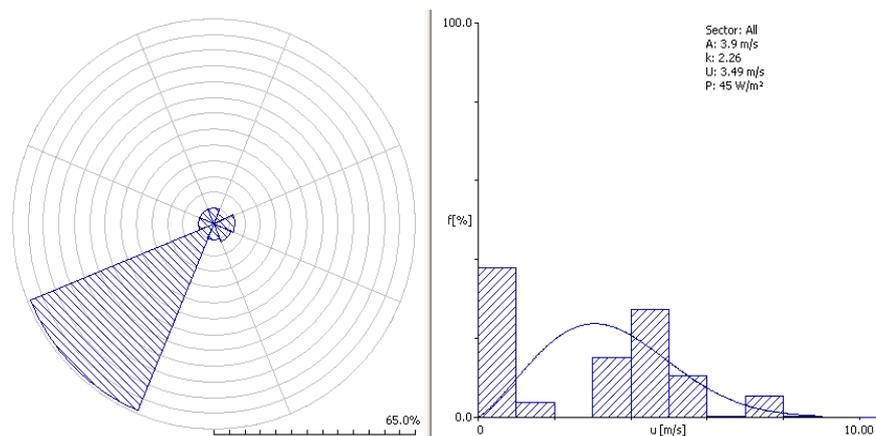
7.3. – Noites frias



7.4. – Noites quentes



7.5. – Nortada



7.6. – Vento de sudoeste (simulação de brisa)

Anexo 8 - Temperatura radiativa média por classes de morfologia urbana (valores diurnos)

Classes Morfologia urbana		Tmrt				
		Nortada	Dias frios	Dias Quentes	Noites Frias	Noites Quentes
Áreas não edificadas	Verde denso	44,60	19,30	53,00	0,80	17,30
	Verde pouco denso	51,80	25,00	59,40	-4,90	18,70
	Outras áreas não ocupadas	50,80	24,30	58,40	-4,90	18,70
Áreas edificadas	Baixa densidade - moradias unifamiliares	47,45	21,55	55,20	-4,90	18,70
	Outras áreas de densidade baixa	46,85	20,85	55,20	-4,40	18,80
	Média densidade	47,25	21,30	55,15	-4,60	18,80
	Elevada densidade - bairros de traçado ortogonal	47,70	21,20	55,85	-4,70	18,90
	Elevada densidade - bairros de implantação pontual	47,70	21,85	56,10	-4,10	18,90
	Elevada densidade - bairros com verde no interior dos quarteirões	47,05	21,45	52,95	-4,40	18,80
	Elevada densidade - bairros de traçado medieval	46,80	19,80	55,90	-2,50	19,40
	Outras áreas de densidade elevada	47,40	20,50	55,85	-3,60	19,10

Anexo 9 - Balanço de Radiação (Oke, 1987)

$$Q^* = (K\downarrow + K\uparrow) + (L\downarrow + L\uparrow)$$

Sendo: $K\downarrow$ = radiação solar incidente na superfície;

$K\uparrow$ = radiação solar reflectida

$L\downarrow$ = Radiação infra-vermelha atmosférica

$L\uparrow$ = Radiação infra-vermelha da superfície

Anexo 10 - Balanço energético em meio urbano (Oke, 1987)

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

Sendo: Q_F = fluxo de calor de origem antrópica

Q_H = fluxo turbulento de calor sensível

Q_E = fluxo turbulento de calor latente

ΔQ_S = variação da acumulação térmica sub-superficial

ΔQ_A = variação do transporte horizontal de energia