



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento  
Ano 2014

**ANDREIA SUSANA AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO A POLUENTES  
DA COSTA MAIA ATMOSFÉRICOS NA CIDADE DE AVEIRO**



**Universidade de Aveiro** Departamento de Ambiente e Ordenamento  
Ano 2014

**ANDREIA SUSANA DA  
COSTA MAIA**      **AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO A POLUENTES  
ATMOSFÉRICOS NA CIDADE DE AVEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Miranda, Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) como entidade financiadora do projeto MAPLIA (PTDC/AAG-MAA/4077/2012) e cofinanciamento por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE.





Dedico este trabalho à minha mãe.

**o júri**

presidente

**Professor Doutor António José Barbosa Samagaio**  
Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto Da Silva Miranda**  
Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Doutora Ana Margarida Lobo Lourenço da Costa**  
Técnica Superior no Instituto do Ambiente e Desenvolvimento - IDAD

## **agradecimentos**

A conclusão deste trabalho nunca se teria concretizado sem o apoio e a confiança de um conjunto de pessoas às quais devo os mais sinceros agradecimentos.

À Professora Doutora Ana Isabel Miranda, pela orientação regular nesta tese, por todo o tempo disponibilizado, por toda a aprendizagem, pelo apoio e ajuda inestimável. O seu imenso conhecimento, as sábias sugestões e críticas construtivas ao longo de todo o trabalho levaram-me a evoluir a nível académico e pessoal. As palavras de ânimo e encorajamento em momentos vacilantes ajudaram-me a acreditar que era possível chegar ao fim. Um sincero obrigada por tudo.

À Professora Doutora Joana Ferreira, pela ajuda preciosíssima, por todo o tempo disponibilizado e por todo o apoio com o modelo de emissões TREM.

À Professora Doutora Isabel Nunes pelo auxílio valioso na simplificação de tratamentos de dados. A todos os membros do Departamento de Ambiente e Ordenamento, alunos e professores, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos pelo incentivo neste trabalho, por todos estes anos de companheirismo e momentos de alegrias que levo para a vida.

Às pessoas mais importantes na minha vida: à minha família por todo o apoio, carinho e motivação. Em especial, à minha mãe, por ser uma inspiração, pelo seu amor incondicional e dedicação permanente, o meu “porto de abrigo”, por ser a minha âncora onde vou buscar toda a força e coragem para enfrentar os desafios da vida. Por fim, mas não menos importante, ao Fábio, que me apoiou incansavelmente em todos os momentos, pela paciência, compreensão e pelo carinho e alegria com que sempre completou os meus dias.

## **palavras-chave**

Qualidade do Ar, modelação, AUSTAL2000, exposição humana, poluentes atmosféricos, áreas urbanas

## **resumo**

O desenvolvimento económico, tecnológico e populacional, aliado à expansão urbana, aos atuais padrões de consumo, ao tráfego intenso, à má gestão ambiental e à falta de planeamento adequado refletem-se no ambiente, tendo repercussões na qualidade de vida e saúde humana. A poluição atmosférica assume-se, na atualidade, como a maior ameaça ambiental, visto ter um impacto determinante na saúde dos cidadãos. Apesar das melhorias significativas de qualidade do ar registadas nas últimas décadas, muitas cidades na Europa ainda não atingiram níveis de qualidade do ar salutar ou previstos na legislação.

Neste sentido, controlo e monitorização da qualidade do ar são fundamentais. A aplicação de modelos de qualidade do ar permite simular diferentes fontes emissoras, bem como o seu contributo para as concentrações dos poluentes na atmosfera.

O objetivo principal deste trabalho consiste em estimar a exposição da população da cidade de Aveiro à poluição atmosférica, no ano 2012, recorrendo a um modelo de qualidade do ar adequado para a aplicação a áreas urbanas, o AUSTAL2000. Procedeu-se à caracterização da área de estudo, incluindo a quantificação das emissões de tráfego com base no modelo de emissões TREM. A aplicação do modelo AUSTAL2000 permitiu obter a variação espacial e temporal dos poluentes medidos, NO<sub>2</sub> e PM10. As médias anuais estimadas, para ambos os poluentes, indicam uma qualidade do ar que cumpre os valores-limite da legislação. Os valores estimados pelo modelo foram comparados com as medições disponíveis na estação de monitorização existente na cidade, verificando-se um bom desempenho do modelo.

Com os resultados obtidos efetuou-se uma estimativa da exposição populacional, na área em estudo, aos poluentes simulados.

A avaliação da exposição populacional revela as PM10 como sendo o poluente mais crítico na cidade de Aveiro, com níveis de exposição mais elevados para a saúde humana.

Apesar do bom desempenho do modelo AUSTAL2000, a comparação dos resultados do modelo com as medições da estação de qualidade do ar sugere uma subestimativa das concentrações por parte do modelo, podendo estar relacionado com as fontes de emissão selecionadas, a escala de aplicação, da resolução temporal dos resultados analisados ou dos poluentes simulados.

**keywords**

Air quality, modeling, AUSTAL2000, human exposure, air pollutants, urban areas

**abstract**

The economic, technological and population growth, combined with urban sprawl, the current consumption patterns, the heavy traffic, poor environmental management and lack of proper planning is reflected in the environment, and impact on quality of life and human health. Air pollution is assumed, at present, as the greatest environmental threat, as having a decisive impact on the health of citizens. Despite significant improvements in air quality experienced in recent decades, many cities in Europe have not yet reached levels of quality wholesome air or under the law.

In this way, control and monitoring of air quality are fundamental. The application of air quality models to simulate different emission sources and their contribution to the concentrations of pollutants in the atmosphere.

The main objective of this work is to estimate the exposure of the population of the city of Aveiro air pollution in 2012, using a quality model suitable for air application to urban areas, AUSTAL2000. Proceeded to characterize the study area, including a quantification of emissions based on traffic emissions TRAIN model. The model application AUSTAL2000 afforded the spatial and temporal variation of measured pollutants, NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>. The estimated annual averages for both pollutants, indicate air quality that meets the limit values of legislation. The values estimated by the model were compared with measurements available in the existing monitoring station in the city, checking out a good performance of the model.

With the results we performed an estimation of population exposure in the study area, the simulated pollutants.

The assessment of population exposure reveals PM<sub>10</sub> as the pollutant most critical in the city of Aveiro, with higher levels of exposure to human health.

Despite the good performance of the model AUSTAL2000, the comparison of model results with measurements of air quality station suggests an underestimation of concentrations from the model and could be related to emission sources selected, the scale of implementation of resolution temporal analysis of the results or the simulated pollutants.



## Índice

ABREVIATURAS.....	V
SÍMBOLOS .....	VI
<b>FÓRMULAS</b> .....	<i>vi</i>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2. QUALIDADE DO AR E SAÚDE HUMANA</b> .....	<b>12</b>
2.1 POLUENTES ATMOSFÉRICOS .....	12
2.2 EXPOSIÇÃO HUMANA A POLUENTES ATMOSFÉRICOS. ....	16
2.3 PRINCIPAIS EFEITOS NA SAÚDE HUMANA.....	19
2.4 LEGISLAÇÃO DE QUALIDADE DO AR .....	21
<b>3. MODELAÇÃO DA QUALIDADE DO AR</b> .....	<b>23</b>
3.1 MODELOS DE QUALIDADE DO AR.....	23
3.2 SELEÇÃO DO MODELO PARA APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO.....	24
3.3 O MODELO AUSTAL2000.....	26
<b>4 CASO DE ESTUDO: CIDADE DE AVEIRO</b> .....	<b>30</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MUNICÍPIO DE AVEIRO .....	30
4.2 O CLIMA DO MUNICÍPIO DE AVEIRO.....	36
4.2.1 <i>Temperatura</i> .....	36
4.2.2 <i>Humidade</i> .....	36
4.2.3 <i>Pluviosidade</i> .....	36
4.2.4 <i>Nevoeiros</i> .....	37
4.2.5 <i>Regime dos ventos</i> .....	37
4.3 CARACTERIZAÇÃO SOCIODEMOGRÁFICA.....	37
4.4 PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES .....	39
4.5 QUALIDADE DO AR EM AVEIRO .....	40
<b>5 CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO AUSTAL2000</b> .....	<b>44</b>
5.1 DOMÍNIO E PERÍODO DE SIMULAÇÃO .....	44
5.2 FONTES DE EMISSÃO .....	45
5.3 DADOS METEOROLÓGICOS .....	48
5.4 RESULTADOS DO MODELO AUSTAL2000.....	52
5.4.1 <i>DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS VALORES DE CONCENTRAÇÃO</i> .....	52
5.4.2 <i>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS COM OS VALORES MEDIDOS PELA ESTAÇÃO DE MONITORIZAÇÃO</i> .....	53
<b>6 ESTIMATIVA DA EXPOSIÇÃO POPULACIONAL</b> .....	<b>55</b>
6.1 METODOLOGIA .....	55
6.2 RESULTADOS DO CÁLCULO DA EXPOSIÇÃO POPULACIONAL.....	57
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>62</b>
WEBGRAFIA .....	65
<b>ANEXOS</b> .....	<b>67</b>

I.	DADOS DA FROTA AUTOMÓVEL .....	67
II.	DADOS METEOROLÓGICOS.....	68
	<i>Ficheiro Meteorológico:</i> .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - PERCENTAGEM DA POPULAÇÃO URBANA DA UNIÃO EUROPEIA (UE) EXPOSTA A NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES SUPERIORES AOS PADRÕES DE QUALIDADE DO AR DA UE [EEA, 2013].	8
FIGURA 2.1 - CADEIA DE EVENTOS ASSOCIADOS À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, DA EMISSÃO DE POLUENTES AOS EFEITOS NA SAÚDE [BORREGO <i>ET AL.</i> , 2008].	12
FIGURA 2.2 - FONTES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS NA EUROPA [EEA, 2013].	13
FIGURA 2.3 - FONTES DE EMISSÃO DE PARTÍCULAS [FERREIRA, 2007].	14
FIGURA 2.4 - DEFINIÇÃO DE EXPOSIÇÃO COMO SENDO A INTERAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES DE UMA ÁREA E A POPULAÇÃO DESSA ÁREA [OMS, 1999].	16
FIGURA 2.5 - ORIGEM DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES EM AMBIENTES INTERIORES [OMS, 1999].	17
FIGURA 2.6 – CONDICIONANTES PARA DETERMINAÇÃO DA EXPOSIÇÃO HUMANA.	18
FIGURA 2.7 - ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO DA AVALIAÇÃO E GESTÃO DO AR AMBIENTE NA UNIÃO EUROPEIA E EM PORTUGAL	22
FIGURA 3.1 - PRINCÍPIO DO MODELO LAGRANGIANO DE PARTÍCULAS [JANICKE, 2008].	26
FIGURA 3.2 - ESQUEMA SÍNTESE DOS DADOS DE ENTRADA DO AUSTAL2000.	27
FIGURA 3.3 - EXEMPLO DE UM FICHEIRO DE ENTRADA DO MODELO AUSTAL2000.	27
FIGURA 4.1 - LOCALIZAÇÃO DA CIDADE DE AVEIRO [VALÉRIO, 2010].	31
FIGURA 4.2 - CARTA HIPSOMÉTRICA DA CIDADE DE AVEIRO [VALÉRIO, 2010].	32
FIGURA 4.3 - CARTA DE DECLIVES [VALÉRIO, 2010].	33
FIGURA 4.4 – CARTA DA RIA DE AVEIRO [VALÉRIO, 2010].	34
FIGURA 4.5 – CARTA DA REDE DE ACESSIBILIDADES [VALÉRIO, 2010].	35
FIGURA 4.6 - TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE AVEIRO/BARRA [VALÉRIO, 2010].	36
FIGURA 4.7 – REGIME DOS VENTOS DO MUNICÍPIO DE AVEIRO [VALÉRIO, 2010].	37
FIGURA 4.8 - EVOLUÇÃO DO Nº DE HABITANTES NO CONCELHO DE AVEIRO [5].	38
FIGURA 4.9 - POPULAÇÃO RESIDENTE DO CONCELHO DE AVEIRO, SEGUNDO GRUPOS ETÁRIOS [INE 2012].	38
FIGURA 4.10 – POPULAÇÃO RESIDENTE (Nº) POR LOCAL DE FREGUESIA. GRUPO ETÁRIO: TOTAL SEXO: HM. [INE, 2012].	39
FIGURA 4.11 - TOTAL DE EMISSÕES POR SETOR NO MUNICÍPIO DE AVEIRO [ADAPTADO DO RELATÓRIO DE EMISSÕES POR CONCELHO DA APA, 2008].	40
FIGURA 4.12 - ESTAÇÃO DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR EM AVEIRO.	42
FIGURA 4.13 - NÚMERO DE EXCEDÊNCIAS AO VL DIÁRIO DE PM10 – EXCEDÊNCIAS PERMITIDAS: 35 DIAS NO ANO (À ESQUERDA) E VL ANUAL DE PM10 EM CADA ANO (À DIREITA).	42
FIGURA 4.14 - NÚMERO DE EXCEDÊNCIAS AO VL DIÁRIO DE NO <sub>2</sub> – EXCEDÊNCIAS PERMITIDAS: 18 DIAS NO ANO (À ESQUERDA) E VL ANUAL DE NO <sub>2</sub> EM CADA ANO (À DIREITA).	43
FIGURA 5.1 - NÍVEIS DE ORDENAMENTO PROPOSTOS NO PMMA PARA O CONCELHO DE AVEIRO.	44
FIGURA 5.2 - DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO.	45
FIGURA 5.3 – VIAS DE TRÁFEGO CONSIDERADAS PARA A SIMULAÇÃO.	46
FIGURA 5.4 – TAXAS DE EMISSÃO DAS VIAS DE SIMULAÇÃO.	48
FIGURA 5.5 – VARIAÇÃO DA ALTURA DA CAMADA DE MISTURA AO LONGO DE UM DIA DE SIMULAÇÃO.	50
FIGURA 5.6 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS ANUAIS ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) DE PM10 E NO <sub>2</sub> , RESPECTIVAMENTE, NO DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO.	52
FIGURA 6.1 – DIVISÃO DO DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO EM FREGUESIAS.	56
FIGURA 6.2 – MÉDIAS ANUAIS DE EXPOSIÇÃO HUMANA A NO <sub>2</sub> .	57
FIGURA 6.3 - MÉDIAS ANUAIS DE EXPOSIÇÃO HUMANA A PM10, NO PERÍODO DIURNO (À ESQUERDA) E NO PERÍODO NOTURNO (À DIREITA).	58

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - FONTES, PROCESSOS DE FORMAÇÃO E POSSÍVEIS EFEITOS NA SAÚDE HUMANA (ADAPTADO DO RELATÓRIO DA OMS, 2004) DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS PM E NO <sub>x</sub> .....	20
TABELA 3.1 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS URBANOS DE QUALIDADE DO AR. ....	25
TABELA 3.2 - VALORES-LIMITE PARA GARANTIR A PROTEÇÃO HUMANA .....	28
TABELA 4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO CENTRO [RELATÓRIO DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO CENTRO, 2011] .....	41
TABELA 5.1 – IDENTIFICAÇÃO DAS VIAS DE TRÁFEGO .....	46
TABELA 5.2 – CLASSES DE ESTABILIDADE DE PASQUILL [ADAPTADO DE ESSA <i>ET AL.</i> , 2006].....	49
TABELA 5.3 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE AS CLASSES DE ESTABILIDADE DE PASQUILL-GIFORD COM A FLUTUAÇÃO HORIZONTAL DA DIREÇÃO DO VENTO ( $\sigma_{\theta}$ ) E COM O COMPRIMENTO DE MONIN-OBUKHOV [ADAPTADO DE ESSA <i>ET AL.</i> , 2006]. ....	49
TABELA 5.4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES CLASSES DE ESTABILIDADE [ADAPTADO DE CERMAK <i>ET AL.</i> , 1995]. ....	50
TABELA 5.5 – EXEMPLO DE SEQUÊNCIA DE CÁLCULOS PARA OBTER VALOR DE H <sub>M</sub> PARA UM DIA DO ANO SIMULADO (2 DE ABRIL DE 2012).....	51
TABELA 5.6 – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS ANUAIS MEDIDAS E ESTIMADAS DE PM <sub>10</sub> E NO <sub>2</sub> . ....	53
TABELA 6.1 - RELAÇÕES EMPÍRICAS I/E PARA NO <sub>2</sub> E PM <sub>10</sub> PARA DOIS MICROAMBIENTE DISTINTOS [BAEK <i>ET AL.</i> , 1997; USEPA, 1997A; MONN, 2001; GULLIVER & BRIGGS, 2004; WU <i>ET AL.</i> , 2005; FERREIRA, 2007]. AS RELAÇÕES SÃO VÁLIDAS PARA CONCENTRAÇÕES EM MG.M <sup>-3</sup> .....	55
TABELA 6.2 – DISTRIBUIÇÃO DA POPULAÇÃO PELA ÁREA EM ESTUDO. ....	57
TABELA I.1 - ESTRUTURA DA FROTA AUTOMÓVEL POR TIPO DE TECNOLOGIA PARA VEÍCULOS LIGEIROS. ADAPTADO DO PLANO MUNICIPAL DE MOBILIDADE DE AVEIRO, QUADRO 2.9, CARATERIZAÇÃO DAS FROTAS. ....	67
TABELA I.2 - ESTRUTURA DA FROTA AUTOMÓVEL POR TIPO DE TECNOLOGIA PARA VEÍCULOS PESADO. ADAPTADO DO PLANO MUNICIPAL DE MOBILIDADE DE AVEIRO, QUADRO 2.10, CARATERIZAÇÃO DAS FROTAS. ....	67
TABELA I.3 – ESTRUTURA DA FROTA DE AUTOCARROS DA MOVEBUS POR CLASSES E TECNOLOGIA (COM BASE NA IDADE) DO VEÍCULO (ADAPTADO DO PLANO MUNICIPAL DE MOBILIDADE DE AVEIRO, QUADRO 2.11, CARATERIZAÇÃO DAS FROTAS).67	

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### **ABREVIATURAS**

---

ADMS - Urban	Multiple source Gaussian model for hourly concentrations including GRS chemical schemes.
AERMOD	AERMIC (AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee)-Model
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AQG	Air Quality Guidelines
AUSTAL2000	Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft 2000
CAFE	Clean air for Europe
CAM <sub>x</sub>	Eulerian nested chemical transport model
CCDR-C	Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro
CHIMERE	Nested Eulerian chemical transport model
CMA	Câmara Municipal de Aveiro
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metálicos
DWD	German Weather Service
EEA	Agência Europeia do Ambiente (European Environment Agency)
EQM	Erro Quadrático Médio
EQMN	Erro Quadrático Médio Normalizado
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISP	Instituto de Seguros de Portugal
INERPA	Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas
OC	Carbono Orgânico
OMS	Organização Mundial de Saúde
PAH	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
PDM	Plano Director Municipal
PM	Partículas em Suspensão
PM <sub>2,5</sub>	Partículas de diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 micrómetros (µm)
PM <sub>10</sub>	Partículas de diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 micrómetros (µm)
PMMA	Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro
TAPM	The Air Pollution Model
TERM	Sistema de Relatórios sobre Transportes e Ambiente
TREM	Transport Emission Model for Line Sources
UA	Universidade de Aveiro
EU	União Europeia
VDI	Association of German Engineers
VL	Valor-Limite

## SÍMBOLOS

---

### FÓRMULAS

C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzeno
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NH <sub>4</sub>	Amónia
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Azoto
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Azoto
O <sub>2</sub>	Oxigénio
O <sub>3</sub>	Ozono
OC	Carbono Orgânico
Pb	Chumbo
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre

### Símbolo Unidades Significado

z <sub>0</sub>	m	Rugosidade superficial
Há	m	Altura do anemómetro
h <sub>m</sub>	m	Altura da camada de mistura
F <sub>c</sub>	s <sup>-1</sup>	Parâmetro de Coriolis
u*	m. s <sup>-1</sup>	Velocidade tangencial
U	m. s <sup>-1</sup>	Velocidade média do vento
Z	m	Altura a partir do chão
θ <sub>σ</sub>	rad	Flutuação horizontal da direção do vento
Δu/ Δz	s <sup>-1</sup>	Perfil vertical do vento

---

## 1. INTRODUÇÃO

*«Cidades onde sabe bem viver são cidades onde se respira ar de qualidade!»*

Professor Carlos Borrego

Respirar é o mais primordial dos atos que leva o ser humano ao encontro com o mundo que o rodeia no momento vital da nascença. O ar é um recurso indispensável e uma necessidade constante para todos. Há um vínculo determinante na relação qualidade do ar e exposição humana, pelo que a má qualidade do ar provocada pela poluição atmosférica afeta o ser humano a vários níveis, prejudicando a sua saúde e a saúde do ambiente.

A poluição atmosférica afigura-se, na Europa, como um dos maiores desafios da atualidade, principalmente em áreas urbanas, devido ao grande impacte na saúde dos cidadãos [Borrego, 2013]. O crescente desenvolvimento económico, tecnológico e populacional, aliado à expansão urbana, aos atuais padrões de consumo, ao tráfego intenso, à má gestão ambiental e à falta de planeamento adequado refletem-se na qualidade, tendo repercussões na qualidade de vida e saúde humana.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) define a poluição do ar como sendo: *a contaminação do ambiente, interior ou exterior, por qualquer agente químico, físico ou biológico, que modifica as características naturais da atmosfera. Aparelhos domésticos de combustão, veículos automóveis, instalações industriais e incêndios florestais são fontes comuns de poluição do ar. Poluentes de grande preocupação para a saúde das populações incluem material particulado, monóxido de carbono, ozono, dióxido de azoto e dióxido de enxofre. A exposição à poluição do ar interior e exterior pode causar doenças respiratórias, entre outras, podendo mesmo ser fatal* [1].

Recentemente, a Organização Mundial de Saúde classificou a poluição atmosférica como cancerígena, num estudo onde revela que a exposição a poluentes atmosféricos está na origem de cancro do pulmão e da bexiga [IARC, 2013]. De acordo com este estudo, pode existir uma mistura de substâncias causadoras de cancro na composição do ar poluído, sendo a poluição do ar não só um risco para a saúde em geral, mas também uma das principais causas ambientais das mortes por cancro. O estudo identificou as principais fontes de poluição atmosférica, destacando os transportes, as instalações de produção de energia, as emissões industriais e agrícolas, e o aquecimento e cozinhas domésticas. Estimativas recentes sugerem que a percentagem de doenças devido à poluição do ar é vultosa. Estima-se que a exposição a partículas finas tenha potenciado 3,2 milhões de mortes prematuras em 2010 (no mundo), maioritariamente devido a doenças cardiovasculares, e 223 000 mortes por cancro de pulmão [2].

As partículas são consideradas o poluente atmosférico mais nocivo para a saúde humana na Europa [EEA, 2013]. De acordo com a OMS [WHO, 2013] a exposição prolongada a partículas finas tem efeitos na saúde humana (entre os quais: desfechos adversos no nascimento, doenças cardiovasculares e respiratórias, diabetes, além de afetar o neurodesenvolvimento e a função cognitiva).

Nos últimos anos, na sequência de uma legislação mais eficaz em paralelo com o contínuo desenvolvimento tecnológico, tem-se registado uma diminuição das concentrações de

vários poluentes atmosféricos. Entre 2001 e 2010, as emissões de partículas em suspensão (PM) com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 micrómetros (PM<sub>2,5</sub>) e a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) diminuíram 14% na União Europeia. As emissões de precursores de PM também diminuíram na União Europeia (UE): os óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) diminuíram 54%; os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) 26%, o amoníaco (NH<sub>3</sub>) 10% [EEA, 2013]. Porém, estas reduções das emissões nem sempre resultaram em menor exposição humana às PM. O programa Ar Limpo para a Europa (CAFE) da União Europeia (UE) estima um total de 348 000 mortes prematuras por ano, devido à exposição a PM<sub>2.5</sub>, sendo a esperança média de vida reduzida em cerca de um ano [EEA, 2013]. A proporção da população urbana europeia exposta a níveis de concentração de PM<sub>10</sub> acima dos valores estabelecidos pela legislação comunitária permanece elevada. A Figura 1.1 mostra a percentagem de população urbana da UE exposta a níveis de poluentes superiores aos valores de referência da OMS. Pode observar-se um ligeiro decréscimo da exposição a poluentes como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e o dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), embora os níveis de exposição persistam elevados. Porém, os níveis de exposição a Ozono (O<sub>3</sub>) e a PM têm permanecido elevados ao longo dos últimos anos, sendo estes apontados como os poluentes mais críticos na maioria das áreas urbanas.

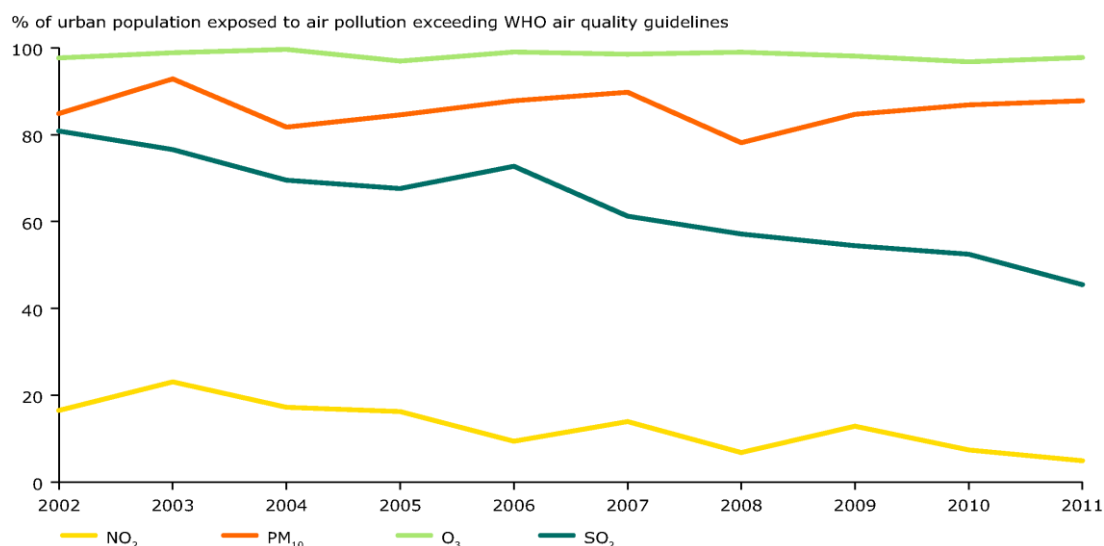


Figura 1.1 - Percentagem da população urbana da União Europeia (UE) exposta a níveis de concentração de poluentes superiores aos padrões de qualidade do ar da UE [EEA, 2013].

Nas cidades, a exposição a poluentes relacionados com o tráfego automóvel é particularmente relevante. Segundo o relatório anual de 2012 do Sistema de Relatórios sobre Transportes e Ambiente (TERM) [EEA,2012], as normas EURO aplicáveis aos veículos automóveis não conseguiram baixar as emissões reais de NO<sub>2</sub> para os níveis fixados na legislação. Este relatório refere também que pessoas residentes próximo de estradas movimentadas, na Europa, continuam a estar particularmente expostas a níveis excessivos de poluição atmosférica. Em 2010, 44% das estações de tráfego de qualidade do ar registaram níveis de NO<sub>2</sub> superiores aos limites legais, e os níveis de partículas (PM<sub>10</sub>) ultrapassaram os limites em 33% dessas estações [EEA, 2013]. (Estes poluentes podem afetar o sistema cardiovascular, os pulmões, o fígado, o baço e o sangue).

O número de pessoas expostas à poluição atmosférica é maior nas zonas urbanas, devido à maior densidade populacional. Alguns grupos são mais vulneráveis, incluindo os que



---

sofrem de doenças cardiovasculares e respiratórias, os que sofrem de doenças e alergias das vias respiratórias, os idosos e as crianças de tenra idade.

A definição de estratégias de redução da exposição populacional à poluição atmosférica implica conhecer a concentração dos poluentes, reconhecer as respetivas fontes e monitorizar a qualidade do ar.

A Diretiva-Quadro 2008/50/EC identifica como ferramentas de apoio à gestão e avaliação da qualidade do ar: os inventários de emissões, a monitorização da qualidade do ar e a modelação da qualidade do ar.

Um inventário de emissões é uma listagem das quantidades de poluentes lançados na atmosfera por diversas fontes emissoras, numa dada área e num determinado intervalo de tempo, por todas as fontes aí localizadas. Exige-se a um inventário que seja completo (todas as fontes para cada poluente), comparável (para outros anos e com outros inventários), consistente (homogeneidade no tratamento) e transparente (deve permitir a verificação). Os inventários constituem um importante elemento na gestão da qualidade do ar, sendo frequentemente utilizados para avaliar a eficácia de políticas, em estudos de impacto ambiental e em estudos sobre poluição transfronteiriça [Buitjes *et al.*, 2006]. Devem ainda permitir fornecer dados de entrada para modelos de qualidade do ar.

As redes de monitorização da qualidade do ar são constituídas por estações de monitorização, cujo principal objetivo consiste na disponibilização de dados de qualidade do ar. Permitem avaliar a qualidade do ar através da medição direta de diversos poluentes no ar ambiente, tendo em vista a tomada de decisão para a gestão e melhoria do ar ambiente. As estações numa rede de monitorização da qualidade do ar, instaladas em diferentes tipos de zonas - rurais, suburbanas e urbanas - apresentam tipologias distintas, dependentes das emissões dos poluentes dominantes nas zonas onde se encontram instaladas, sendo classificadas como estações de tráfego, de fundo e industriais, representando, assim, diferentes tipos de exposição da população à poluição atmosférica. É importante uma adequada localização das estações de medição de qualidade do ar que assegure medições efetivamente representativas da exposição da população aos poluentes atmosféricos e, conseqüentemente, permitir identificar e comunicar as situações de excedência aos valores-limite estabelecidos, nomeadamente aos limiares de informação e de alerta.

Nas cidades, as estações urbanas e sub-urbanas podem dividir-se em:

- Estações de tráfego - situam-se na proximidade de vias de tráfego intenso e permitem avaliar o risco máximo de exposição da população às emissões do tráfego automóvel. Esta exposição é, regra geral, de curta duração mas os níveis de poluição observados são normalmente elevados;
- Estações de fundo - não se encontram sob a influência direta de vias de tráfego ou de qualquer fonte próxima de poluição. Permitem conhecer a exposição média da população aos fenómenos de poluição de fundo;
- Estações industriais - encontram-se situadas na proximidade de zonas industriais. Permitem conhecer as concentrações máximas de certos poluentes de origem industrial aos quais a população pode estar pontualmente exposta.

As redes de monitorização são complementadas através da modelação que, além de permitir estimar as concentrações de poluentes, também permite prever o efeito de uma

---

nova fonte emissora, bem como avaliar os impactos de diferentes estratégias de controlo de emissões. Assenta na simulação de processos naturais e processos resultantes de atividades antropogénicas permitindo compreender quais os seus efeitos no ambiente e atuar sobre os mesmos. É neste contexto que a modelação de qualidade do ar emerge como a abordagem fundamental para avaliar a exposição de uma população à poluição atmosférica numa determinada cidade. Para além da possibilidade de obter uma estimativa coerente dos valores de concentração dos poluentes atmosféricos, permite ainda a identificação de áreas críticas [Ferreira, 2007].

Nas últimas décadas, o estudo dos impactos da estrutura urbana na qualidade de vida e no ambiente tornou-se uma questão chave para a sustentabilidade urbana. Um grande interesse baseia-se na compreensão do papel do planeamento nos padrões de mobilidade e posteriormente, na qualidade do ar, particularmente relacionadas com o uso crescente de carros privados [Borrego *et al*, 2010]. Em Portugal, o tráfego nas áreas urbanas é um motivo de preocupação, pelo que, políticas do transporte devem ser urgentemente consideradas [Borrego *et al.*, 2003].

O objetivo principal deste trabalho consiste em estimar a exposição da população da cidade de Aveiro à poluição atmosférica, no ano 2012, recorrendo à modelação da qualidade do ar.

Como já referido, os níveis de qualidade do ar em áreas urbanas, são preocupantes na maioria das cidades da União Europeia. Neste sentido, seria interessante conhecer como se encontram os níveis de qualidade do ar na cidade de Aveiro e qual a exposição da população aos poluentes atmosféricos. Para conseguir avaliar a exposição da população aveirense à poluição atmosférica é importante compreender a relação entre os padrões de atividade dos indivíduos e os níveis de qualidade do ar e, em função dessa análise, elaborar uma estimativa de cálculo da exposição.

O trabalho desenvolvido é apresentado ao longo de seis capítulos. O presente capítulo tem como propósito fazer um enquadramento geral do tema, uma descrição sumária do panorama europeu relativamente à exposição a poluentes atmosféricos, uma breve abordagem à modelação da qualidade do ar a ainda apresentação do objetivo deste estudo.

O capítulo 2 consiste numa revisão do estado da arte sobre a relação qualidade do ar / saúde humana. Baseia-se numa coletânea de informação bibliográfica a fim de clarificar o conceito de exposição humana a poluentes atmosféricos, os tipos de exposição, a origem, fontes e os principais efeitos desses poluentes na saúde. Consta ainda de uma breve referência aos instrumentos legais comunitários e nacionais relativos à qualidade do ar ambiente.

O capítulo 3 é dedicado à modelação da qualidade do ar, apresentando-se e caracterizando-se o modelo selecionado, o AUSTAL2000.

O caso de estudo é apresentado no capítulo 4. Caracteriza-se a cidade de Aveiro com base nos dados necessários à modelação: localização geográfica, clima, relevo, meteorologia, padrões de atividade populacionais, entre outros.

O capítulo 5 incide na aplicação do modelo AUSTAL2000 para simular a qualidade do ar, para o ano 2012. Inclui a comparação dos resultados com as medições disponíveis na

---

estação de monitorização urbana de tráfego existente na cidade de Aveiro. São ainda apresentados os resultados da simulação do modelo de qualidade do ar e tratamento desses mesmos resultados.

O capítulo 6 é dedicado ao cálculo da exposição populacional aos poluentes atmosféricos selecionados para o caso de estudo. Por fim, no capítulo 7, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho.

---

## 2. QUALIDADE DO AR E SAÚDE HUMANA

«Apenas consigo imaginar o quanto a grandiosidade do ambiente está a diminuir devido à poluição, sobretudo devido à poluição atmosférica».

Stephen Mynhardt, Irlanda ImaginAir

O ar é um recurso natural que, não sendo escasso (porque a quantidade de ar na atmosfera não se reduz), tem-se tornado escasso em qualidade. É importante perceber como são lançados os poluentes para a atmosfera (emissões), como são transportados e interagem, qual a qualidade no ar que inspiramos e que consequências tem na saúde (exposição e dose).

Os efeitos da poluição atmosférica na saúde são o resultado de uma cadeia de eventos, esquematizado na Figura 2.1, que incluem a emissão de poluentes, o transporte desses poluentes na atmosfera, a dispersão e a transformação até ao contacto por um ou vários órgãos do corpo humano.

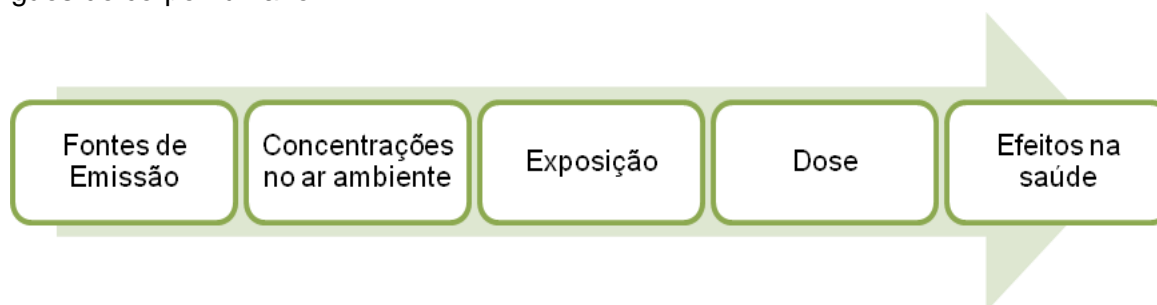


Figura 2.1 - Cadeia de eventos associados à poluição atmosférica, da emissão de poluentes aos efeitos na saúde [Borrego *et al.*, 2008]

Para avaliar os riscos da exposição da população à poluição do ar, é fundamental conhecer, em primeira instância, a origem, as características e os efeitos dos poluentes atmosféricos.

### 2.1 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Nem todas as substâncias presentes no ar são consideradas poluentes. Em geral, entende-se por poluição atmosférica a existência de certos poluentes na atmosfera, em níveis que afetam negativamente a saúde humana, o ambiente e o património cultural (edifícios, monumentos e materiais). No contexto da legislação, apenas é considerada a poluição causada por fontes antropogénicas, embora esta possa ter uma definição mais ampla noutros contextos.

É vasta a gama de fontes responsáveis pela libertação de poluentes para a atmosfera, desde indústria, transportes, agricultura, gestão de resíduos a habitações. O contributo das atividades humanas para a formação de poluentes atmosféricos é geralmente mais fácil de medir e controlar do que o das fontes naturais. A Figura 2.2 demonstra como este contributo antropogénico é muito variável e depende do poluente em causa.



Figura 2.2 - Fontes de poluentes atmosféricos na Europa [EEA, 2013].

- 1 Cerca de 90% das emissões de  $\text{NH}_3$  e 80% das emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) resultam de atividades agrícolas.
- 2 Cerca de 60% de  $\text{SO}_x$  resultam da produção e distribuição de energia.
- 3 Muitos fenómenos naturais, nomeadamente as erupções vulcânicas e as tempestades de areia, libertam poluentes na atmosfera.
- 4 Os resíduos (aterros sanitários), a extração mineira de carvão e o carvão e o transporte de gás a longa distância são fontes de  $\text{CH}_4$ .
- 5 Mais de 40% das emissões de  $\text{NO}_x$  são resultado dos transportes rodoviários.
- 6 A combustão de combustíveis, desde os transportes rodoviários à produção e utilização de energia, passando pelas habitações, é responsável por uma parte muito significativa da poluição atmosférica. As empresas, os edifícios públicos e as habitações contribuem para cerca de metade das emissões de  $\text{PM}_{2,5}$  e Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ).

Os poluentes atmosféricos encontram-se na atmosfera em fase gasosa ou em fase particulada. Podem ser classificados como poluentes primários, quando emitidos diretamente para a atmosfera por uma fonte emissora natural ou antropogénica, ou como poluentes secundários, resultantes da transformação dos poluentes primários através de reações químicas dependentes das condições meteorológicas e/ou da presença de radiação solar.

As PM, o ozono ( $\text{O}_3$ ), e, em menor escala, o  $\text{NO}_2$ , foram sendo identificados ao longo dos anos, tanto pela EEA como pela OMS, como poluentes problemáticos devido aos seus níveis elevados e aos seus potenciais efeitos na saúde humana.

O material particulado (PM) é o termo geral usado para uma mistura de partículas (sólidas e líquidas) suspensas no ar, com uma vasta gama e composição química.  $\text{PM}_{2,5}$  refere-se a “partículas finas” com um diâmetro de  $2,5 \mu\text{m}$  ou menos.  $\text{PM}_{10}$  inclui as “partículas grosseiras” com um diâmetro de  $10 \mu\text{m}$  ou menos. Partículas, também conhecidas coletivamente como aerossóis, podem ainda ser classificadas como partículas primárias ou

secundárias. Partículas primárias entram diretamente na atmosfera (por exemplo, a partir chaminés) enquanto as partículas secundárias são formadas na atmosfera a partir da oxidação e transformação de emissões gasosas primárias. Estas emissões gasosas que contribuem para a formação de partículas são também conhecidas como gases precursores. Os gases precursores mais importantes para partículas secundárias são  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  e COVs.

A determinação da dimensão das partículas tem particular importância pois permite identificar os processos químicos e as fontes que lhe dão origem, bem como aferir o seu grau de influência na saúde e no clima [Ferreira, 2007]. A dimensão das partículas baseia-se no diâmetro aerodinâmico, devido às formas irregulares que algumas apresentam, variando de poucos nanómetros até centenas de nanómetros.

Dada a importância do tamanho das partículas na determinação da exposição humana e dose, existem outras classificações para os compostos particulados de acordo com o processo de amostragem e análise ou com o local onde se depositam no corpo humano. Do primeiro tipo de classificação são exemplos os termos “material particulado em suspensão”, “material particulado total”, “fumo negro”. Por outro lado, se as partículas entram no corpo humano, passando apenas a parte superior do aparelho respiratório (nariz e boca), são consideradas “partículas inaláveis”, no caso de se depositarem na parte inferior, denominam-se “partículas torácicas” e se chegarem penetrarem à região de troca de gases no pulmão são “partículas respiráveis” [Ferreira, 2007].

Tal como ilustra a Figura 2.3, as PM podem resultar de fontes naturais ou de fontes antropogénicas.

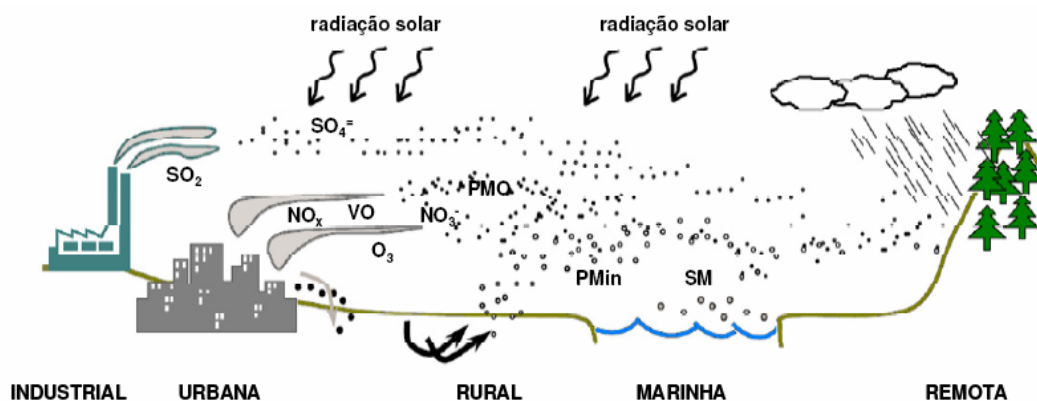


Figura 2.3 - Fontes de emissão de partículas [Ferreira, 2007].

As fontes naturais incluem sal marinho, poeiras naturalmente suspensas, pólen, cinzas vulcânicas e a contribuição marinha [EEA, 2012]. Fontes antropogénicas incluem queima de combustível para produção de energia elétrica, incineração, aquecimento doméstico e combustão de veículos. Nas cidades, as fontes locais mais significativas incluem os escapes de automóveis, a resuspensão de poeiras de estrada, e a queima de madeira, combustível para aquecimento doméstico. Estas fontes não são altas (abaixo de 20 metros) levando a maiores impactos sobre os níveis de concentração junto à superfície [EEA, 2013].

Os óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ) são compostos muito reativos, que englobam o óxido de azoto ( $\text{NO}$ ) e o dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ), entre outros. A principal fonte de  $\text{NO}_x$  é de origem

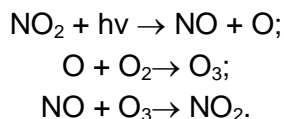
---

antropogénica e encontra-se associada à queima de combustíveis fósseis nos veículos e nos processos industriais. O  $\text{NO}_x$  pode também ter origem em fontes naturais, como descargas elétricas na atmosfera ou transformações microbianas. O  $\text{NO}_2$  é um bom indicador do tráfego rodoviário pois a sua emissão advém fortemente das emissões de combustão nos motores de veículos. Através da sequência de reações fotoquímicas iniciadas pela ativação do  $\text{NO}_2$  induzidas pela radiação solar, os poluentes gerados são uma importante fonte de nitratos, sulfatos e aerossóis orgânicos, que contribuem significativamente para a fração de matéria particulada. Tal fato leva a considerar o  $\text{NO}_2$  como um precursor de uma vasta gama de poluentes secundários [Ferreira, 2007].

Uma pequena parte das emissões de  $\text{NO}_x$  é diretamente emitida como  $\text{NO}_2$ , tipicamente 5-10% para a maioria das fontes de combustão. No entanto, os veículos a gasóleo são uma exceção, emitindo uma maior proporção de  $\text{NO}_2$  (cerca de 70% do seu  $\text{NO}_x$  é  $\text{NO}_2$ ), pois o sistema de pós-tratamento de gases de escape aumenta a sua emissão direta. Há claras informações de que as emissões de  $\text{NO}_2$  pelo tráfego estejam a aumentar de forma significativa, devido ao aumento da circulação de veículos a gasóleo, especialmente os veículos mais recentes (EURO 4 e 5), o que pode conduzir a grandes excedências dos valores-limite de  $\text{NO}_2$  em zonas urbanas de elevado trânsito rodoviário [EEA, 2013].

O ozono troposférico ( $\text{O}_3$ ) é um poluente secundário que se forma quando as substâncias precursoras, designadamente  $\text{NO}_x$  e os compostos orgânicos voláteis (COVs), conjuntamente com o oxigénio ( $\text{O}_2$ ) reagem sob a ação da luz solar.

Usualmente, o ozono forma-se pela fotólise do dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) que conduz à reação do monóxido de azoto (NO) com o ozono ( $\text{O}_3$ ), como indicam as reações seguintes:



A remoção/formação de ozono ocorre por situações distintas. A remoção de ozono encontra-se essencialmente associada à reação do ozono com o NO durante a noite e/ou durante o Inverno devido às taxas nulas ou baixas de foto-dissociação, ou ainda dada a proximidade de grandes fontes pontuais que emitem elevadas concentrações de NO para a atmosfera. Por sua vez, a formação de ozono relaciona-se com a química diurna  $\text{NO}_x$ -COV-CO, em que reações sequenciais resultam na conversão de NO a  $\text{NO}_2$  (através de processos que não incluem a destruição de ozono); seguidamente, o  $\text{NO}_2$  sofre foto-dissociação, resultando em  $\text{O}_3$  adicional. Estas sequências são normalmente iniciadas por reações dos hidrocarbonetos com o radical hidroxilo (OH). Em resultado das duas situações supracitadas, junto das fontes de emissão de óxidos, como por exemplo nos grandes centros urbanos, a concentração de ozono é frequentemente baixa, sendo elevada em áreas periféricas suburbanas e rurais dado que o ozono, e alguns dos seus precursores, são transportados através de longas distâncias na atmosfera. Dois principais fatores que condicionam a concentração de ozono no ar ambiente são a radiação solar e a estabilidade atmosférica. Devido a estes, as concentrações de ozono flutuam ao longo do dia e do ano, apresentando concentrações mais elevadas no Verão e durante a tarde, altura em que ocorre habitualmente uma maior radiação solar, a temperatura do ar é elevada e existe uma maior instabilidade atmosférica, o que proporciona uma menor dispersão dos poluentes e aumenta a probabilidade de estes reagirem entre si.

---

## 2.2 EXPOSIÇÃO HUMANA A POLUENTES ATMOSFÉRICOS.

A exposição humana é o elo de ligação entre o ambiente que nos rodeia e a saúde humana (Figura 2.6). Para uma percepção realista dos riscos para a saúde humana e para a implementação de estratégias de controlo, é imprescindível uma estimativa precisa da exposição humana a contaminantes ambientais [Ferreira, 2007].

Exposição humana define-se como o tempo que um indivíduo está exposto a uma determinada concentração de um determinado poluente. Existem três aspetos subjacentes a este conceito: a magnitude da exposição (relativa à concentração do poluente em estudo), a duração da exposição (tempo em que o indivíduo está exposto a essa concentração) e a frequência com que esse tipo de exposição ocorre. A figura 2.4 representa os fatores que interagem na exposição humana aos poluentes atmosféricos.



Figura 2.4 - Definição de exposição como sendo a interação entre a concentração de poluentes de uma área e a população dessa área [OMS, 1999]

É importante distinguir concentração e exposição. Concentração é uma característica física do ambiente num dado local e tempo, enquanto exposição descreve a interação entre o ambiente e um ser vivo. Para haver exposição é necessário que a concentração de um poluente num dado local seja não nula e que, simultaneamente, um indivíduo esteja presente nesse local [Sexton e Ryan, 1988].

A exposição relaciona-se apenas com os níveis de poluentes no ambiente, não incluindo necessariamente a inalação ou ingestão dos mesmos. No entanto, a partir do momento em que o poluente atravessa uma fronteira física (pele, células epiteliais) é usado o conceito de dose. Dose é a quantidade de material absorvido ou depositado no corpo durante um dado intervalo de tempo e medido em unidades de massa [Monn, 2001].

São vários os fatores a considerar no cálculo da exposição humana. Uma dada população, consoante a faixa etária, o tipo de atividade que exerce, o local onde vive, tem padrões de atividade diários distintos. Além disso, a qualidade do ar varia consoante o poluente atmosférico em estudo. Estas variações na qualidade do ar relacionam-se ainda com a localização das fontes emissoras, sejam elas fontes pontuais (como as grandes fontes industriais), em área (pequenas e médias indústrias) ou fontes em linha, sendo o tráfego uma fonte relevante sobretudo nas grandes cidades.

É fundamental salientar que a população não passa todo o seu tempo exposta ao ambiente exterior. A população em geral, sobretudo a residente em áreas urbanas, passa 80 a 90% do tempo em espaços interiores. As habitações representam neste processo um espaço com influência preponderante, uma vez que podem representar cerca de 70% do



---

tempo passado em espaços interiores, valor que sobe até 95%, para grupos tipicamente mais vulneráveis como crianças e idosos [Borrego, 2012]. A qualidade do ar que respiramos em recintos fechados afeta também a saúde humana [EEA, 2013].

Ao longo de um dia, um indivíduo passa por inúmeros ambientes distintos, vulgarmente designados por microambientes. O interior de uma casa, escritório ou de um automóvel, uma área urbana ou rural, são exemplos de microambientes. O conceito de microambiente pode ser descrito “como um espaço tridimensional onde o nível de poluente atmosférico num dado instante é uniforme ou estatisticamente constante, no espaço [Castro, 2003]. De acordo com o IPCS (2005), a residência o microambiente principal, dado que aproximadamente dois terços do tempo da população são passados em casa. O local de trabalho é o segundo microambiente mais relevante, representando um terço a um quarto do perfil diário. Estudos recentes indicam que alguns poluentes atmosféricos nocivos podem existir em concentrações mais elevadas em recintos fechados do que ao ar livre.

Tal como já mencionado, a concentração de poluentes atmosféricos no exterior resulta de fontes naturais e antropogénicas (como os veículos motorizados e as indústrias). A concentração dos poluentes atmosféricos em espaços interiores depende do tipo de edifício (taxa de ventilação), assim como do tipo de utilização do mesmo e das fontes existentes no interior. A Figura 2.5 ilustra a origem da concentração de poluentes em ambientes interiores.

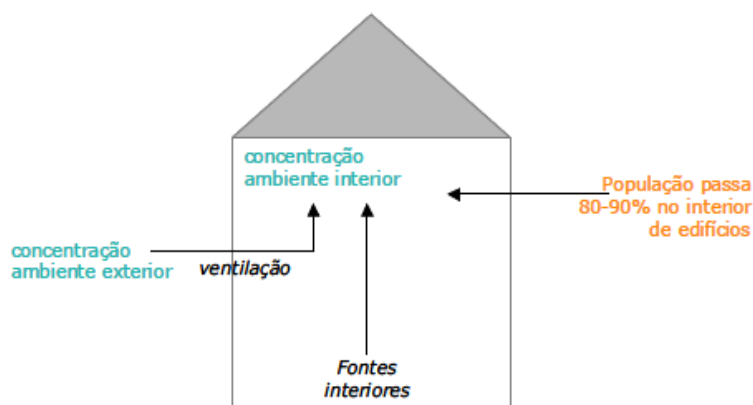


Figura 2.5 - Origem das concentrações de poluentes em ambientes interiores [OMS,1999].

Para alguns poluentes, é possível estabelecer uma relação relativamente simples entre as suas concentrações no interior e no exterior, a partir de dados experimentais, como é o caso das partículas  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ , para as quais normalmente os níveis registados no interior são inferiores às concentrações no ar ambiente [Hertel *et al.*, 2001]. Relativamente ao ozono, os edifícios atuam como filtros ao seu transporte do exterior para o interior pelo que as concentrações no interior são significativamente inferiores aos do exterior [Poupard *et al.*, 2005]. Os níveis interiores de  $NO_2$  são também influenciados pelas concentrações ambientais exteriores e emissões dos processos de combustão a gás no interior. Cerca de 60 ( $\pm 10$ ) % do  $NO_2$  exterior penetra no interior. No entanto, o  $NO_2$  é um gás moderadamente reativo e decai rapidamente no interior, através de reações químicas e de superfície [Ferreira, 2007].

Como demonstra a Figura 2.6, com base nos valores das concentrações no ar ambiente, exterior e interior, e na distribuição da população, em termos de atividade ao longo do dia, é possível a determinação da exposição humana.

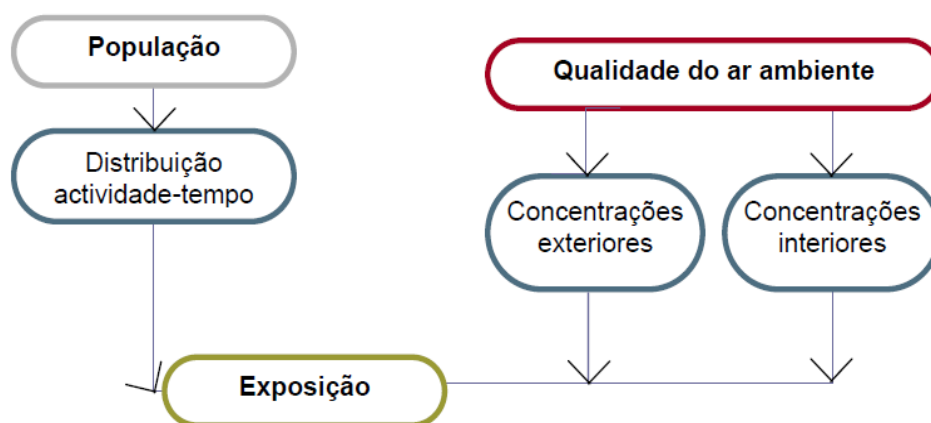


Figura 2.6 – Condicionantes para determinação da exposição humana.

A exposição pode ser determinada por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos referem-se a medições mediante o uso de aparelhos individuais portáteis ou a medições de marcadores biológicos. Nos métodos indiretos a exposição é calculada combinando informação sobre as concentrações de determinado poluente em diferentes locais com a informação sobre o tempo que uma pessoa passa nos microambientes.

Para estimar indiretamente a exposição humana existe a necessidade da definição de microambientes. Com a informação referente a esses espaços relacionam-se os valores de concentração e de densidade populacional, simultaneamente com o perfil ocupação-tempo.

A exposição total de um indivíduo ( $E$ ), para um determinado período de tempo ( $t$ ) num determinado espaço, resulta do integral da concentração do poluente ( $C$ ) ao longo do tempo ( $t$ ):

$$E = \int_{t_2}^{t_1} C(t) dt$$

Para quantificar a exposição total de um indivíduo ao longo de um período de tempo ( $E_t$ ) consideram-se todas as atividades realizadas pelo mesmo, assim como os microambientes ( $j$ ) frequentados nesse período. Após se calcular a exposição em cada microambiente ( $e_j$ ), procede-se ao somatório para se obter a exposição total.

$$E_t = \sum_{j=1}^J e_j = \sum_{j=1}^J C_j t_{ij}$$

Quando se pretende a exposição de uma população total ( $E_{pop}$ ), com um determinado número de indivíduos ( $I$ ) para um determinado período de tempo, soma-se a exposição de cada indivíduo:

$$E_{pop} = \sum_{i=1}^I E_i = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_j t_{ij} = I \sum_{j=1}^J C_j t_j$$

Estes valores permitem ainda estimar a exposição média humana por habitante.

---

## 2.3 PRINCIPAIS EFEITOS NA SAÚDE HUMANA

Os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana têm sido objeto de estudo desde a Revolução Industrial até à atualidade. Os estudos incidiram, inicialmente, na associação entre os efeitos observados no sistema respiratório após a exposição humana a emissões atmosféricas com origem industrial (e em condições meteorológicas que não permitiam a dispersão dos poluentes atmosféricos) e, posteriormente, em estudos relativos à exposição contínua da população à poluição atmosférica, dada a suspeita que esta exposição poderia acarretar consequências adversas para a saúde humana.

Atualmente existe um grande conjunto de evidências sobre os efeitos nefastos da poluição do ar na saúde humana, pois o conhecimento nesta área tem aumentado muito nas últimas décadas. Uma revisão recente da OMS sobre os efeitos da poluição do ar na saúde conclui [WHO, 2013] refere o número considerável de novas evidências científicas sobre os efeitos na saúde de PM, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>. Embora a poluição atmosférica afete todos os indivíduos, nem reagem na mesma medida e da mesma forma. Alguns grupos são mais vulneráveis, incluindo os que sofrem de doenças cardiovasculares e respiratórias, os que sofrem de doença reativa e alergias das vias respiratórias, os idosos e as crianças de tenra idade. Os impactes na saúde podem ser quantificados e expressos em mortalidade e morbidade. Mortalidade reflete a redução da expectativa devida útil devido à exposição à poluição do ar, enquanto morbidade relaciona-se com a ocorrência de doença, variando desde efeitos secundários, tais como tosse, para doenças graves que podem requerer hospitalização.

Os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana estão relacionados com exposição a curto ou a longo prazo. Exposição de curto prazo (exposição a altas concentrações ao longo de algumas horas ou dias) está associada a efeitos agudos, enquanto exposição de longo prazo (exposição a níveis de concentração mais baixos ao longo de meses ou anos) traduz-se em efeitos crónicos na saúde.

Na seguinte lista são elencados os principais efeitos atribuídos à exposição de curto-prazo de longo prazo, respetivamente:

### *Efeitos atribuídos à exposição de curto-prazo:*

- Mortalidade diária,
- Admissões hospitalares respiratórias e cardiovasculares,
- Atendimentos de emergência/urgência respiratórios e cardiovasculares,
- Visitas de cuidados primários no âmbito respiratório e cardiovascular,
- Utilização de medicamentos no âmbito respiratório e cardiovascular,
- Dias de atividade restrita,
- Absentismo no trabalho e escolar,
- Sintomas agudos (sibilância, tosse, produção de fleuma, infeções respiratórias),
- Alterações fisiológicas (ex: função pulmonar).

### *Efeitos atribuídos à exposição de longo-prazo:*

- Mortalidade por doença cardiovascular e respiratória,
- Incidência e prevalência de doenças respiratórias crónicas (asma, alterações patológicas crónicas),
- Alterações crónicas nas funções fisiológicas,

- Cancro pulmonar; Doenças crónicas cardiovasculares,
- Restrição do crescimento intra-uterino (baixo peso ao nascer, retardamento do crescimento intra-uterino, pequenas dimensões para a idade gestacional)

Como já referido, estudos recentes da OMS corroboram a relação entre exposição de longo prazo a  $PM_{2,5}$  e mortes por problemas respiratórios e cardiovasculares, bem como aparecimento de doenças, tais como doenças respiratórias. A exposição a PM, mesmo que em pequenas concentrações, provoca efeitos adversos na saúde [WHO, 2013]. Outros estudos epidemiológicos recentes [EEA,2013] também revelaram uma relação entre mortalidade e exposição a altos níveis de concentração de poluentes atmosféricos, particularmente  $O_3$ . Outros estudos revistos pela OMS [2013] apontam o perigo da exposição de curto e longo prazo a  $NO_2$ , com efeitos na mortalidade e morbidade.

Visto que o objetivo deste trabalho se centra na aplicação de um modelo para estimativa da exposição populacional aos poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_2$  na área urbana da cidade de Aveiro, é pertinente uma análise detalhada aos mesmos. Na tabela 2.1 encontra-se sintetizadas as fontes, processos de formação e efeitos para a saúde humana relacionados com exposição de curta e longa duração dos poluentes urbanos considerados para o caso de estudo.

Tabela 2.1 - Fontes, processos de formação e possíveis efeitos na saúde humana (adaptado do relatório da OMS, 2004) dos poluentes atmosféricos PM e  $NO_x$ .

Poluente	Fontes	Processos	Efeitos na saúde relacionados com exposição de:	
			Curta duração	Longa duração
Partículas (PM)	Antropogénicas	Combustão	Reações inflamatórias do pulmão	Aumento de sintomas respiratórios das vias aéreas "inferiores"
		Processos Industriais	Sintomas respiratórios	
		Condensação de outros poluentes	Efeitos adversos no sistema cardiovascular	Redução da função pulmonar nas crianças e adultos
		Extração de minerais	Aumento de utilização de medicação	
	Naturais	Erosão eólica	Aumento de admissões hospitalares	Aumento da DPOC (Doença Pulmonar Obstrutiva Crónica)
		Polinização	Aumento de mortalidade	Redução da esperança de vida
		Emissões vulcânicas		
$NO_x$	Antropogénicas	Combustão (veículos, indústria, produção de energia)	Efeitos na função pulmonar	Redução da função pulmonar
			Aumento das reações inflamatórias nas vias aéreas	Aumento da probabilidade de sintomas respiratórios
Nota: efeitos para $NO_2$	Naturais	Emissões da vegetação	Aumento de admissões hospitalares	
			Aumento da mortalidade	

Em síntese, os poluentes atmosféricos afetam a saúde humana dependendo da quantidade a que a pessoa está exposta, duração da frequência da exposição, nível tóxico do poluente, saúde global da pessoa e nível de resistência ou suscetibilidade. A população pode dividir-se em dois grupos de acordo com a sensibilidade/suscetibilidade à poluição/degradação do

---

ar: um grupo de risco que inclui as crianças, os idosos e indivíduos doentes e a restante população pertencendo a um grupo menos suscetível.

## **2.4 LEGISLAÇÃO DE QUALIDADE DO AR**

A quantidade de poluentes emitidos para o ar tem sido substancialmente reduzido desde que na década de 70 a UE introduziu políticas e medidas relacionadas com a qualidade do ar. As emissões de poluentes atmosféricos provenientes de muitas das principais fontes, nas quais se incluem os transportes, a indústria e a geração de energia elétrica, encontram-se hoje reguladas e estão, de um modo geral, a decrescer, embora nem sempre ao ritmo previsto.

Inicialmente, a Diretiva-Quadro 96/62/CE exigia que os Estados-Membros elaborem planos de ação pormenorizados para as zonas e aglomerações em que sejam ultrapassados os valores limite. Os valores limite ou alvo foram fixados em diretivas filhas relativas a: SO<sub>2</sub>, partículas, CO, benzeno, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, chumbo, ozono troposférico e metais pesados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH). Na Figura 2.10 é apresentado a evolução da legislação referente à avaliação e gestão do ar ambiente na EU e em Portugal.

Esta Diretiva foi transposta para direito nacional pelo Decreto de Lei nº276/99, de 23 de Julho, que estabelece as linhas de orientação da política nacional da gestão da qualidade do ar ambiente, as exigências relativas à monitorização e previsão da concentração de certos poluentes, bem como os planos de ação que devem ser concebidos para melhorar a qualidade do ar a curto e longo prazo.

A Diretiva Quadro, e respetivas Diretivas Filhas, foram revogadas, entrando em vigor a Diretiva 2008/50/EC, que regula as concentrações no ar ambiente dos poluentes dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), matéria particulada (PM10 e PM2,5), benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), monóxido de carbono (CO) e ozono (O<sub>3</sub>). Esta diretiva define os princípios básicos da estratégia da UE (CAFE – Clean air for Europe) relativamente à qualidade do ar, visando harmonizar os procedimentos de avaliação, previsão e informação ao público e assim preservar/melhorar a qualidade do ar ambiente.

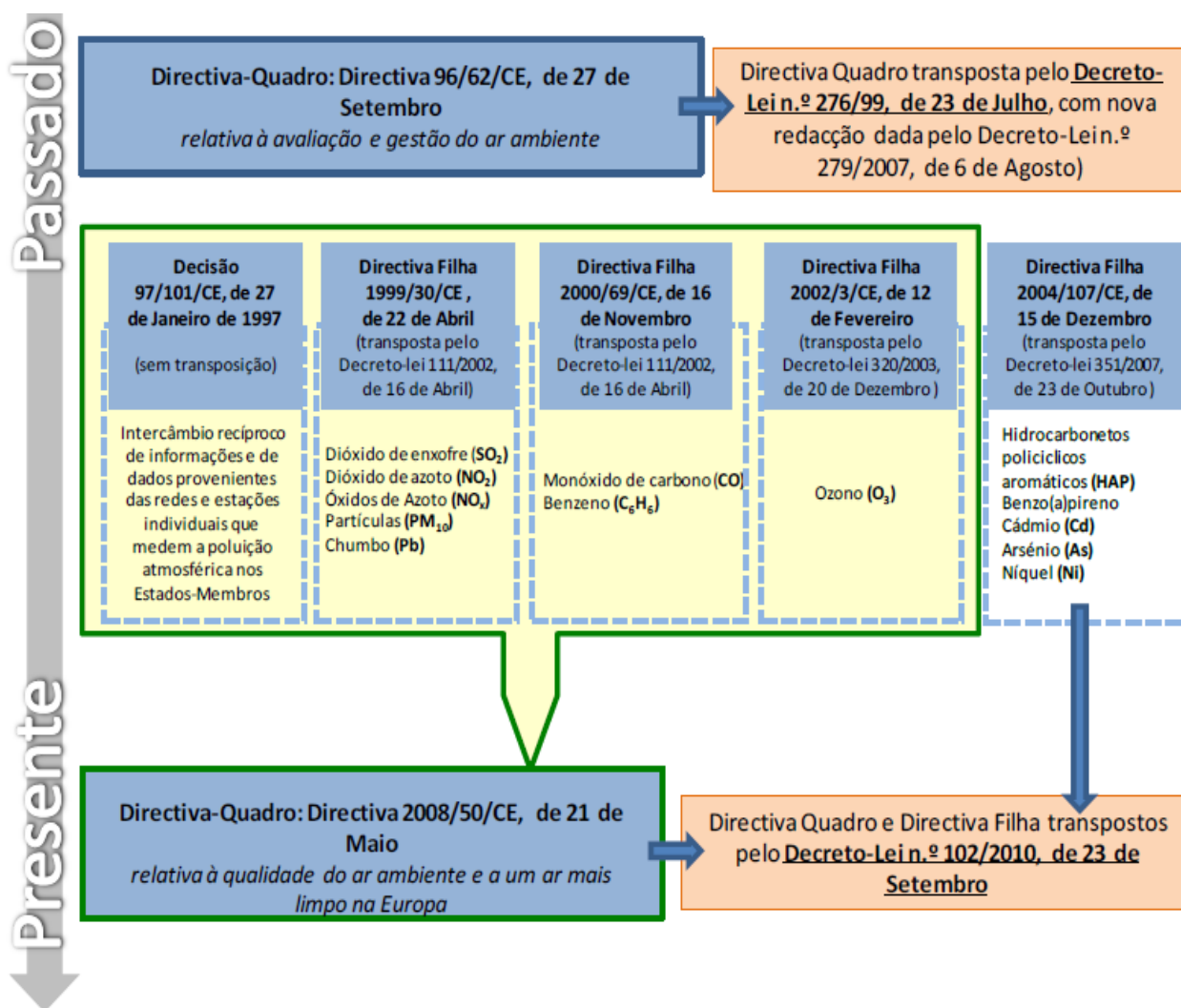


Figura 2.7 - Enquadramento legislativo da avaliação e gestão do ar ambiente na União Europeia e em Portugal

À semelhança das Diretivas anteriores, estabelece objetivos de qualidade do ar, de acordo com parâmetros:

- Valor – Limite (VL): nível fixado com base em conhecimentos científicos com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e no ambiente na sua globalidade, a atingir num prazo determinado e que, quando atingido, não deve ser excedido;
- Valor – Alvo (VA): nível fixado com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e no ambiente na sua globalidade, a atingir, na medida do possível, num prazo determinado.

Relativamente à qualidade do ar interior, a atual legislação encontra-se definida pelo Decreto-Lei n.º 118/2013 que, associado à certificação energética e da qualidade do ar interior de edifícios, fixa concentrações máximas de referência e metodologias para as medições. Este documento visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios e Habitações (REH), e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

---

### 3. MODELAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

A avaliação da qualidade do ar começou por se basear em dados de monitorização, já que estes eram considerados como o mais próximo possível da realidade. Todavia, devido aos custos elevados de investimento e operação envolvidos, os dados de monitorização recolhidos são limitados geograficamente, não permitindo uma visão ampla da qualidade do ar [Monteiro, 2007]. Os modelos de qualidade do ar, além de constituírem ferramentas de diagnóstico, permitem estimar efeitos das emissões e da meteorologia nas concentrações de poluentes, contribuindo para a definição de planos que controlem possíveis episódios de poluição do ar e para a definição de estratégias de intervenção [Borrego, 2000].

A modelação da qualidade do ar tornou-se uma abordagem fundamental e necessária na avaliação da exposição, uma vez que fornece um meio eficiente e económico para estimar a exposição dos indivíduos e das populações para uma variedade de escalas espaciais e temporais.

O desenvolvimento de modelos determinísticos para avaliação da exposição a poluentes atmosféricos nas cidades foi identificado como uma área prioritária de investigação futura [Ferreira, 2007]. Os modelos determinísticos de qualidade do ar são baseados fundamentalmente na descrição matemática dos processos físicos e químicos de dispersão e transformação dos poluentes. Considerando as emissões, advecção e turbulência calcula-se a transformação e deposição química. Este tipo de modelos é capaz de fornecer uma descrição das relações causa-efeito [Dabberdt *et al.*, 2004].

#### 3.1 MODELOS DE QUALIDADE DO AR

Os modelos de qualidade do ar, que descrevem a dispersão e transporte de poluentes atmosféricos podem ser classificados atendendo: à escala espacial (microescala/local, urbana, mesoscala/regional e global), à escala temporal (episódios de curto ou longo prazo), consoante as equações de transporte subjacentes (gaussiano, euleriano e lagrangeano) e em função dos processos decorrentes na atmosfera (químicos, fotoquímicos, deposição seca e húmida). Dependendo dos objetivos, é importante escolher um modelo adequado de entre a diversidade considerável das ferramentas disponíveis, levando em conta as simplificações e pressupostos do modelo [Borrego *et al.*, 2001].

A modelação começou a ser aplicada à escala local com o intuito de avaliar o impacto de fontes emissoras individuais, ou de pequenos grupos de fontes, a distâncias até algumas dezenas de quilómetros [Monteiro, 2007]. Nesta escala ocorrem os fenómenos de turbulência onde a força de atrito se torna primordial, sendo o movimento atmosférico influenciado por obstáculos e pela rugosidade da superfície. À escala regional o transporte e a transformação dos poluentes atmosféricos são fortemente determinados pelas condições atmosféricas, que, a esta escala, englobam os fenómenos meteorológicos de mesoscala e sinóticos. As brisas costeiras são um dos fenómenos associados a esta escala, as quais se têm demonstrado preponderantes nos padrões de dispersão de poluentes junto à costa, inclusive em Portugal [Monteiro, 2003]. A escala global abrange todo o globo terrestre. Os processos dinâmicos controlam a físico-química da atmosfera, em que as forças atuantes mais significativas são as forças de Coriolis e os gradientes de pressão.

---

Além das escalas de aplicação, os modelos de Qualidade do ar são também categorizados por tipo: Gaussiano, Lagrangeano e Euleriano. O modelo gaussiano assume que as concentrações de uma fonte que emite continuamente são proporcionais à taxa de emissão, inversamente proporcionais à velocidade do vento, e que a média do tempo das concentrações de poluentes na horizontal e na vertical, são bem descritas pela distribuição gaussiana. Os modelos gaussianos são mais adequados para o cálculo da concentração média anual numa região urbana do que para o cálculo das concentrações médias horárias. Os modelos ADMS-Urban [Righi *et al.*, 2009] e o modelo AERMOD [3] são exemplos de modelos gaussianos de dispersão de poluentes na atmosfera.

As abordagens euleriana e lagrangeana são fisicamente mais realistas, mas numericamente complexas e computacionalmente mais caras [Seinfeld e Pandis, 2006]. Os modelos euleriano e lagrangeano simulam o transporte atmosférico e a mistura de poluentes atmosféricos a várias escalas [Borrego *et al.*, 2006]. Num modelo euleriano, as espécies químicas são transportadas numa estrutura fixa de referência, normalmente a superfície da Terra, o que permite uma representação mais fácil dos processos de produção e transformação de poluentes. O domínio do espaço (área geográfica ou o volume de ar) é dividido em pequenas parcelas (bidimensionais) ou volumes, ou seja, células de grelha (tridimensionais). Os modelos eulerianos utilizam termos numéricos para resolver a equação de difusão atmosférica (ou seja, a equação de conservação de massa do poluente) [Seinfeld e Pandis, 2006]. A solução numérica do termo de transporte no modelo euleriano torna-se mais difícil e requer recursos computacionais bastante concisos em comparação com a abordagem lagrangiana. Os modelos eulerianos são mais vantajosos por terem bem definido as três formulações dimensionais necessárias para os problemas de poluição do ar a escalas regionais mais complexas. Exemplo de modelos deste tipo são o TAPM [Hurley *et al.*, 2008], CAM<sub>x</sub> [Tesche, 2006] e o modelo CHIMERE [Bessagnet *et al.*, 2004].

O modelo lagrangeano descreve o movimento das massas de ar ou de partículas do fluido que se movem seguindo a trajetória do campo do vento médio. A aproximação lagrangeana tem como base o princípio de que a distribuição das concentrações é determinada pela contagem de partículas em volumes de cálculo específicos, sendo expressas como valores médios ao longo desses mesmos elementos de volume e para dados intervalos de tempo. Cada "partícula" representa uma massa específica, de um ou vários poluentes emitidos a partir de uma dada fonte. É tido em consideração o transporte causado tanto pela média do vento como pelas condições de turbulência devido a flutuações de vento. As trajetórias dependentes do tempo são calculadas através de equações diferenciais estocásticas (equações de Langevin), que visam a descrever as propriedades de turbulência [DeGrazia, 2005]. Estes modelos começam a ser utilizados para fins de regulamentação em alguns países europeus, tal como o modelo AUSTAL2000 na Alemanha.

### **3.2 SELEÇÃO DO MODELO PARA APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO**

A escolha do modelo de qualidade do ar a aplicar a um dado estudo prende-se essencialmente com o tipo de aplicação pretendida. É importante ter em conta se as formulações físicas e químicas do modelo contemplam as espécies químicas objeto da simulação requerida. Contudo, a complexidade de um modelo dita a eficiência temporal e computacional do seu desempenho. No processo de escolha há que estabelecer um compromisso entre a facilidade de aquisição e implementação, a exigência de grande



volume de dados de entrada e de capacidade computacional, e as características, formulação, potencialidades e tempo de simulação de um modelo, no processo de escolha [Ferreira, 2007].

Foi efetuada uma pesquisa e recolha de dados de modelos de Qualidade do ar passíveis de aplicação a áreas urbanas. Identificaram-se os modelos TAPM, AUSTAL2000 e ENVI-met que foram analisados no sentido de selecionar o modelo a aplicar à cidade de Aveiro Os principais dados recolhidos encontram-se sintetizados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo das características dos modelos urbanos de qualidade do ar.

Modelo	Descrição Sumária	Dados		Escala	Resolução Horizontal	Fontes
		Entrada	Saída			
<b>TAPM</b>	Simulação de transporte e dispersão de poluentes atmosféricos. Módulo de prognóstico para meteorologia e módulo de dispersão para poluentes	Topografia, uso do solo, emissões, fontes	campos 3D de ventos e concentração/deposição dos poluentes, Temperatura, etc.	local urbana regional	Tipicamente 1500 x 1500 km	Antropogénica, biogénica, pontuais, em linha e em área
<b>AUSTAL2000</b>	Modelo lagrangeano que permite estudar dispersão de poluentes e diversas situações	Fontes, dados meteo, CLA, séries temporais concentrações horarias	Distribuição espaço temporal dos poluentes modelados. Média anual de concentração, excedências, etc.	local urbana	Tipicamente 1500 x 200 m	Pontuais, em linha, em área e em volume
<b>ENVI-met</b>	Modelo de prognóstico baseado na dinâmica de fluidos computacional 3D (CDF) para simular o microclima urbano	Área, dados meteo, condições fronteira	Comportamento da atmosfera, perfis verticais de temperatura e velocidade do vento, dados meteo.	local urbana	dimensões x e y variáveis	Antropogénica, biogénica, pontuais, em linha e em área

Após análise da informação, o AUSTAL2000 foi o modelo selecionado para simular a dispersão da poluição atmosférica no caso de estudo. Além do registo de bom desempenho deste modelo em estudos de modelação de qualidade do ar, o AUSTAL2000 apresentou uma complexidade inferior nos dados de entrada e encontra-se disponível gratuitamente. Apesar dos requisitos computacionais elevados do modelo, a sua aplicabilidade para simular a dispersão da poluição do ar em áreas com topografia complexa, bem como o rápido processamento dos dados de entrada (por exemplo, edifícios e fontes de emissão), foram decisivos para a escolha deste modelo na prossecução dos objetivos definidos na presente pesquisa.

---

### 3.3 O MODELO AUSTAL2000

O AUSTAL2000 é um modelo lagrangeano de dispersão atmosférica, desenvolvido pela *German Environmental Protection Agency*, com capacidade para considerar os efeitos dos edifícios, topografia complexa, deposição de poluentes e reações químicas de primeira ordem. Estas características tornam-no adequado para a simulação de poluentes atmosféricos provenientes de fontes industriais e do tráfego urbano desde a escala urbana/local até à micro-escala.

É o modelo regulamentar na Alemanha, tendo sido desenvolvido de acordo com os requisitos das normas VDI 3945/3:2011 e TA Luft (2002). Este modelo encontra-se disponível ao público [4], existindo também versões comerciais que incluem uma interface gráfica amigável.

Como modelo lagrangeano, o AUSTAL2000 baseia-se no princípio de que a distribuição das concentrações é determinada através da contagem de partículas em volumes de cálculo específicos e são apresentadas como valores médios ao longo desses elementos de volume e para determinados intervalos de tempo [Castro, 2011; Nielinger, 2006], como representado na Figura 3.1. O sistema de referência lagrangeano segue o movimento médio da atmosfera.

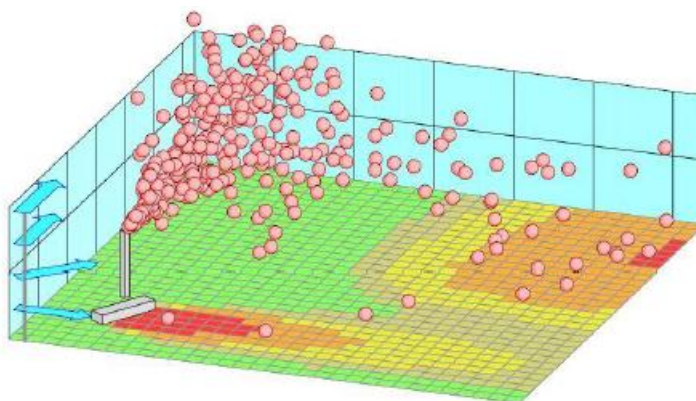


Figura 3.1 - Princípio do modelo lagrangeano de partículas [Janicke, 2008]

A dispersão atmosférica de um dado poluente é dada pela seguinte equação:

$$c(r, t) = \iint_{-\infty}^t p(r, t | r', t') S(r', t') dr' dt'$$

O domínio de simulação é integrado na totalidade, e o termo  $c(r, t)$  representa a concentração média no espaço  $r$  para o tempo  $t$ ;  $S(r', t')$  é o termo fonte; e o termo  $p(r, t | r', t')$  é a função densidade de probabilidade de uma parcela de ar que se move de  $r'$  no tempo  $t'$  para  $r$  no tempo  $t$  [Castro, 2011].

O AUSTAL2000 permite simular a dispersão de poluentes provenientes de vários tipos de fontes, nomeadamente fontes pontuais, em área ou em volume, recorrendo a cálculos baseados em séries temporais, sequências horárias de dados de meteorologia, cálculo das

concentrações e deposição seca, sedimentação gravítica das partículas grosseiras, terrenos de topografia simples e complexa, campos de vento tridimensionais em terrenos complexos, escoamento em torno dos edifícios, definição automática de grelhas de cálculo em camadas (nesting) para cálculos com edifícios, e estimativa automática do erro [Graff, 2002].

A estrutura do modelo AUSTAL2000 encontra-se resumida na figura 3.2. Assenta em cinco ficheiros/módulos principais, dois referentes a informação de entrada, um de criação de ficheiros com resultados e dois de processamento e cálculo.

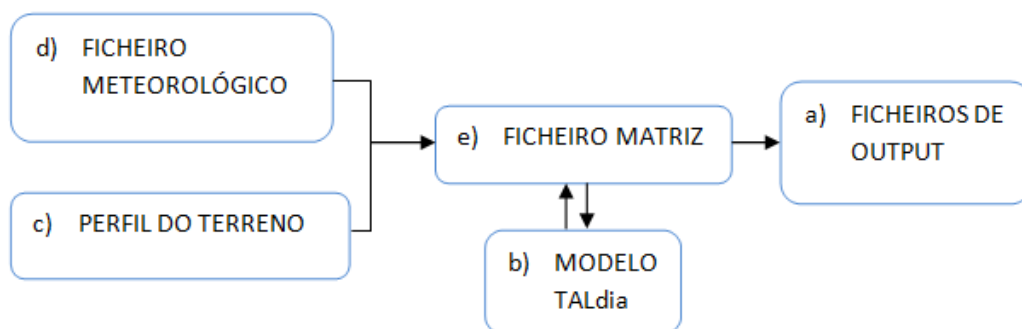


Figura 3.2 - Esquema síntese dos dados de entrada do AUSTAL2000.

O ficheiro matriz é o ficheiro base do modelo. Neste ficheiro são especificadas as opções de modelação, nomeadamente os poluentes, o fator de emissão, o tipo de grelha, localização e características da fonte, entre outros. Cada variável é identificada por uma designação específica, por exemplo *ha* refere-se à altura do anemómetro e *z0* à rugosidade média do terreno. Neste ficheiro são indicados os diretórios para os ficheiros de meteorologia e terreno, no caso de ser considerado terreno complexo. O ficheiro matriz agrega as várias fontes de dados usadas para a simulação. A Figura 3.3 representa um exemplo de ficheiro matriz com os dados de entrada.

```

-----
- input data file austal2000.txt
- (a comment line starts with "-", a comment in a line with "'")
-
ti "Screening001 Odor"      ' title of the project
as "meteo_Ro_screen.aks"  ' name of the dispersion class statistics
os NESTING                 ' options (here: nested grids)
z0 0.2                    ' (m) average surface roughness length
ha 11.2                   ' (m) anemometer height above ground
qs 0                      ' quality level (controls number of particles)
' sources:
hq 5                      ' (m) height of the lower edge
cq 5                      ' (m) vertical extent
xq -8                     ' (m) lower left corner, x-coordinate
yq -30                    ' (m) lower left corner, y-coordinate
aq 16                     ' (m) extent in x-direction
bq 60                     ' (m) extent in y-direction
' emissions:
xx 5                      ' (g/s) unspecified trace substance
odor 5000                 ' (GE/s) odorant (result: frequency of odour hours)
' monitor points:
xp 100 200 300 400 500 600 700 800 ' (m) x-coordiante
yp 0 0 0 0 0 0 0 0      ' (m) y-coordinate
-----

```

Figura 3.3 - Exemplo de um ficheiro de entrada do modelo AUSTAL2000

Cada linha do ficheiro meteorológico indica um conjunto de variáveis para uma hora de uma série temporal, tais como velocidade e direção do vento, classe de estabilidade de Klug-Manier e altura da camada de mistura. O modelo obtém automaticamente o comprimento de Monin-Obukhov, partindo das classes de estabilidade e da rugosidade.

Em simulações em terreno complexo, é necessário indicar no ficheiro matriz o diretório do ficheiro de terreno, o qual deve cumprir os formatos Arcinfo-GRIDASCII, DMNA ou XYZ. Estes ficheiros podem ser obtidos através de modelos digitais de terreno.

O modelo TALdia, provém do modelo de mesoescala TALdiames, o qual foi modificado para considerar a influência de edifícios através do modelo de microescala DMK [Janicke Consulting, 2011]. Na ausência de edifícios, o TALdia cria 2 campos de ventos para cada classe de estabilidade Klug-Manier, para as componentes Sul e Oeste. No caso de existirem edifícios são criados 36 campos de ventos para cada classe, que corresponde à rosa dos ventos decomposta em ângulos de 100. O modelo cria inicialmente campos de ventos com divergência livre, baseados nos dados experimentais indicados no ficheiro meteorológico. Posteriormente estes campos são diagnosticados e ajustados de forma a serem obtidos campos de ventos que respeitem a condição de divergência tridimensional nula, que provém da hipótese que a atmosfera é um fluido incompressível e respeita a lei de conservação da massa [Castro, 2011].

Os ficheiros de saída contêm os resultados obtidos para cada situação simulada. São criados vários ficheiros no caso de serem realizadas simulações para várias grelhas de cálculo, bem como um ficheiro que contém um relatório final da simulação, indicando erros e outros elementos importantes, assim como uma lista dos restantes ficheiros criados.

Após reunidos os dados necessários à aplicação do AUSTAL2000, definidos de acordo com as condições de cada simulação, é gerada pelo modelo uma sequência temporal da distribuição espacial das concentrações das espécies emitidas. Caso sejam definidos pontos recetores no domínio de simulação, são também fornecidos, os valores horários de concentração nesses mesmos pontos.

As médias temporais de cada valor-limite, definido pelas diretivas europeias e também pelo TALuft, são a base dos ficheiros de saída do AUSTAL2000. Na tabela 3.2 estão indicados os VL para cada base temporal.

Tabela 3.2 - Valores-limite para garantir a proteção humana

Substância	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Média temporal	Frequência anual permitida de valores excedentes
SO <sub>2</sub>	50	1 ano	-
	125	24 horas	3
	350	1 hora	24
NO <sub>2</sub>	40	1 ano	-
	200	1 hora	18
PM total	40	1 ano	-
	50	24 horas	35

[Fonte: Guia TALuft, 2002]

---

Deste modo, e de acordo com a tabela 3.2 são estabelecidos para valores- limite anual, diário e horário para os vários poluentes. Por exemplo, numa simulação em que é considerado como poluente o SO<sub>2</sub>, resulta um ficheiro para cada uma destas bases temporais: *SO<sub>2</sub>-y00.dmna*, *SO<sub>2</sub>-d03.dmna*, *SO<sub>2</sub>-d00.dmna*, *SO<sub>2</sub>-h24.dmna*, *SO<sub>2</sub>-h00.dmna* e *SO<sub>2</sub>-tmpa.dmna*. O termo *y00* corresponde às concentrações médias anuais, *dnn* à máxima média diária que ultrapassa *nn* vezes e *hnn* à máxima média horária que ultrapassa *nn* vezes. O termo *tmpa* indica a série temporal nos pontos recetores.

As limitações resultantes da aplicação do AUSTAL2000 estão relacionadas com alguns requisitos do modelo não ajustáveis a este caso de estudo. A rugosidade superficial pode ser automaticamente definida pelo modelo, desde que se introduza um registo com o uso do solo. Porém, o registo que está por defeito no modelo cobre uma área específica (Alemanha), razão que levou ao uso de estimativas.

O AUSTAL2000 tem sido amplamente utilizado na Alemanha, onde é considerado a ferramenta *standard* de avaliação da qualidade do ar. A sua aplicação tem vindo a estender-se a outras regiões, para as quais existem estudos que avaliam o comportamento numérico do modelo, sugerindo um bom desempenho. Um exemplo desses estudos é o projeto “*EU Twinning*” que inclui países como a Polónia, Turquia e Bulgária [Muller e Janicke, 2007].

---

## 4 CASO DE ESTUDO: CIDADE DE AVEIRO

A cidade de Aveiro, embora não apresente a dimensão em área urbana duma grande metrópole, tem registado, nos últimos anos, algumas excedências aos valores legislados para proteção da saúde humana. Consultando os dados que a APA tem disponível na sua base de dados *on-line*, verifica-se que, apesar da qualidade do ar ser maioritariamente boa, existem situações de qualidade do ar médio e fraco. Numa tentativa de compreender as possíveis causas e fontes destas excedências, considerou-se como caso de estudo a cidade de Aveiro cujo propósito baseia-se na avaliação da exposição populacional aos poluentes atmosféricos, com base na modelação da qualidade do ar.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MUNICÍPIO DE AVEIRO

A cidade de Aveiro situa-se na Região Centro, Litoral Norte de Portugal Continental, à latitude de 40°38'18" N e à longitude de 8°39'09"W.

Ocupa uma área de 7,6 km<sup>2</sup> e apresenta uma forma irregular, atravessada por um canal de Ria que separa a zona “baixa” da zona “alta” e que tem originado, ao longo do tempo, um desenvolvimento diferenciado da cidade. Aveiro é considerada uma cidade de média dimensão – metrópole terciária.

À escala regional, Aveiro integra a NUTIII do Baixo Vouga, onde se encontram também os concelhos de Águeda, Albergaria-a-Velha, Anadia, Estarreja, Ílhavo, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Sever do Vouga e Vagos. Na Figura 4.1 é apresentada a localização geográfica da cidade de Aveiro.

O Município de Aveiro, principal pólo estruturante da Sub-região do Baixo Vouga, é delimitado a Norte pelo Município da Murtosa, a Este pelo de Albergaria-a-Velha, a Sudeste pelos Municípios de Águeda e Oliveira do Bairro, a Sudoeste pelo de Vagos, a Oeste pelo Município de Ílhavo e ainda pelo Oceano Atlântico. Com uma área de 199,77 km<sup>2</sup>, o seu território municipal encontra-se subdividido administrativamente em 14 freguesias urbanas, rurais e peri-urbanas. As freguesias rurais e peri-urbanas são as freguesias de Aradas, Cacia, Eirol, Eixo, Nariz, Oliveirinha, Requeixo, São Bernardo, São Jacinto, Santa Joana e Nossa Senhora de Fátima e as freguesias urbanas as de Esgueira, Glória e Vera Cruz. [Valério, 2010]

Do ponto de vista morfológico, o território municipal apresenta uma componente física predominante em materiais argilosos, arenosos e em muitos setores aluviões, uma faixa costeira onde se desenvolveram dunas, e das quais, por várias razões de índole ambiental se destacam as da Reserva Natural das Dunas de São Jacinto. A topografia da região é dominada por uma grande laguna, denominada vulgarmente de Ria de Aveiro, que se desenvolve paralelamente à linha de costa. A Ria tem uma largura e comprimentos máximos de cerca de 10 e 45 km, respetivamente, e ocupa uma área molhada de aproximadamente 45 km<sup>2</sup> na baixa-mar e de cerca de 120 km<sup>2</sup> na preia-mar. [Valério, 2010]

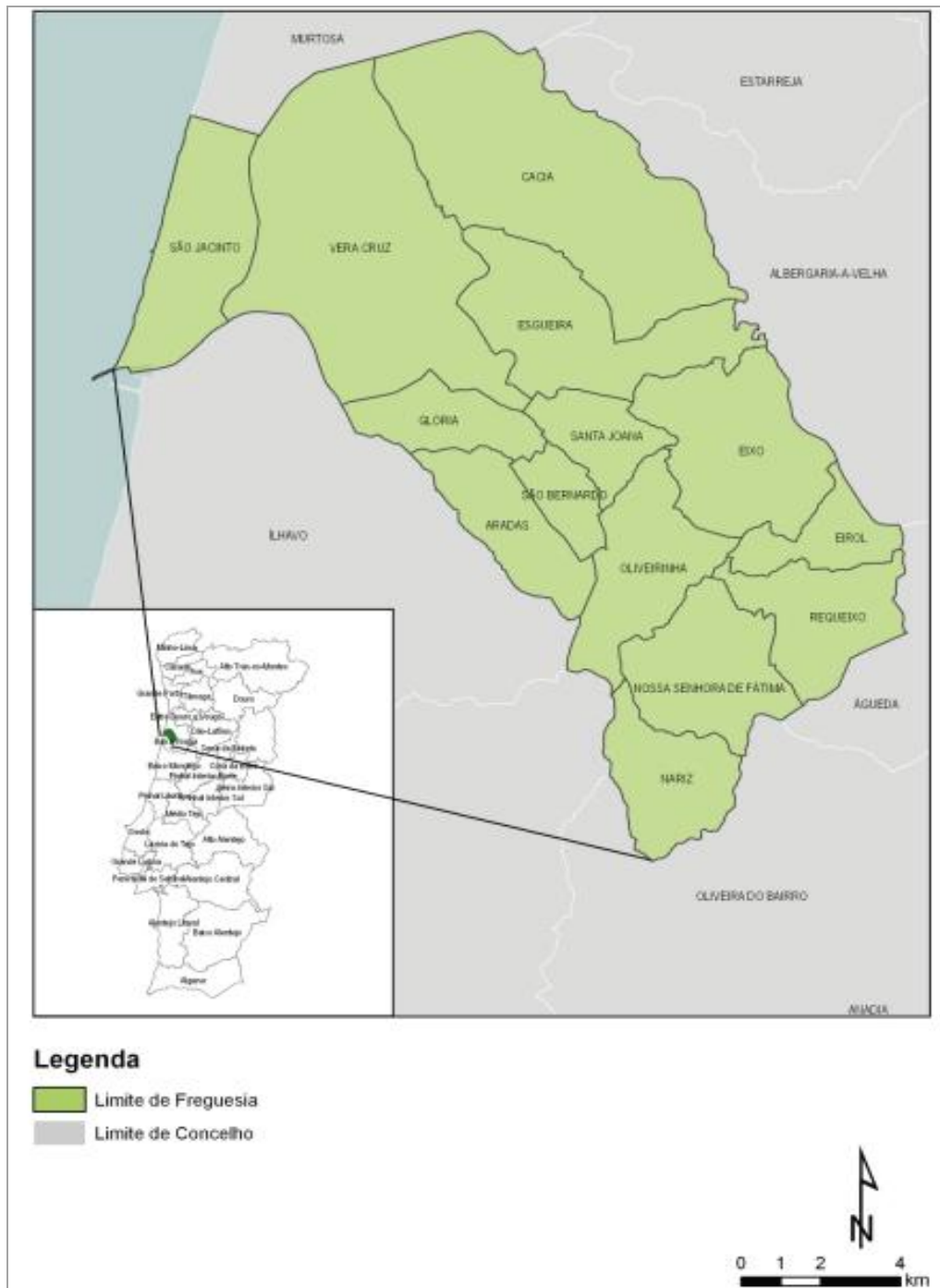


Figura 4.1 - Localização da cidade de Aveiro [Valério, 2010].

Do ponto de vista hipsométrico, as altitudes do Município de Aveiro raramente ultrapassam os 30 metros de altitude, o que determina declives muito suaves, ou mesmo a sua ausência em amplos setores do território municipal. Por este motivo, na aplicação do modelo AUSTAL2000 não será introduzida informação relativa à complexidade do terreno, assumindo-o como uma zona plana. A Figura 4.2 apresenta a carta hipsométrica da cidade de Aveiro.

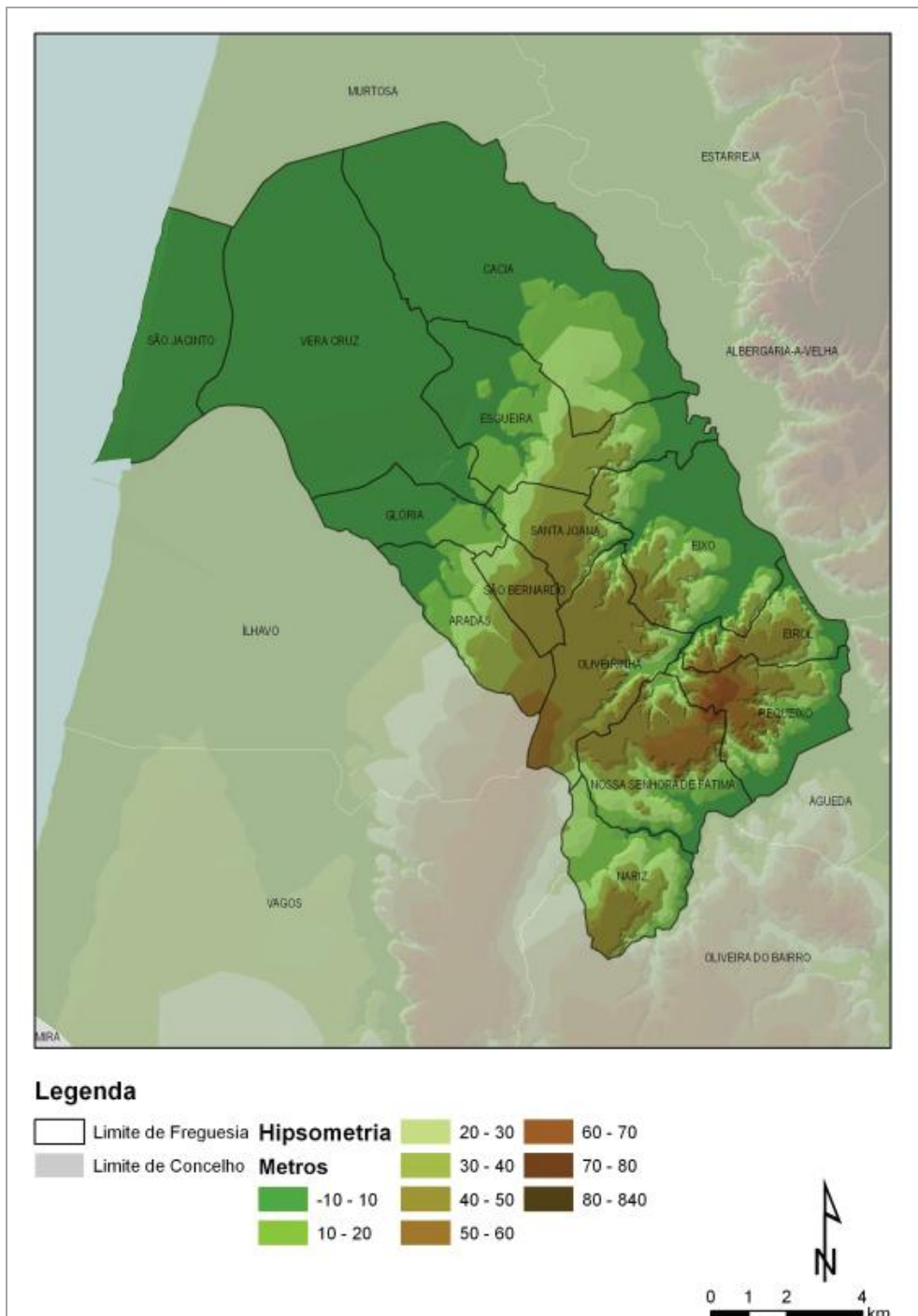


Figura 4.2 - Carta Hipsométrica da cidade de Aveiro [Valério, 2010].

A parte Oeste da região é ocupada pela Ria e bastante plana, o lado Este é caracterizado por uma ortografia mais complexa. A topografia da região é atravessada, no sentido nascente-poente, pelo vale do Rio Vouga. Pode-se assim dizer que a região de Aveiro é de grande complexidade topográfica, devido a uma utilização diversificada do solo, que produz uma malha intrincada de zonas agrícolas, urbanas e húmidas. No entanto, esta região pode ser considerada como relativamente simples do ponto de vista orográfico (Figura 4.3).



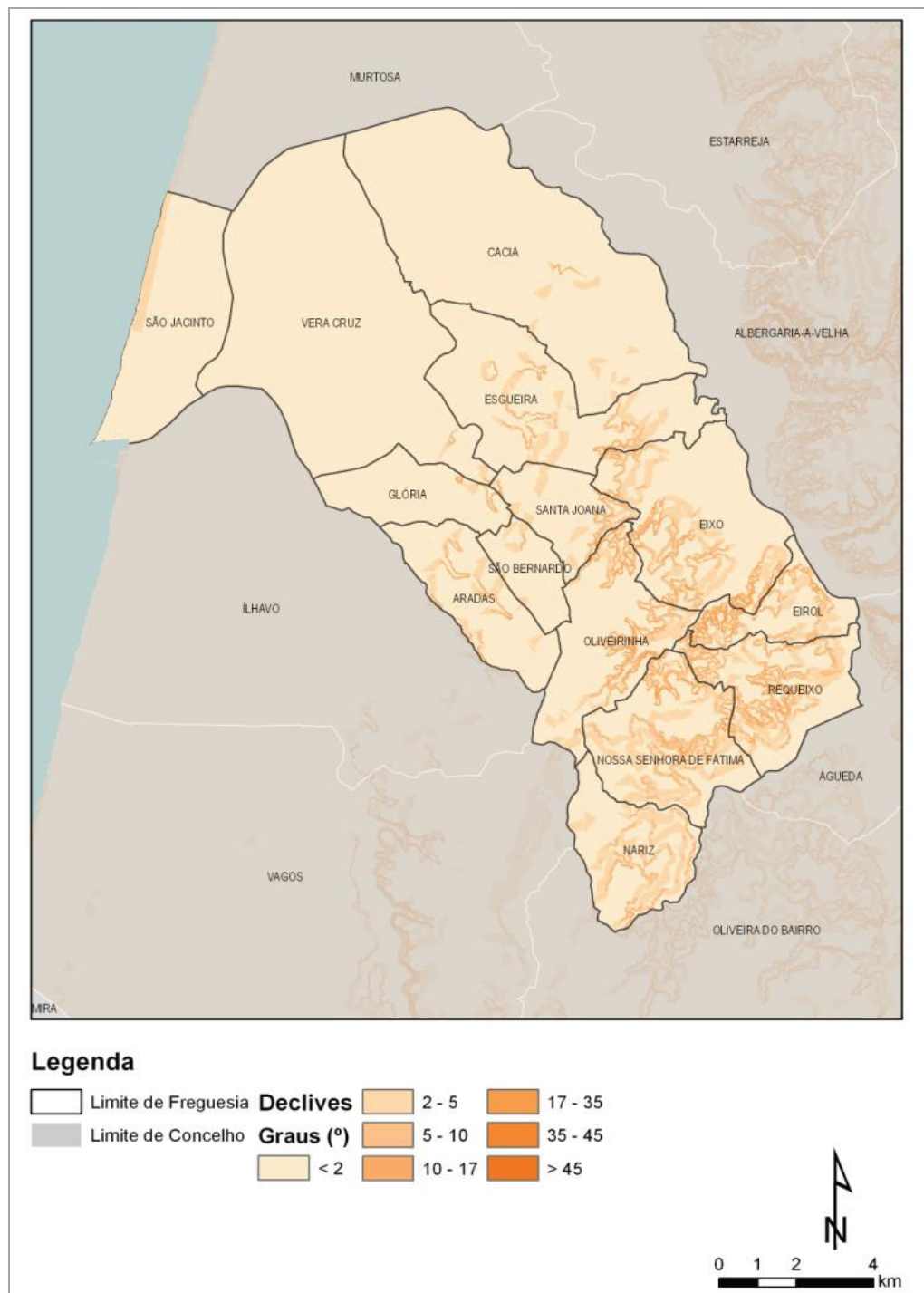


Figura 4.3 - Carta de Declives [Valério, 2010].

A Ria de Aveiro, apresentada na Figura 4.4, destaca-se pela importância que adquire e pela interferência nas temperaturas. A cidade de Aveiro está situada na interface entre sapal/ zonas húmidas/ salinas a NW e zonas rurais a SE.

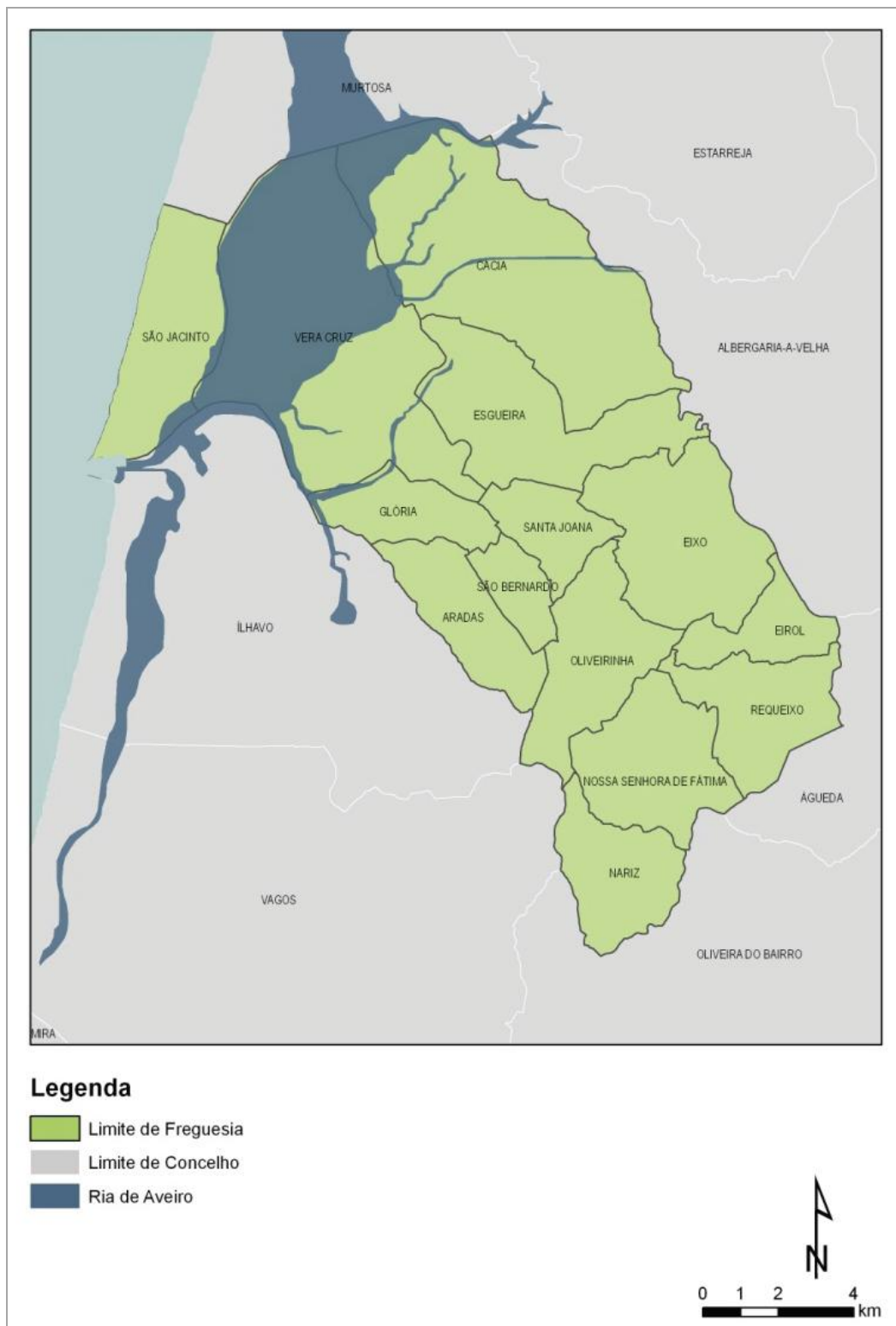


Figura 4.4 – Carta da Ria de Aveiro [Valério, 2010].

Do ponto de vista de acessibilidades, representadas na Figura 4.5, a posição estratégica e central no território nacional do Município de Aveiro resulta da sua integração no tráfego nacional - Norte/Sul - e regional, associando-se sobretudo com as acessibilidades resultantes da articulação de cinco grandes eixos, quer rodoviários – A25, A1, A17 e A29 -, quer ferroviários - Linha do Norte.

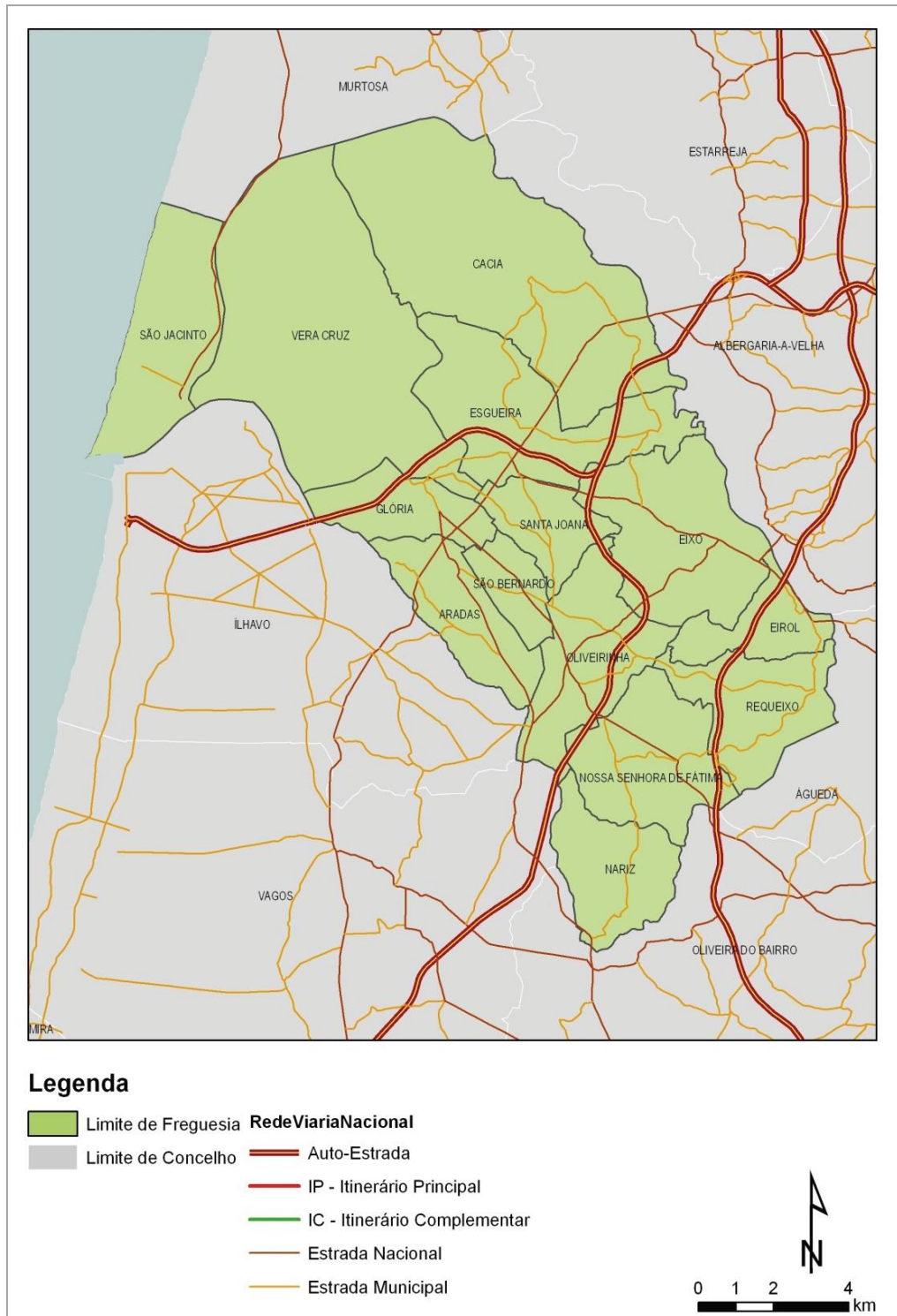


Figura 4.5 – Carta da Rede de Acessibilidades [Valério, 2010].

---

## 4.2 O CLIMA DO MUNICÍPIO DE AVEIRO

Em função da grande influência que o clima exerce em quase todas as atividades humanas, é fundamental conhecer as principais características climáticas de Aveiro, o que implica a caracterização de todo um conjunto de parâmetros, como a temperatura, a precipitação, o nevoeiro, a humidade relativa e o regime de ventos na região Centro-Norte litoral.

### 4.2.1 Temperatura

Como já referido, a proximidade do mar e a presença dos grandes lençóis de água que formam a Ria de Aveiro condicionam fortemente as características climáticas da cidade de Aveiro. Como se verifica na Figura 4.6, a temperatura média anual ronda os 15 °C, registando-se os valores mais baixos nos meses de Inverno, cerca de 10 °C em média, e os mais altos nos meses de Junho, Julho e Agosto apresentando temperaturas médias de cerca de 23 °C. Trata-se de um local com um clima ameno, sem grandes oscilações de temperatura ao longo do ano.

### 4.2.2 Humidade

As médias anuais de humidade do ar estão compreendidas entre 79% e 88%. Estas percentagens elevadas resultam da evaporação permanente que se verifica na Ria além da humidade trazida pelos ventos quentes que, soprando do mar, são influenciados pela Corrente do Golfo.

### 4.2.3 Pluviosidade

O ritmo pluviométrico não é contínuo, apresentando uma variabilidade entre estações do ano (cerca de 80 % nos meses de Outubro a Abril), com a existência de uma maior ou menor estação seca. É nos meses de Inverno que se concentra a maior pluviosidade, com maior intensidade em Janeiro (135 mm), Março, Novembro e Dezembro ocorrendo os valores mínimos em Julho (12 mm) e Agosto (16 mm) (Figura 4.6). Quanto à génese destas precipitações, maioritariamente associam-se a perturbações frontais (e massas de ar associadas) provenientes do Atlântico, facto que motiva valores mais elevados durante o período em que o Anticiclone dos Açores se localiza mais para Sul [Valério, 2010].

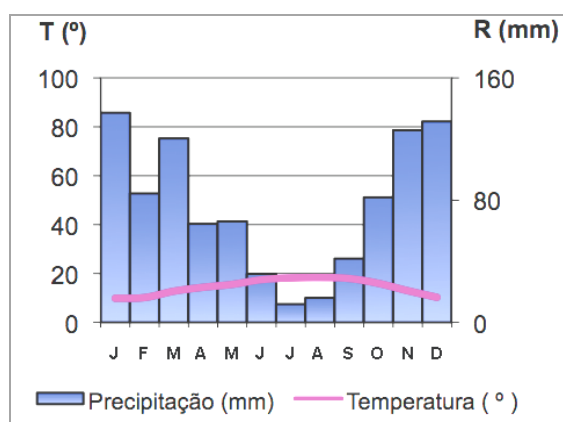


Figura 4.6 - Temperatura e precipitação da estação meteorológica de Aveiro/Barra [Valério, 2010].

#### 4.2.4 Nevoeiros

Por força das características topográficas da área e da proximidade da linha de costa, os nevoeiros assumem um significativo papel na análise de uma possível interferência do clima na poluição atmosférica. O nevoeiro facilita a fixação dos poluentes nas gotículas em suspensão, as quais podem ser facilmente respiráveis pelos seres vivos. Os meses com maior frequência de nevoeiro compreendem os meses entre Julho e Outubro. Também nos meses de Dezembro, Janeiro e Março a frequência é apreciável. Os meses de Abril e Novembro são aqueles em que, em média, ocorrem menos dias de nevoeiro [Valério, 2010].

#### 4.2.5 Regime dos ventos

O regime dos ventos na região de Aveiro é fundamental pois condiciona a qualidade do ar, devido à sua influência na dispersão e concentração ou dispersão dos poluentes atmosféricos.

Constata-se que os ventos de quadrantes de Sul, Sudeste e Este são mais usuais nos meses de Inverno, com maiores velocidades (Figura 4.7). Nos meses de Verão os quadrantes mais representados são de Norte e de Noroeste, refletindo as designadas “nortadas”. Porém, e embora a sua ocorrência seja muito frequente, é de referir que a sua velocidade é normalmente um pouco mais baixa, e com valores médios que raramente atingem valores superiores aos 30 km/hora [Valério, 2010].

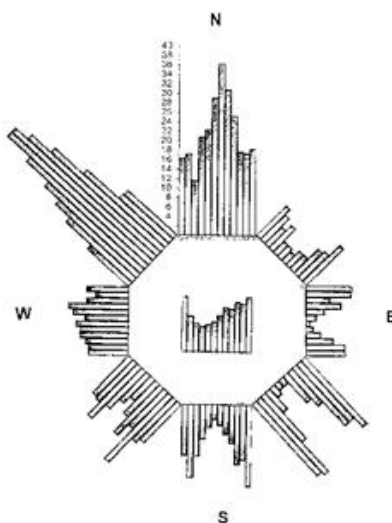


Figura 4.7 – Regime dos ventos do município de Aveiro [Valério, 2010].

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO SOCIODEMOGRÁFICA

Segundo os dados mais recentes do Instituto Nacional de Estatística (INE), relativos aos CENSOS 2011, o município de Aveiro registava nesse ano uma população residente total de 78450 habitantes, com uma densidade populacional de 393,1 hab/km.

De acordo com o PROT-C, resultado da sua forte atração, o município de Aveiro apresenta uma tendência de crescimento populacional que não aponta só para as freguesias mais

urbanas, mas também nas freguesias envolventes, resultado de importantes transformações ao nível das acessibilidades, bem como pela introdução de equipamentos que produzem alterações de dinâmicas, populacionais e urbanísticas significativas.

Tal evidencia a forte evolução populacional registada no concelho nas últimas décadas, ilustrada na Figura 4.8.

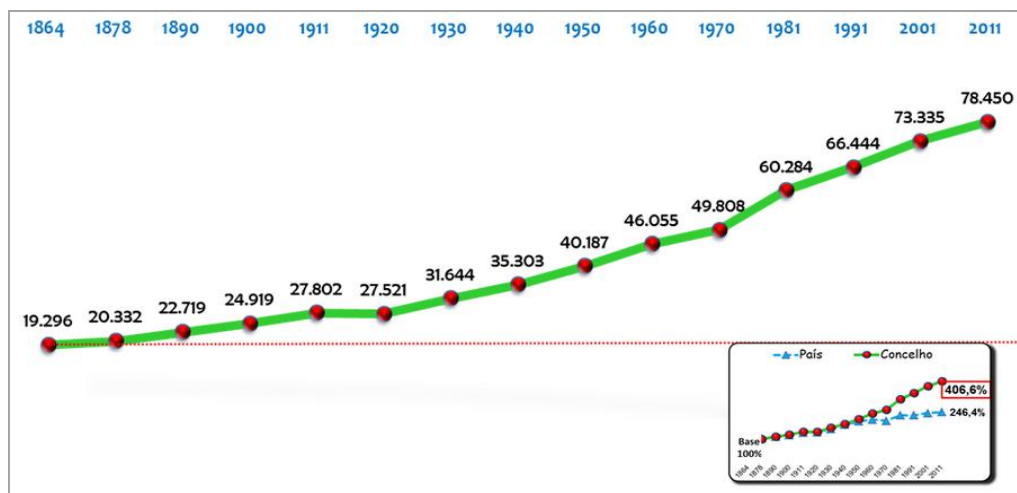


Figura 4.8 - Evolução do nº de habitantes no concelho de Aveiro [5]

A sua distribuição pelos principais grupos etários (figura 4.9) evidencia uma população predominante com idades entre os 25 e os 64 anos, o que permite concluir que a maioria da população é ativa.

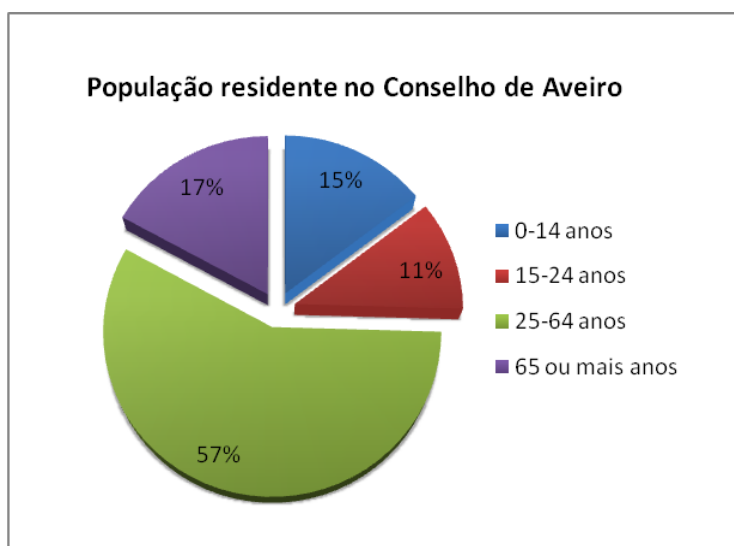


Figura 4.9 - População Residente do Concelho de Aveiro, segundo grupos etários [INE 2012].

A análise da distribuição dos valores de população residente nas 14 freguesias que integram, na atualidade, o Município de Aveiro permite distinguir na Figura 4.10 grupos de freguesias que apresentam comportamentos demográficos semelhantes nos dez anos mais recentes.

População residente (N.º) por Local de residência (à data dos Censos 2011), Sexo e Grupo etário; Decenal

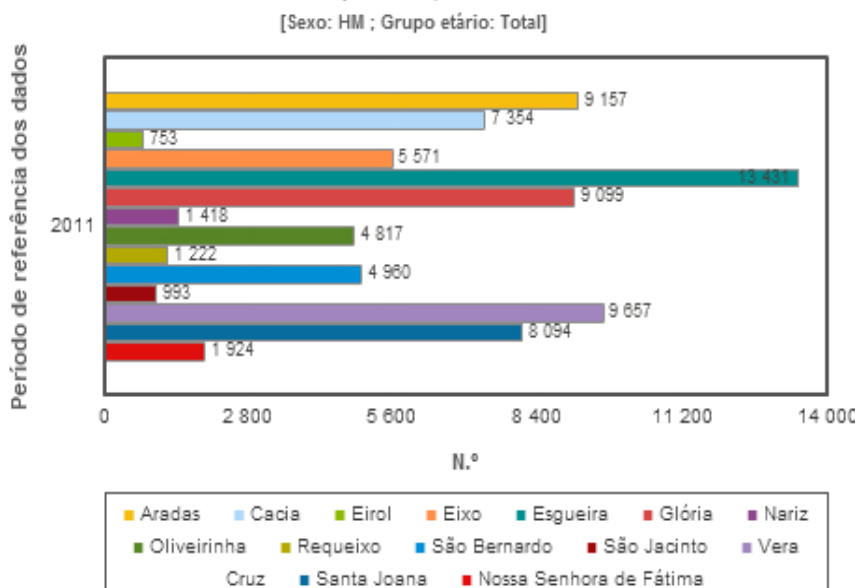


Figura 4.10 – População residente (Nº) por local de freguesia. Grupo Etário: Total Sexo: HM. [INE, 2012]

De salientar no Município de Aveiro os quantitativos populacionais registados nas três freguesias urbanas de Esgueira, Glória e Vera Cruz (13431, 9099 e 9657 residentes, respetivamente), sendo o grupo de freguesias mais populoso, representando 41,06% dos residentes.

Um segundo grupo é constituído pelas freguesias peri-urbanas de Aradas, Santa Joana e Cacia (9157, 8094 e 7354 residentes, respetivamente), representando 31,39% dos residentes. As freguesias peri-urbanas de Eixo, Oliveirinha e São Bernardo constituem um terceiro grupo (5253, 4780 e 4079 residentes, respetivamente), representando 18,00% dos residentes do Município. Por fim, as freguesias mais rurais de Nossa Senhora de Fátima, Nariz, Requeixo, São Jacinto e Eirol, com pesos populacionais mais reduzidos, representam 8,05% da população residente no Município, correspondendo a 1924, 1418, 1222, 993 e 753 indivíduos, respetivamente.

Não se poderá menosprezar os papéis que a Indústria, o Porto de Aveiro e a Universidade de Aveiro desempenham no desenvolvimento do Município, tal como a existência de eixos rodoviários estruturantes, (A1, A25, A17 e a EN230), funcionando como fatores de fixação e atração de população.

#### 4.4 PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES

Para desenvolver uma estratégia de redução da poluição atmosférica é necessário identificar as fontes de poluição e quantificar as suas emissões. A degradação do ambiente no espaço urbano, com a diminuição da qualidade do ar nas cidades, é objeto de preocupação, porque grande parte da população vive nestas áreas. O aumento do tráfego rodoviário é o principal responsável pelo crescimento dos níveis de poluição, com o conseqüente desrespeito pelas normas de qualidade do ar [Borrego, 2006].

Durante as últimas décadas, os transportes rodoviários tornaram-se as fontes dominantes da poluição atmosférica, em especial nas áreas urbanas. Este facto relaciona-se principalmente com o rápido aumento do transporte de passageiros e mercadorias, podendo estar ainda associado aos novos regulamentos sobre as emissões do sector industrial, que conduzem à redução do contributo destas fontes para a degradação da qualidade do ar [Borrego *et al.*, 2006].

O último relatório da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2012) sobre as emissões por setor de atividade e por concelho apresenta as principais emissões produzidas pelos setores de atividade com maior contribuição na degradação da qualidade do ar do concelho de Aveiro. Pela Figura 4.11 é possível identifica os setores com maior contributo de emissões de NO<sub>x</sub> e PM10.

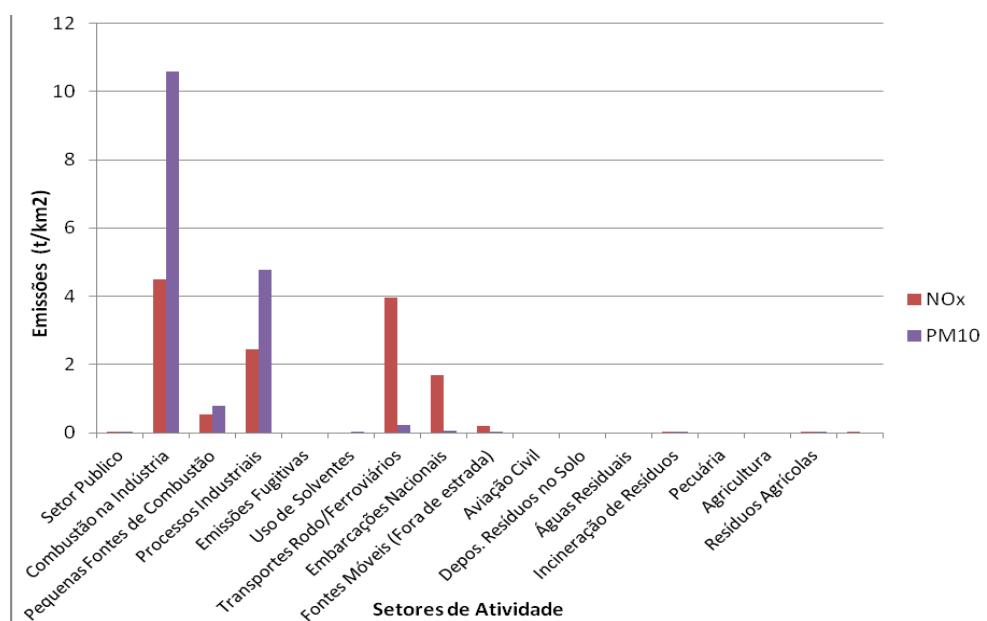


Figura 4.11 - Total de emissões por setor no município de Aveiro [Adaptado do Relatório de Emissões por concelho da APA, 2008].

A par dos setores de Combustão na Indústria, Pequenas Fontes de Combustão e Processos Industriais, destacam-se os Transportes Rodoviários como as principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos no concelho de Aveiro. O sector dos transportes emite quantidades relevantes, especialmente de CO e NO<sub>x</sub>. Os processos industriais contribuem significativamente para a emissão de poluentes atmosféricos, tal como era esperado na região de Aveiro, pela sua importância urbana e industrial. Estes processos são também os que mais emitem toneladas de PM10.

#### 4.5 QUALIDADE DO AR EM AVEIRO

A Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDR-C) dispõe de oito estações de monitorização da qualidade do ar afetas à Rede Nacional de Medição da Qualidade do Ar. Face à necessidade de proceder à avaliação da qualidade do ar em todo o território, com vista a dar cumprimento ao Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de Julho, foram delimitadas, na Região Centro, três Zonas (Zonas Centro Interior, Centro Litoral e de Influência de Estarreja - cujo comportamento em termos de qualidade do ar é, em certa



medida, determinado pela laboração das indústrias químicas do Complexo Industrial) e duas Aglomerações (Coimbra e Aveiro/Ílhavo).

Cada Aglomeração deve possuir: uma estação para acompanhamento da poluição originada pelo tráfego automóvel (equipada obrigatoriamente com analisadores de NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>10</sub>), e uma estação com localização tal, que não sofra influência direta de qualquer fonte emissora, do tipo de influência de 'fundo' (equipada obrigatoriamente com analisadores de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> e PM<sub>10</sub>). Na tabela 4.1 resumem-se as características gerais das Estações de cada Zona e Aglomeração.

Tabela 4.1 - Caracterização da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Centro  
[Relatório da Qualidade do Ar da Região Centro, 2011]

Zona/ Aglomeração	Estação (Concelho)	Classificação	Poluentes Monitorizados							
			SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	PM 10	PM 2,5	CO	BTX	SO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> S
Aglomeração de Coimbra	Inst. Geofísico (Coimbra)	Urbana de Fundo	√	√	√	√				
	Av. Fernão Magalhães (Coimbra)	Tráfego	√	√		√	√	√	√	
Aglomeração de Aveiro/ Ílhavo	EB 2,3 Gabriel Ançã (Ílhavo)	Urbana de Fundo	√	√	√	√				
	Escola Sec. José Estevão	Tráfego		√		√		√	√	
Zona Centro Litoral	Erveira (Leiria)	Regional de Fundo		√	√	√	√			√
	Montemor- o-velho	Regional de Fundo	√	√	√	√				
Zona Centro Inferior	Salgueiro (Fundão)	Regional de Fundo	√	√	√	√				
	Fornelo do Monte (Vouzela)	Regional de Fundo	√	√	√	√				
Zona de Influência de Estarreja	Teixugueira (Estarreja)	Industrial	√	√	√	√	√			

Em Aveiro, a Estação de Monitorização da Qualidade do Ar, do tipo de influência tráfego, localiza-se no recinto da Escola Secundária José Estevão, na Avenida 25 de Abril (Figura 4.12). Esta estação iniciou o seu funcionamento a 15 de Janeiro de 2003. Os poluentes medidos em contínuo são: monóxido de azoto (NO), dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), partículas (PM<sub>10</sub>), Benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) e monóxido de carbono (CO).



Figura 4.12 - Estação de Monitorização da Qualidade do Ar em Aveiro.

Na tentativa de identificar quais os poluentes atmosféricos mais críticos na aglomeração Aveiro/Ílhavo, compilou-se a informação monitorizada ao longo dos últimos anos.

O histórico realizado através do tratamento dos mais recentes dados validados para os últimos seis anos permite perceber, pela Figuras 4.13, a dimensão crítica que as PM<sub>10</sub> têm na qualidade do ar na zona urbana de Aveiro.

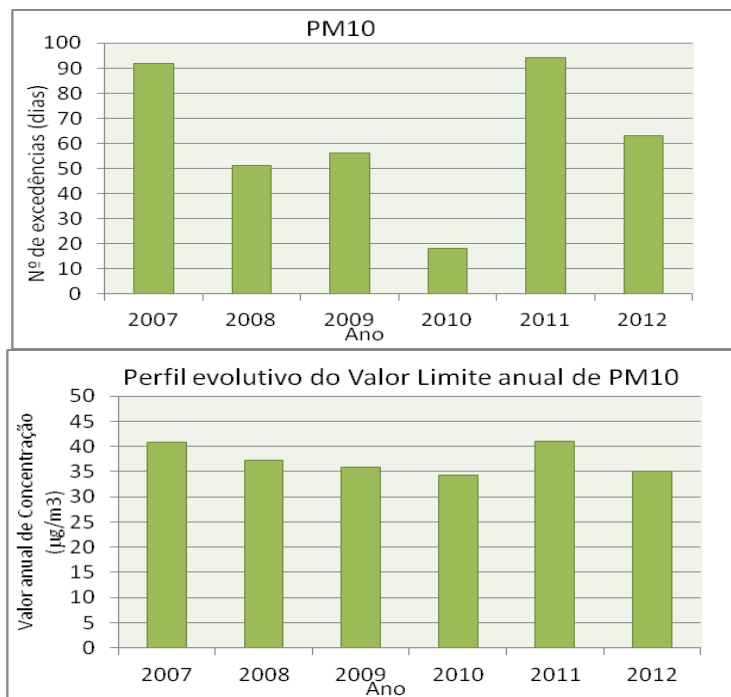


Figura 4.13 - Número de excedências ao VL diário de PM<sub>10</sub> – Excedências permitidas: 35 dias no ano (à esquerda) e VL anual de PM<sub>10</sub> em cada ano (à direita).

Além da poluição proveniente do tráfego, importa destacar uma fonte natural de PM com bastante expressividade na região de Aveiro, as emissões resultantes dos incêndios florestais. O incêndio florestal é um fenómeno natural de forte potencial na formação de material particulado, pois da queima do coberto vegetal resulta a formação de cinza que se encontra posteriormente em suspensão na atmosfera, podendo ser depositada nas imediações do local onde ocorreu o incêndio ou transportada para outros locais.

É de salientar que os valores de partículas monitorizados resultam da associação de vários fatores responsáveis que ocorrem em simultâneo, quer sejam eles de origem antrópica ou natural.

A Figura 4.14 refere-se ao tratamento dos dados relativos a NO<sub>2</sub>. Pode-se verificar uma redução das emissões deste poluente nos últimos anos, não se registando excedências aos níveis fixados na legislação.

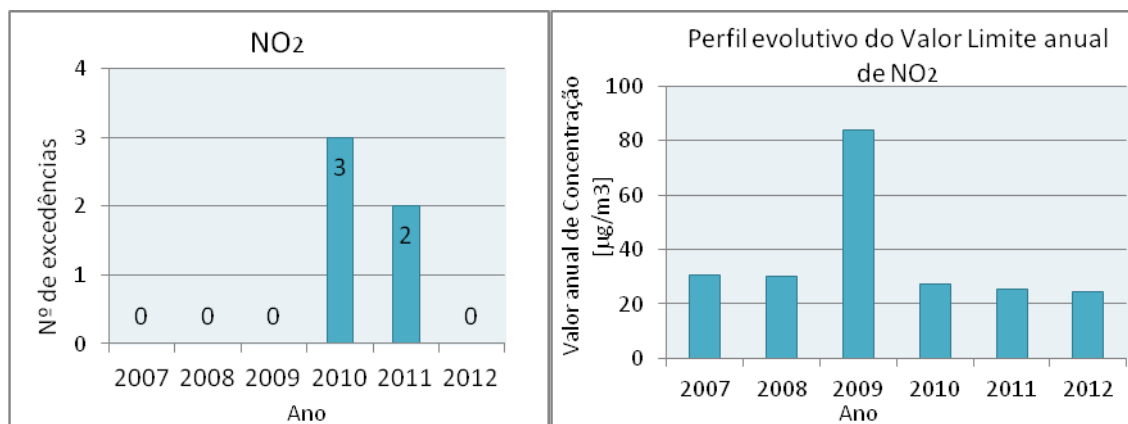


Figura 4.14 - Número de excedências ao VL diário de NO<sub>2</sub> – Excedências permitidas: 18 dias no ano (à esquerda) e VL anual de NO<sub>2</sub> em cada ano (à direita).

A qualidade do ar em Aveiro segue a tendência das cidades europeias, com valores medidos de PM<sub>10</sub> excedentes para a saúde humana. De fato, a exposição a concentrações excessivas de PM<sub>10</sub>, que constituem uma das formas de poluição mais graves para a saúde humana, tem sido já vindo a ser evidenciado em vários estudos da qualidade do ar para esta região, sendo as PM<sub>10</sub> apontadas como o poluente mais crítico medido na Estação de Qualidade do Ar de Aveiro [Miranda, 2013, Seminário Gestão Territorial do Risco na Região Centro].

## 5 CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO AUSTAL2000

A avaliação da exposição a poluentes atmosféricos na cidade de Aveiro decorreu da simulação da qualidade do ar aplicando o modelo *AUSTAL2000*. Os poluentes alvo de estudo foram as PM<sub>10</sub> e o NO<sub>2</sub>. Esta seleção deve-se às medições de PM<sub>10</sub> próximas dos valores limite legislados e ao facto de o NO<sub>2</sub> estar fortemente associado à poluição por transporte rodoviário.

### 5.1 DOMÍNIO E PERÍODO DE SIMULAÇÃO

O domínio de simulação escolhido incide na cidade de Aveiro, freguesias urbanas do município, coincidindo com a área de intervenção do Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro (PMMA) [PMMA, 2012], de modo a poder usufruir do cruzamento de informação essencial ao caso de estudo. O Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro, emitido em 2012 pela Câmara Municipal de Aveiro, aborda um leque de temáticas variadas, tendo em vista a elaboração de um conjunto de planos e ações para o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade equacionados no contexto da Política de Mobilidade do Concelho de Aveiro.

A área selecionada corresponde à zona mais urbana de Aveiro, onde a concentração de funções urbanas (económicas e residenciais) é mais intensa. Nesta área incluem-se, quase na totalidade, o território das freguesias de Glória e Vera Cruz, bem como uma pequena parcela dos territórios de Esgueira e Santa Joana, ilustrado na Figura 5.1. A delimitação do território a nível urbano está definida no Plano Diretor Municipal (PDM) em vigor para o concelho de Aveiro [Decreto nº 45342 de 07/11/63; Planta de Condicionantes (Planta nº4)], desagregando-se o restante território concelhio nas categorias de peri-urbano e rural.

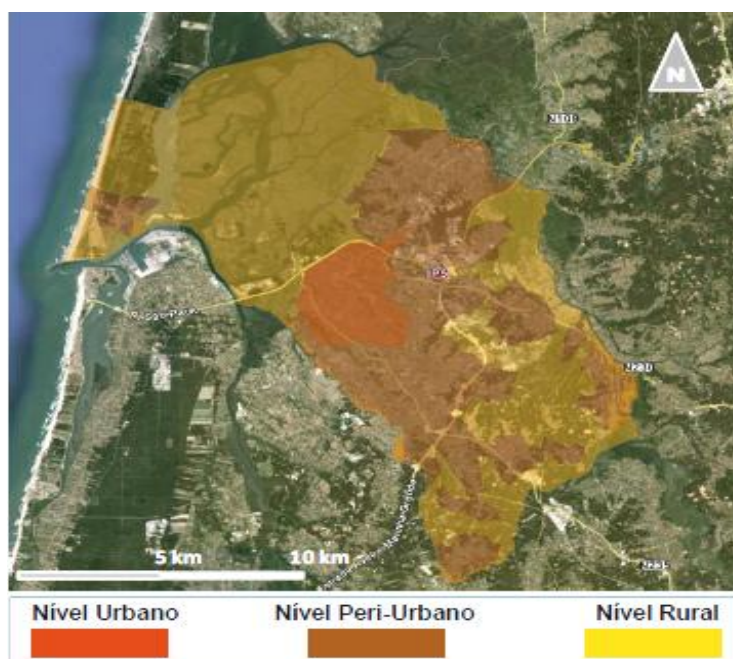


Figura 5.1 - Níveis de ordenamento propostos no PMMA para o concelho de Aveiro

O domínio, representado na Figura 5.2, corresponde a uma área aproximada de 4x5 km<sup>2</sup>. Considerou-se uma malha cartesiana com uma resolução horizontal 100m x 100m, sendo o

período de simulação para o ano 2012. Como anteriormente supracitado, o domínio corresponde à área mais urbana da cidade de Aveiro, onde se regista maior atividade e tráfego rodoviário. As principais vias incluídas são apresentadas na tabela 5.1.



Figura 5.2 - Domínio de Simulação

## 5.2 FONTES DE EMISSÃO

Tal como referido no capítulo 4, a par dos setores de Combustão na Indústria, Pequenas Fontes de Combustão e Processos Industriais, destacam-se os Transportes Rodoviários como as principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos no concelho de Aveiro.

Uma análise das fontes existentes no domínio de simulação levou a considerar somente as fontes de emissão em linha devido à forte influência do tráfego rodoviário na qualidade do ar em meio urbano. Apesar de existirem no concelho de Aveiro algumas fontes pontuais, como indústrias e outras infraestruturas que devem ser alvo de atenção no que respeita às emissões atmosféricas, estas não se localizam na área alvo de estudo.

Selecionadas as fontes de emissão mais relevantes, o cálculo das concentrações iniciou-se com a identificação das principais vias de tráfego, representadas na Figura 5.3. Este levantamento baseou-se na informação disponível no Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro sobre “Padrões de Mobilidade” da população Aveirense, onde estão incluídas contagens de tráfego rodoviário em oito postos distribuídos sobre a rede viária estruturante da cidade de Aveiro. Em função das contagens de tráfego disponíveis no PMMA foram selecionadas 21 vias para, correspondentes às principais entradas e saídas da cidade e com maior afluência ao centro urbano.



Figura 5.3 – Vias de tráfego consideradas para a simulação.

Após a identificação das fontes foi necessário recolher um conjunto de dados que caracterizam as vias, designadamente, as suas coordenadas e comprimento (tabela 5.1)

Tabela 5.1 – Identificação das vias de tráfego

ID	Vias de tráfego da simulação	Coordenadas	Compr_via (m)
1	Av. Artur Ravara-Hospital Infante D.Pedro	8°39'19.43"W 40°38'6.74"N	1011
2	Universidade- Hospital	8°39'27.07"W 40°38'2.64"N	495
3	Rua Clube dos Galitos	8°39'25.46"W 40°38'25.50"N	746
4	Rua Condessa Mumadona	8°39'34.78"W 40°38'20.53"N	687
5	A25	8°39'27.32"W 40°38'37.10"N	925
6	Av. Universidade/EN235	8°39'8.88"W 40°37'39.98"N	2443
7	Rua da Associação dos Bombeiros Voluntários	8°39'6.01"W 40°37'53.37"N	1571
8	Rua Nova do Caio	8°37'51.26"W 40°38'24.85"N	1284
9	EN109 (Nascente-Poente)	8°38'20.06"W 40°37'59.54"N	4996
10	Acesso Estação	8°38'21.75"W 40°38'36.97"N	902
11	Av. Congressos de Oposição Democrática	8°38'38.35"W 40°38'30.54"N	3252
12	Av. Dr, Lourenço Peixinho	8°38'41.46"W 40°38'36.04"N	2038
13	Rua Dr. Mário Sacramento	8°38'52.93"W 40°37'46.55"N	1065
14	Rua de Ovar	8°38'56.78"W 40°37'37.46"N	492
15	Zona Centro Comercial Glicínias	8°38'47.13"W 40°37'37.71"N	1475
16	Direção Verdemilho	8°37'35.87"W 40°38'46.22"N	898
17	Direção Esgueira	8°37'32.90"W 40°38'49.16"N	1255
18	EN335	8°38'20.89"W 40°37'23.67"N	999
19	Rua General Costa Cascais	8°37'32.83"W 40°38'46.04"N	3314
20	Av. 25 de Abril	8°38'52.50"W 40°38'12.42"N	3957
21	Av. Dr. Sá Carneiro	8°38'32.95"W 40°38'10.68"N	1095

---

As coordenadas foram obtidas por localização das vias em *Google Earth*. O comprimento de cada via foi dado pela delimitação da mesma em *ArcView*. As emissões do tráfego rodoviário foram calculadas recorrendo ao modelo TREM (*Transport Emission Model for Line Sources*) [Borrego *et al.*, 2003a], desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O modelo TREM tem como principal objetivo estimar as emissões do tráfego rodoviário com uma elevada resolução temporal e espacial, servindo de suporte à decisão na gestão da qualidade do ar.

As emissões dos veículos são descritas com base numa aproximação de velocidade média, proposta pelos projetos MEET/COST319. Esta aproximação considera vários padrões de condução, de forma indireta através da velocidade média. Os fatores de emissão sugeridos pela metodologia foram obtidos a partir de dados recolhidos durante várias experiências europeias e estão baseados nas melhores correlações entre as medições de emissões e a velocidade. Esta metodologia é recomendada para velocidades médias acima dos 10 km/h e para aplicações em que a cinemática dos veículos não é relevante [Borrego *et al.*, 2003a].

Neste modelo, as estradas são consideradas como fontes em linha, onde as emissões são calculadas individualmente, para cada segmento de estrada. Para facilitar o processamento dos dados espaciais e para melhorar a conversão dos dados de emissões resultantes para um formato compatível com modelos de qualidade do ar, o TREM encontra-se associado a um Sistema de Informação Geográfica (*ArcView*) [Silva, 2009].

A informação de entrada requerida pelo TREM inclui basicamente dados espaciais da rede de estradas (comprimento das estradas, tipo de troços), informação estatística (distribuição por classe e categoria de veículos, propriedades do combustível), e o número total de veículos por troço. Os dados de saída do TREM correspondem às taxas de emissão (quentes, frias e evaporativas) de poluente, por segmento de estrada, com uma resolução temporal idêntica à dos dados de volume de tráfego de entrada [Borrego *et al.*, 2003b].

Na estimativa efetuada consideraram-se as categorias de veículos especificadas pelo modelo, nomeadamente veículos ligeiros de passageiros, veículos ligeiros de mercadorias, veículos pesados de mercadorias, veículos pesados de passageiros, motociclos e novas tecnologias. O modelo distingue ainda 350 classes de veículos, sendo cada uma identificada através do parâmetro *k*, que varia desde *k*<sub>1</sub> a *k*<sub>350</sub>.

Para a caracterização da frota de veículos na cidade de Aveiro, por classe e categoria, recorreu-se à informação presente no Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro relativa às frotas rodoviárias no concelho de Aveiro, cujos dados se baseiam na estrutura nacional definida no INERPA (Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas) ajustada à informação de veículos registados no Instituto de Seguros de Portugal [ISP,2010] e em inquéritos realizados. O ISP fornece uma indicação da estrutura etária da frota registada, ao passo que os inquéritos realizados indicam a distribuição da frota por tipo de combustível (gasolina, gasóleo, híbrido ou GPL) (vide ANEXO I). As velocidades praticadas foram assumidas com base em informação constante do Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro: até 60 km/h - ambiente urbano; entre 60 e 80 km/h –Estrada Nacional; acima de 80 km/h – Auto-estrada/Via rápida.

O modelo permite a quantificação das emissões de CO, NO<sub>x</sub> (dados como NO<sub>2</sub> equivalente), Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos (COVNM); Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub> e PM. Neste caso, apenas foram quantificadas as emissões para os poluentes em estudo - NO<sub>2</sub> e PM10.

O modelo TREM relaciona-se com outras ferramentas de modelação, tais como um modelo de transporte para obter dados sobre o volume de tráfego para cada troço de estrada e um modelo da qualidade do ar que calcula a concentração dos poluentes com base nos dados de emissão providenciados pelo TREM.

Os resultados do TREM apresentam-se na Figura 5.4. De um modo geral, pode-se aferir que estes estão de acordo com o previsto, pois as vias com taxas de emissão superiores coincidem com aquelas que registam maiores fluxos de tráfego.

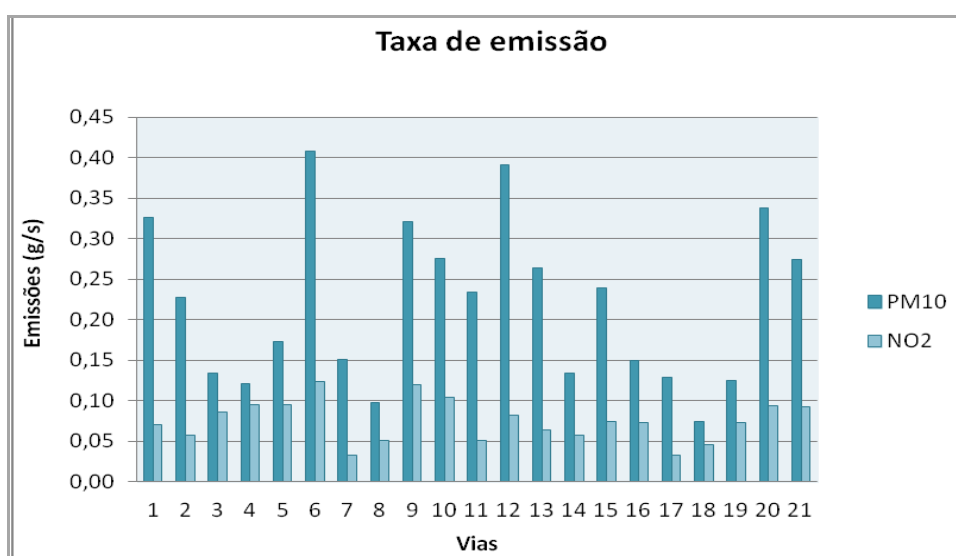


Figura 5.4 –Taxas de emissão das vias de simulação.

### 5.3 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos a introduzir no AUSTAL2000 correspondem aos valores de direção e velocidade do vento, altura do anemómetro ( $h_a$ ), classes de estabilidade de Klug-Manier e altura da camada de mistura ( $h_m$ ).

Os dados de velocidade e direção do vento foram obtidos através das medições realizadas pela estação meteorológica da Universidade de Aveiro ao longo do ano 2012, introduzindo-os diretamente no ficheiro meteorológico criado em formato AKTerm (Vide ANEXO II). O valor da altura do anemómetro assumido pelo modelo foi de 9,8 m.

Para a determinação das restantes variáveis, nomeadamente das classes de Klug-Manier e da altura da camada de mistura, foi necessário realizar alguns cálculos, orientados segundo a metodologia descrita por Essa *et al.* [2006].

A classificação de Pasquill-Gifford de estabilidade da atmosfera (ver tabela 5.2) constitui a base de todo processo de cálculo.



Tabela 5.2 – Classes de estabilidade de Pasquill [Adaptado de Essa *et al.*, 2006].

Vento	Dia Insolação	1 hora antes Nascer do sol ou depois do pôr do sol		Noite	Nebulosidade	Quantidade	
Velocidade m/s	Forte >600 W/m <sup>2</sup>	Moderada 300-600	Fraca <300				
≤ 2	A	A-B	B	D	F ou G	F	D
2-3	A--B	B	C	D	F	E	D
3-5	B	B-C	C	D	E	D	D
5-6	C	C-D	D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D	D

Para cada condição de estabilidade foi estimada a velocidade tangencial ( $u^*$ ), que caracteriza a altura da camada de mistura, através das seguintes equações:

- Para condições neutras:

$$hm = 0,3 \times \frac{u^*}{f} \quad u^* = 0,4 \times \frac{u}{\ln \frac{z}{z_0}}$$

Sendo:  $f$  o parâmetro de Coriolis ( $0,0004 \text{ s}^{-1}$ ),  $u$  a velocidade média do vento (m/s),  $z$  a altura a partir da superfície (usualmente 10 m) e  $z_0$  a rugosidade superficial (0,5 m para o tipo de superfície em análise).

- Para condições estáveis:

$$hm = 0,4 \times \left[ u^* \times \frac{L}{f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad u^* = 0,4 \times \frac{u}{\ln \frac{z}{z_0} + 5 \times \frac{z}{L}}$$

Sendo  $L$  o comprimento de Monin-Obukhov.

- Para condições instáveis:

$$hm = \frac{\left[ 12 - \left( \frac{\sigma_\theta \times u}{u^*} \right) \times L \right]}{0,5} \quad u^* = 0,4 \times \left[ \frac{z}{\left( 1 - 15 \times \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{4}}} \right] \times \frac{\Delta u}{\Delta z}$$

Onde  $\Delta u/\Delta z$  corresponde ao perfil vertical do vento e  $\sigma_\theta$  a flutuação horizontal da velocidade do vento.

Os valores de  $L$  e  $\sigma_\theta$  foram obtidos por associação direta com as classes de estabilidade atmosférica (tabela 5.3). Pela tabela 5.4 é possível converter as classes de estabilidade de Pasquill-Giford para as de Klug-Manier.

Tabela 5.3 – Correspondência entre as classes de estabilidade de Pasquill-Giford com a flutuação horizontal da direção do vento ( $\sigma_\theta$ ) e com o comprimento de Monin-Obukhov [Adaptado de Essa *et al.*, 2006].

Classes de Pasquill-Giford	$\sigma_\theta$	1/L
A	$\sigma_\theta > 22,5^\circ$	$1/L < -0,056^\circ$
B	$17,5^\circ < \sigma_\theta < 22,5^\circ$	$-0,056 \leq 1/L < -0,016$
C	$12,5^\circ < \sigma_\theta < 17,5^\circ$	$-0,016 \leq 1/L < -0,004$
D	$7,5^\circ < \sigma_\theta < 12,5^\circ$	$-0,004 \leq 1/L < 0,002$
E	$3,75^\circ < \sigma_\theta < 7,5^\circ$	$0,002 \leq 1/L \leq 0,006$
F	$2,0 < \sigma_\theta < 3,75^\circ$	$0,006 \leq 1/L < 0,022$
G	$\sigma_\theta \leq 2,0^\circ$	$1/L \geq 0,022$

Tabela 5.4 – Comparação entre as diferentes classes de estabilidade [Adaptado de Cermak *et al.*, 1995].

Pasquill-Giford	Klug-Manier	
A	V	Muito instável
B	IV	Instável
C	III/2	Neutro a moderadamente instável
D	III/1	Neutro a moderadamente estável
E	II	Estável
F/G	I	Muito Estável

A aplicação desta metodologia de cálculo permitiu obter os dados meteorológicos necessários ao AUSTAL2000. A tabela 5.5 apresenta a sequência destes cálculos para um dia do ano simulado (*Vide ANEXO II*), onde se realça a variação da altura da camada de mistura ao longo do dia (Figura 5.6).

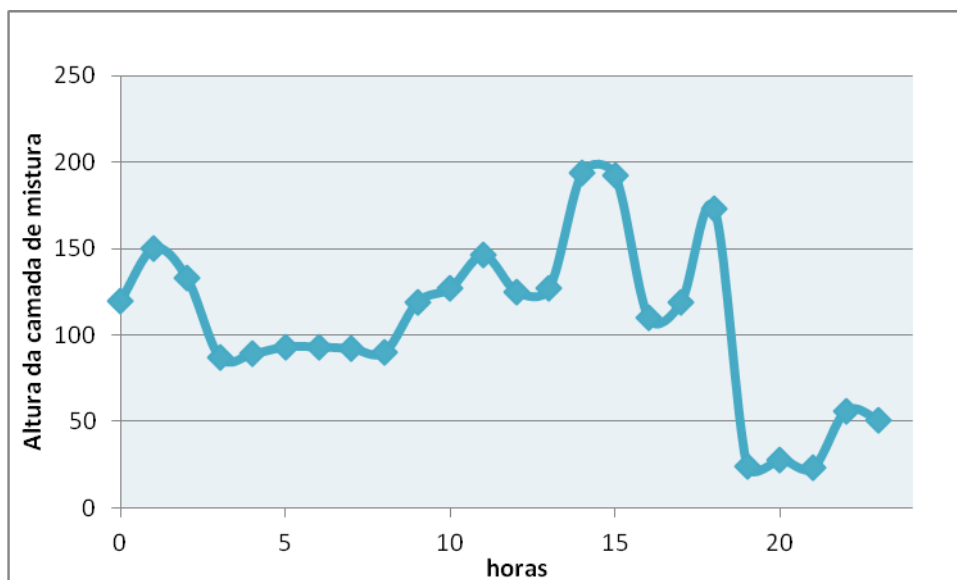


Figura 5.5 – Variação da altura da camada de mistura ao longo de um dia de simulação.

Tabela 5.5 – Exemplo de sequência de cálculos para obter valor de  $h_m$  para um dia do ano simulado (2 de Abril de 2012).

Hora	Pasquill-Gifford	Klug-Manier	$\sigma_\theta$ (°)	$\sigma\theta$ (rad)	1/L	L	$\Delta u/\Delta z$	$u^*$ (m/s)	$h_m$ (m)
0	E	2	5	0,087	0,002	500	0,212	0,269	120
1	E	2	5	0,087	0,002	500	0,330	0,335	150
2	E	2	5	0,087	0,002	500	0,315	0,296	133
3	E	2	5	0,087	0,002	500	0,130	0,194	87
4	E	2	5	0,087	0,002	500	0,219	0,222	89
5	E	2	5	0,087	0,002	500	0,251	0,298	93
6	E	2	5	0,087	0,002	500	0,267	0,321	93
7	D	3	8	0,140	-0,002	-500	0,285	0,309	92
8	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,347	1,746	90
9	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,238	1,195	119
10	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,365	1,838	127
11	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,339	1,705	146
12	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,386	1,940	125
13	B	4	14	0,244	-0,010	-100	0,429	2,160	127
14	B-C	4	17,5	0,305	-0,016	-63	0,394	2,140	194
15	B-C	4	17,5	0,305	-0,016	-63	0,385	2,092	192
16	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,410	2,063	110
17	C	4	14	0,244	-0,010	-100	0,260	1,307	119
18	C	3	8	0,140	-0,002	-500	0,206	0,230	173
19	D	1	3	0,052	0,006	167	0,002	0,094	24
20	F	1	3	0,052	0,006	167	0,007	0,109	28
21	F	1	3	0,052	0,006	167	0,017	0,088	23
22	F	1	3	0,052	0,006	167	0,233	0,218	56
23	F	1	3	0,052	0,006	167	0,237	0,199	51

## 5.4 RESULTADOS DO MODELO AUSTAL2000

Reunidos todos os dados de entrada, aplicou-se o modelo AUSTAL2000, de acordo com as condições descritas no ponto anterior. Os resultados da sua aplicação permitiram obter a distribuição espaço - temporal das concentrações de PM10 e NO<sub>2</sub> na área em estudo e comparar os valores estimados com as medições disponíveis na estação de monitorização de qualidade do ar localizada na Escola Secundária José Estevão, em Aveiro.

### 5.4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS VALORES DE CONCENTRAÇÃO

A figura 5.6 apresenta a distribuição espacial dos valores de concentração média anual de PM10 e NO<sub>2</sub>, no domínio de simulação.

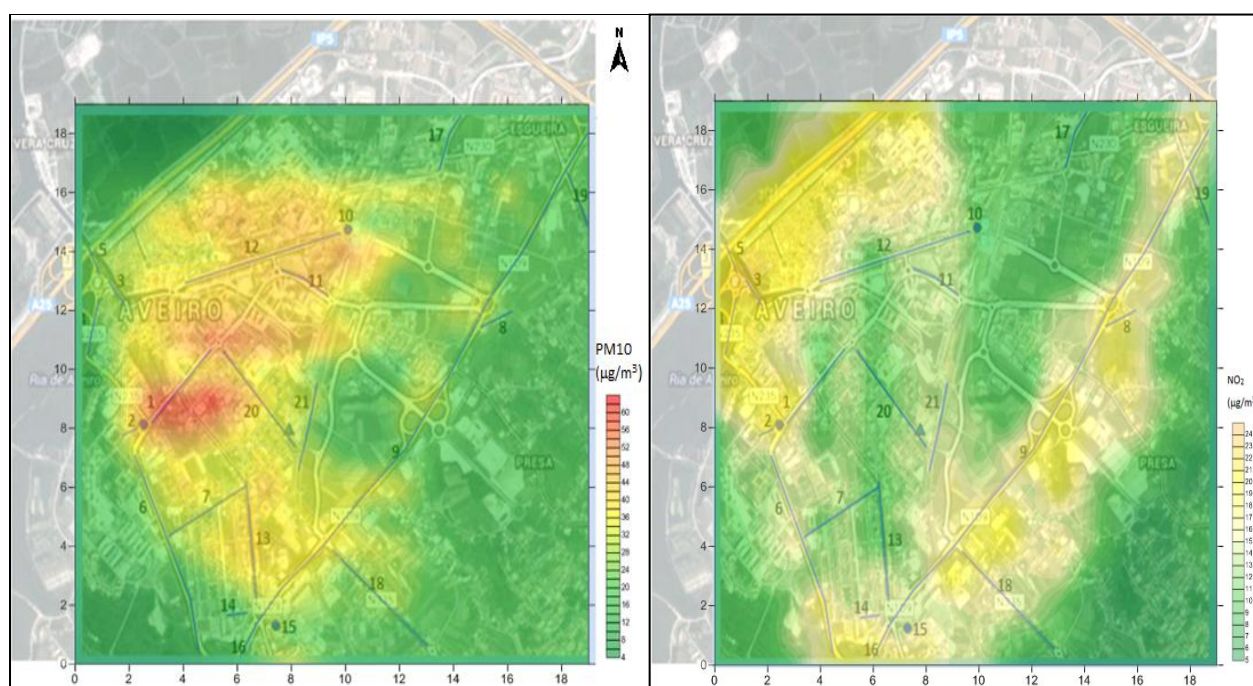


Figura 5.6 – Distribuição espacial das concentrações médias anuais ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) de PM10 e NO<sub>2</sub>, respetivamente, no domínio de simulação.

Pela análise da figura 5.6 verifica-se que, de um modo geral, os poluentes apresentam uma distribuição espacial em concordância com o histórico de emissões já analisadas. A distribuição espacial das PM10 indica concentrações mais elevadas em torno do meio mais urbano da cidade, designadamente, entre as vias da Estação\Avenida Dr. Lourenço Peixinho, as zonas do Hospital, Avenidas Artur Ravara, 25 de Abril, Dr. Mário Sacramento até à zona de acesso ao Centro Comercial Glicínias. De salientar a via Avenida Dr. Lourenço Peixinho pela circulação bastante afluyente, de forte atração turística e comercial. Estudos de modelação de qualidade do ar anteriormente realizados [Borrego *et al.*, 2011] revelaram maior acumulação de PM10 do lado norte da Avenida, indicando, portanto, maior exposição humana aos poluentes atmosféricos do lado Norte, correspondente a uma zona de forte confluência de tráfego automóvel.

Relativamente ao NO<sub>2</sub>, o AUSTAL2000 estimou valores de concentração relativamente baixos. Os maiores valores de concentração observam-se junto aos acessos de maior tráfego rodoviário, nomeadamente nas imediações da autoestrada A25, da EN109 e EN235 (Avenida da Universidade).

Analisando os valores de concentração simulados à luz da legislação em vigor, verifica-se que ambos os poluentes cumprem os limites estabelecidos de VL anual. Segundo o Decreto-Lei 102/2010, o valor limite anual para proteção da saúde humana é de 40 µg/m<sup>3</sup>. A média anual para NO<sub>2</sub> registada foi de 13,6 µg/m<sup>3</sup>, sendo bastante inferior ao valor limite decretado e não registando nenhuma excedência a este valor. Da simulação às PM10 obteve-se uma média anual de 32 µg/m<sup>3</sup>, embora este poluente tenha registado em 23 células do domínio (20x20 células) excedências ao valor limite legislado, havendo ainda registos muito próximos dos 40 µg/m<sup>3</sup>.

#### 5.4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS COM OS VALORES MEDIDOS PELA ESTAÇÃO DE MONITORIZAÇÃO

Segundo os dados publicados pela APA, as medições efetuadas na Avenida 25 de Abril, para o ano 2012, registam concentrações médias anuais de 24,7 µg/m<sup>3</sup> para NO<sub>2</sub> [6] e 35 µg/m<sup>3</sup> para PM10 [7]. A estação de monitorização de qualidade do ar de Aveiro, assinalada com um ▲ na Figura 5.6, permite comparar os resultados simulados com as medições efetuadas (tabela 5.6)

Tabela 5.6 – Comparação das médias anuais medidas e estimadas de PM10 e NO<sub>2</sub>.

Poluente	Média Anual (µg.m <sup>-3</sup> )		%Erro (EQMN)*	Diretiva-Quadro 2008/50/EC
	Medida	Simulada		% Incerteza do modelo
PM10	35	32	8	50
NO <sub>2</sub>	24,7	13,6	36,7	50

De um modo geral, o modelo gerou concentrações mais baixas que as medidas pela estação de qualidade do ar, sendo esta diferença mais acentuada nas concentrações de NO<sub>2</sub>, onde se verifica que os valores simulados são cerca de metade dos valores medidos.

O valores obtidos para o erro foram calculados com base na equação do Erro Quadrático Médio Normalizado (EQMN\*).

$$EQMN = \frac{(C_o - C_p)^2}{C_o \times C_p}$$

Sendo C<sub>O</sub> e C<sub>P</sub> as concentrações observadas e simuladas.

O Erro Quadrático Médio (EQM) e o Erro Quadrático Médio Normalizado (EQMN) dão informação sobre os erros associados aos pares de valores observados-simulados, mas o EQM tem em conta a gama de valores da variável em questão, o que pode levar a interpretações incorretas dos resultados. Assim, a forma normalizada do EQM (EQMN) pode ser mais adequada em alguns casos [Ferreira, 2007].

---

Pode-se concluir desta análise que o modelo sobrestimou as concentrações de PM10 visto estas apresentarem-se tão próximas dos valores medidos pela estação. Relativamente ao NO2, o modelo subestimou as suas concentrações visto os valores simulados serem muito inferiores aos medidos.

Ainda assim, os resultados obtidos, média anual, podem ser considerados como uma base aceitável para a estimativa da exposição populacional na cidade de Aveiro.

## 6 ESTIMATIVA DA EXPOSIÇÃO POPULACIONAL

Dado o objetivo deste trabalho ser a avaliação da exposição a poluentes atmosféricos na cidade de Aveiro, desenvolveu-se uma metodologia de cálculo para obter a exposição da população aos poluentes selecionados, com base nos valores estimados pelo modelo de qualidade do ar.

A exposição humana depende essencialmente dos padrões ocupação-tempo da população e da concentração em cada microambiente. No entanto, estes dois fatores sofrem influência de outras condicionantes, tais como o período de tempo e o tipo de população a considerar (idade, atividade profissional, localização geográfica. Devido à falta de informação disponível muitas destas condições são difíceis de ponderar, especialmente quanto maior for o número de indivíduos, sendo necessário assumir considerações e simplificações, que facilitam a formulação para a estimativa da exposição.

A abordagem adotada corresponde a uma avaliação genérica da exposição, visto não incluir dados pormenorizados dos padrões de ocupação-tempo da população aveirense. Consiste, portanto, numa estimativa da exposição aos poluentes, onde se cruzam dados das concentrações no exterior com informação mais geral sobre a população, assumindo alguns pressupostos.

### 6.1 METODOLOGIA

Para proceder ao cálculo da exposição populacional foram necessários dados sobre as concentrações estimadas no ar ambiente, a relação concentração exterior e concentração interior para cada microambiente e a distribuição da população por cada microambiente.

Em termos operacionais, os resultados do modelo de qualidade do ar são multiplicados por um fator, obtendo-se as respetivas concentrações interiores, para cada microambiente e para cada poluente. Com a estimativa da população em cada microambiente obtém-se os valores de exposição populacional. Além do espaço exterior, foram considerados os microambientes “residência” e “outros interiores”, estando neste último incluídos espaços como locais de trabalho, escola, centros comerciais e restaurantes. As concentrações dos microambientes interiores, apresentadas na tabela 6.1, são calculadas através de relações empíricas da bibliografia resultantes de campanhas experimentais de medições (tabela 6.1) e já aplicados por Ferreira [2007]. A utilização de relações empíricas I/E para cálculo de concentrações em espaços interiores, para utilização em estudos de exposição, é uma prática frequente [Ferreira, 2007].

Tabela 6.1 - Relações empíricas I/E para NO<sub>2</sub> e PM10 para dois microambiente distintos [Baek *et al.*, 1997; USEPA, 1997a; Monn, 2001; Gulliver & Briggs, 2004; Wu *et al.*, 2005; Ferreira, 2007]. As relações são válidas para concentrações em µg.m<sup>-3</sup>.

Poluente	Microambiente	
	Residência	Outros interiores
NO <sub>2</sub>	$C_{int} = 0,5 C_{ext}$	$C_{int} = 0,7 C_{ext}$
PM10	$C_{int (dia)} = 48 + 0,51 C_{ext}$	$C_{int (dia)} = 41 + 0,51 C_{ext}$
	$C_{int noite} = 20 + 0,52 C_{ext}$	$C_{int noite} = 17 + 0,52 C_{ext}$

A distribuição da população aveirense por microambiente considerado baseou-se nos dados disponíveis no Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro, os quais são coincidentes com os do INE. Mais uma vez é pertinente realçar que esta foi uma abordagem “grosseira”, não incluindo detalhes dos padrões de atividade da população.

Recorreu-se à informação disponibilizada pelo INE relativa ao número de habitantes por freguesia, para as freguesias incluídas na área em estudo: Glória e Vera Cruz, e ainda uma pequena parcela de território das freguesias de Esgueira e Santa Joana. O método utilizado consistiu em detalhar a população por freguesia, conforme a sua distribuição no domínio de simulação. Com base na informação disponibilizada no PMMA, assumiu-se que seria utilizado o número total de habitantes presentes nas freguesias de Glória e Vera Cruz, que correspondem aos valores dos CENSOS 2011, visto a área em estudo incluir quase na sua totalidade a zona urbana e habitacional destas freguesias. As imediações não incluídas na área em estudo correspondem sobretudo a parcelas de território da ria de Aveiro ou meio rural, sendo que o número de habitantes presentes nestas não interfere significativamente na média anual de exposição. Para as restantes freguesias, e analogamente baseada na informação disponível, assumiu-se que a população de Esgueira e Santa Joana corresponderia, neste área, a 10% e 20%, respetivamente, do número total de habitantes presentes nessa freguesia. A Figura 6.1 e a Tabela 6.2 apresentam, respetivamente, a divisão do domínio de simulação por freguesia bem como a distribuição da população pela área em estudo.

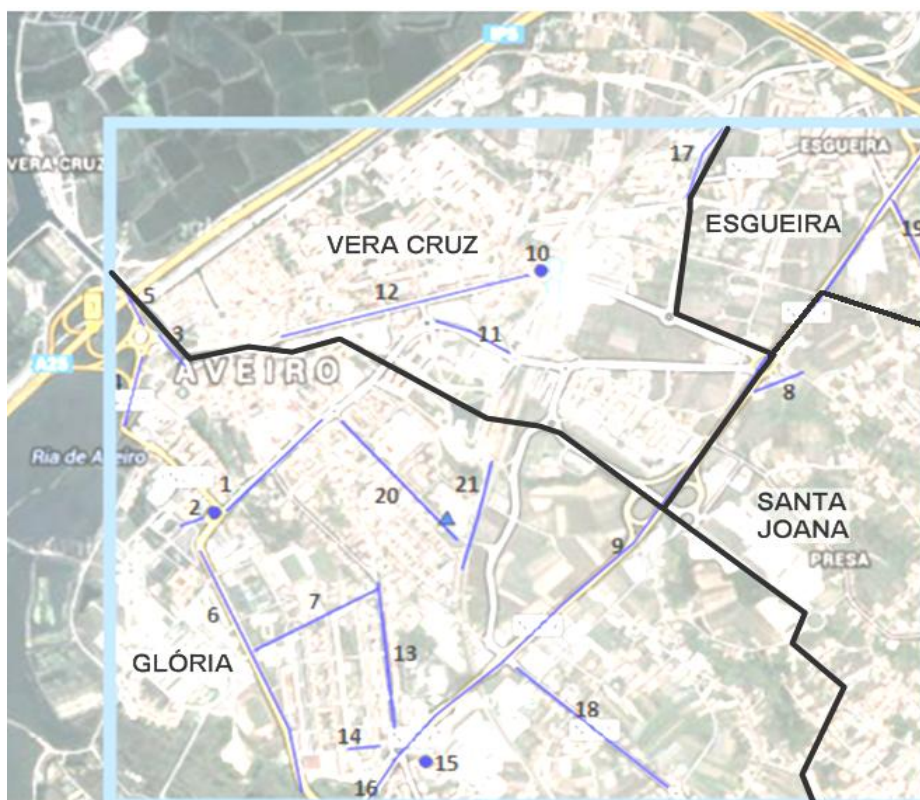


Figura 6.1 – Divisão do domínio de simulação em freguesias.



Tabela 6.2 – Distribuição da população pela área em estudo.

Freguesias	População presente total	Nº aproximado de células de cálculo	Nº aproximado <b>pop/célula</b>	Área aproximada (m <sup>2</sup> )
Glória	12561	191	65,76	3935783
Vera Cruz	9271	111	83,52	1989038
Esgueira	12772	42	30,41	945548
Sta Joana	7756	56	27,70	1229274

A população foi distribuída por uma malha de 100m x 100m igual à utilizada no modelo de qualidade do ar. Devido a falta de informação disponível, assumiu-se homogeneidade da população por células. É pertinente reafirmar que esta distribuição não inclui detalhes dos padrões de atividade da população. A relação *indoor/outdoor* foi adquirida com base em dados sociodemográficos do PMMA possíveis de serem incluídos na área do domínio de simulação, conciliando com uma análise atenta ao mapa do domínio para distinguir espaço exterior e interior.

## 6.2 RESULTADOS DO CÁLCULO DA EXPOSIÇÃO POPULACIONAL

Após a aplicação da metodologia descrita previamente obteve-se a média de exposição populacional para NO<sub>2</sub> e PM10 para o ano de 2012. Os cálculos foram realizados para cada poluente isoladamente, sendo os resultados apresentados sob a forma de valores médios anuais por habitante. Para o caso das PM10, a análise foi feita separadamente para dia e noite.

A exposição anual da população por habitante para cada poluente analisado é apresentada seguidamente (Figuras 6.2 e 6.3). Esta grandeza não é diretamente proporcional ao risco para a saúde humana de cada indivíduo, serve apenas como indicador das áreas em que a saúde humana poderá ser mais atingida, em termos de número de pessoas afetadas [Ferreira, 2007].

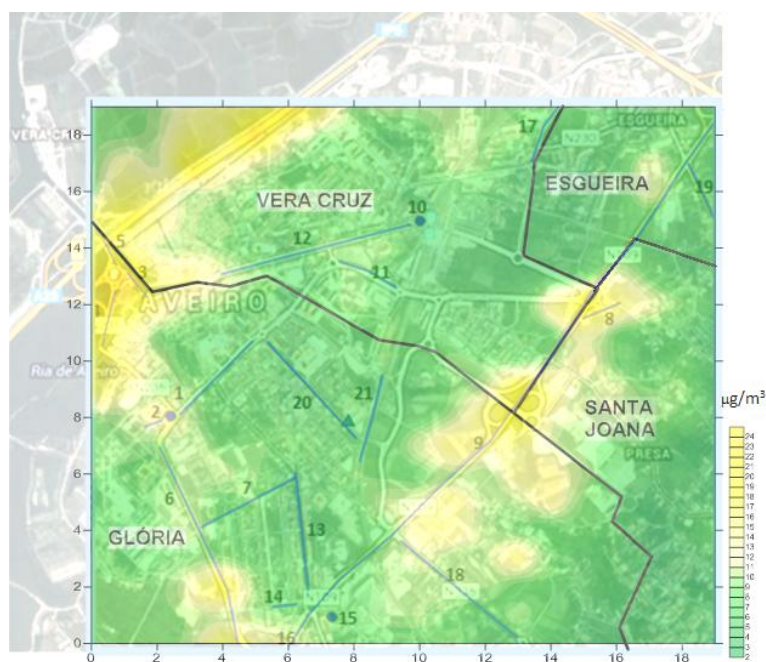


Figura 6.2 – Médias anuais de exposição humana a NO<sub>2</sub>.

Analisando a figura 6.2 verifica-se que os valores mais elevados de exposição ao  $\text{NO}_2$  encontram-se nas zonas de acessibilidades à cidade de maior tráfego rodoviário: rotunda da saída A25 com cruzamento para a Avenida Dr. Lourenço Peixinho e para a direção Universidade\Hospital, EN109 e Avenida da Universidade\EN235. Este resultado é expectável dado que são as zonas de tráfego mais intensas. Os valores estimados para a exposição ao  $\text{NO}_2$  apresentam-se numa gama baixa de concentrações, aduzindo uma possível relação a densidade populacional do domínio. Pela análise do histórico das medições a este poluente pela estação de qualidade do ar era já presumível que a exposição da população a  $\text{NO}_2$  revelasse uma situação pouco crítica ao nível da saúde humana.

Verifica-se que a freguesia da Glória é a que apresenta valores mais elevados de exposição a  $\text{NO}_2$ , pois inclui no seu território dois dos eixos com tráfego mais intenso, a EN109 e a EN235. Glória é a freguesia do domínio que revelou maior distribuição das concentrações, sendo a segunda com mais população total, apresentando assim uma relação direta para níveis superiores de exposição aos poluentes atmosféricos. A freguesia de Vera Cruz apresenta, de modo análogo, valores superiores devido ao efeito do tráfego automóvel da A25. Santa Joana induz alguma exposição mais elevada a  $\text{NO}_2$  nas imediações da 109; porém, e juntamente com Esgueira, são as duas freguesias onde se estimam os mínimos de exposição anual a este poluente. Apesar desta última ser a freguesia com maior população do domínio, a sua área não coincide na totalidade com a zona mais urbana da cidade, razão pela qual poderá não apresentar níveis de exposição tão elevados.

São apresentadas seguidamente (Figura 6.3) os resultados obtidos da estimativa da exposição populacional para o poluente  $\text{PM}_{10}$ , relativamente às médias anuais.

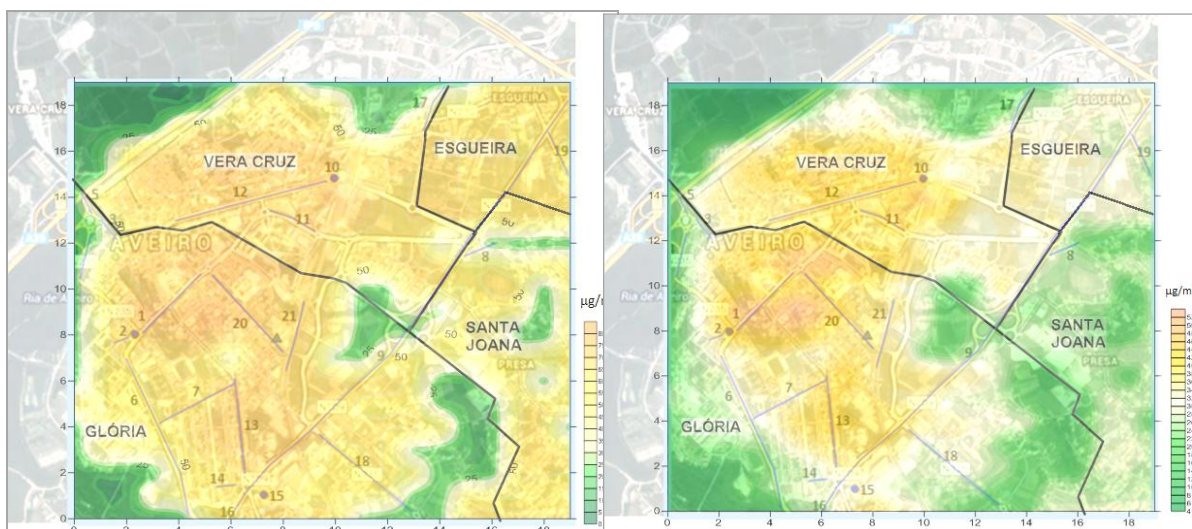


Figura 6.3 - Médias anuais de exposição humana a  $\text{PM}_{10}$ , no período diurno (à esquerda) e no período noturno (à direita).

Os resultados apresentados permitem constatar uma diferença entre a concentração e a exposição. Tal deve-se à presença das pessoas maioritariamente em espaços interiores e ao facto de as concentrações deste poluente em ambiente interior diferir das concentrações no ar exterior. Nos espaços interiores os níveis de  $\text{PM}_{10}$  são mais elevados pois existem fontes emissoras de partículas, consequentemente a exposição a  $\text{PM}_{10}$  é superior às concentrações médias anuais.

---

Verifica-se ainda que as médias anuais de exposição diária são superiores aos níveis de exposição de noite, como seria previsível visto haver bastante menos tráfego rodoviário. Consensuais com a tendência já observada, os níveis de exposição apresentam-se mais elevados nas freguesias de Glória e Vera Cruz. É nas freguesias de Esgueira e Santa Joana que se registam diferenças mais acentuadas entre a exposição média de dia e de noite. Segundo a informação disponibilizada no Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro, as zonas atravessadas pelo eixo da EN109 apresentam níveis de saturação rodoviária superiores, sendo que grande parte da população de Esgueira e Santa Joana desloca-se para a zona mais urbana da cidade para exercer as suas atividades diárias, quer a nível de emprego, escola, lazer.

Uma vez que não existem valores limite legislados para a exposição humana, a avaliação dos resultados obtidos pode passar por uma avaliação comparativa com valores estimados em simulações da bibliografia, embora não sejam representativos da população ou da área em estudo por não se basearem nos mesmos princípios. A ausência de validação dos resultados faz com que este, ou de qualquer outro estudo de modelação de exposição humana, fique incompleta. Assim sendo, é necessária uma análise cautelosa dos resultados, atendendo que este trabalho assentou numa abordagem genérica da estimativa da exposição humana.

---

## 7 CONCLUSÕES

Devido a um conjunto cada vez maior de exigências, quer a nível legislativo, quer da opinião pública, a qualidade do ar na Europa melhorou consideravelmente nas últimas décadas. Diminuíram significativamente as concentrações de muitos poluentes atmosféricos, incluindo o dióxido de azoto. No entanto, apesar destes progressos, ainda não se atingiu o nível de qualidade do ar previsto nas legislações ou desejado pelos seus cidadãos. Apesar das melhorias significativas registadas, a poluição atmosférica na Europa continua a prejudicar a saúde e o ambiente. Em particular, a poluição originada por partículas, constituindo atualmente um dos poluentes mais críticos das áreas urbanas, representando graves riscos para a saúde humana e para o ambiente.

O objetivo principal deste trabalho consistiu numa estimativa da exposição a poluentes atmosféricos da população aveirense, recorrendo para tal à modelação da qualidade do ar na cidade de Aveiro.

A consideração base passou por admitir as fontes em linha como as principais fontes emissoras no domínio de simulação, contabilizando o contributo destas para o aumento das concentrações atmosféricas, em função do regime de ventos e da estabilidade atmosférica. A metodologia adotada consistiu em quantificar as emissões provenientes do tráfego rodoviário, de PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub>, a fim de estimar as suas concentrações na região analisada, considerando as condições meteorológicas e topográficas da área. O cálculo destas esteve limitado à informação disponível, pelo que foram assumidos alguns pressupostos.

A simulação das concentrações foi circunscrita a um domínio, a um período de tempo e pelas condições requeridas pelo modelo de qualidade do ar aplicado em estudo, o AUSTAL2000. A seleção deste modelo assentou nas evidências do seu bom desempenho em estudos já realizados, na sua adequação à caracterização do caso de estudo em análise, na não complexidade dos dados de entrada e também na sua disponibilidade gratuita. Com a escolha do AUSTAL2000, um modelo lagrangeano, não se seguiu a tendência de recorrer a modelos gaussianos para simular a dispersão de poluentes à escala local. O trabalho desenvolvido permitiu compreender o esforço computacional exigido por um modelo lagrangeano, requerendo um trabalho aplicado e cuidado, e ajustes que podem comprometer a qualidade dos seus resultados.

As concentrações estimadas de PM<sub>10</sub> apresentaram-se próximas das concentrações medidas na estação de monitorização. Não sendo usual esta proximidade de valores entre a monitorização e a modelação, os resultados levam a crer que o modelo sobrestimou as PM<sub>10</sub>. No que diz respeito às concentrações estimadas de NO<sub>2</sub>, estas apresentam níveis máximos nos locais previsíveis, embora se denote que o modelo subestimou este poluente pois estimou níveis muito abaixo comparativamente às concentrações medidas.

Apesar destas restrições, os resultados do AUSTAL2000 e o erro obtido indicam um apresentaram resultados de gama aceitável pela DQ. No então, a simulação de qualidade do ar apresenta falhas que poderão estar relacionadas com um desempenho inferior devido à resolução grosseira dos dados de entrada.

A metodologia necessária para garantir a viabilidade do modelo passaria por obter outros pontos de comparação para além da estação de monitorização da cidade, visto esta

---

também estar sujeita a erros nos registos. Só deste modo seria adequado formular conclusões sobre o desempenho do modelo.

No que concerne ao cálculo da exposição da população aos poluentes atmosféricos, embora esta se baseie numa abordagem grosseira de estimativa, crê-se que os resultados apresentam alguma coerência. Indicam que a população aveirense está mais susceptível à exposição a PM10, dado que é um poluente que atinge níveis elevados no ambiente exterior, e ainda mais elevados em ambientes interiores, devido à contribuição adicional das fontes interiores.

Como sugestões de trabalho futuro, seria uma mais valia investir recursos para melhorar os estudos de exposição humana a poluentes atmosféricos, elaborar uma descrição e quantificação mais detalhada dos microambientes avaliados, conseguir uma validação dos resultados estimados, para que se torne uma ferramenta mais credível e representativa da realidade. Para esta melhoria seria fundamental realizar campanhas de medição direta da exposição humana da população, representativa do caso de estudo, bem como realizar inquéritos que forneçam uma informação mais vasta sobre a população e as suas atividades ao longo do tempo. Para avaliar o impacte efetivo da exposição a poluentes atmosféricos na saúde humana será necessário incluir uma componente médica, o cálculo da dose de poluente inalada pelo organismo humano e em que condições provoca doença. Uma coletânea de informação sobre a afluência a hospitais e centros de saúde, diagnósticos e internamentos por patologias seria uma contribuição crucial nos estudos dos efeitos agudos e crónicos da poluição atmosférica na saúde humana.

*«Ainda há grandes desafios para a saúde humana resultantes da má qualidade do ar. Estamos ainda muito longe do nosso objetivo de atingir níveis de qualidade do ar que não causem impactes negativos significativos para a saúde humana e o ambiente»*

Janez Potocnik, Comissário Europeu para o Ambiente

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA – Base de dados Online da Qualidade do Ar (QualAr) [8].

APA – Inventário Nacional - INERPA (2008) Relatório Emissões totais por concelho [9].

Bessagnet, B., Hodzic, A., Vautard, R., Beekmann, M., Cheinet, S., Honore, C., Liousse, C. e Rouil, L. (2004). "Aerosol modelling with CHIMERE – Preliminary evaluation at the continental scale." *Atmospheric Environment*, 38, (18), p. 2803- 2817.

Borrego, C., Tchepel, O., Barros, N., Miranda, A. I. (2000) Impact of road traffic emissions on air quality of the Lisbon region; *Atmospheric Environment*.

Borrego, C., Miranda, A. I., Coutinho, M., Costa, A. M., Gomes, P. e Ribeiro, C. (2001). - The Impact of Road Traffic on the Urban Air Quality: a Modelling and an Experimental Approach;. Proc. 7th International Conference on Environmental Science and Technology. University of Aegean, Global Nest, T.D. Lekkas.

Borrego, C.; Miranda, A.I.; Monteiro, A.; Coutinho, M.; Ribeiro, C. (2003)- Previsão e avaliação da qualidade do ar em Portugal - A Modelação da qualidade do ar à escala de Portugal Continental. Relatório R3, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Borrego C., Miranda A.I., Tchepel O. (2003): TREM Transport Emission Model for Line Sources: Methodology, Deliverable D04.1 of SUTRA Project (EVK4-CT-1999-00013). Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. AMB-QA-09/03, Aveiro, Portugal.

Borrego, C.; Tchepel, O.; Costa, A. M.; Martinsa, H.; Ferreira, J.; Miranda, A. I. (2006)- Traffic-related particulate air pollution exposure in urban áreas, *Atmospheric Environment*, pp.7205-7214.

Borrego, C.; Miranda, A.I.; Martins, H.; Ferreira, J. – Elaboração de Planos e Programas de Ação para a melhoria da qualidade do ar na região Norte. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portuga, Março 2006. Estudo Realizado no âmbito do protocolo de colaboração com a CCDR-Norte.

Borrego C., Neuparth N., Carvalho A.C., Carvalho A., Miranda A.I., Costa A.M., Monteiro A., Martins H., Correia I, Ferreira J., Amorim J.H., Martins J., Pinto J.R., Santos J., Silva J.V., Valente J., Simões L., Lopes M., Tchepel O., Cascão P., Lopes da Mata P., Martins P., Santos P., Tavares R., Nunes T., Martins V. (2008) - Projeto Saudar – “A saúde e o ar que respiramos” - Um caso de estudo em Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian, 1ª Edição, Lisboa.

Borrego, 2013 – Conferência “Ar de Qualidade para uma saúde melhor”, TWAM 2013, Internacional Conferences&Workshops, Aveiro.

Builtjes, P., Walker, S. E., Pregger, T., Borrego, C. e Schaap, M. (2006). - First recommendations for best methods and techniques for conducting air quality assessment at

---

regional/continental scale. Air4EU: Air Quality Assessment for Europe: from local to continental scale.

Castro, H.A.; Gouveia, N.; Cejudo, J.A.E. - Questões Metodológicas para a Investigação dos Efeitos da Poluição do Ar na Saúde, Revista Brasileira de Epidemiologia, (2003) pp.135-149.

Castro, F. (2011) – Avaliação da Qualidade do ar na Cidade de Santarém. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro.

Dabberdt, W. F., Carroll, M. A., Baumgardner, D., Carmichael, G., Cohen, R., Dye, T., Ellis, J., Grell, G., Grimmond, S., Hanna, S., Irwin, J., Lamb, B., Madronich, S., McQueen, J., Meagher, J., Odman, T., Pleim, J., Peter, H. e Westphal, D. L. (2004). - "Meteorological Research Needs for Improved Air Quality Forecasting: Report of the 11th Prospectus Development Team of the U.S. Weather Research Program.", p. 563-586.

Decreto-Lei n.º 111/2002, de 16 de Abril, estabelece os valores limite e os limiares de alerta para as concentrações de dióxido de enxofre, o dióxido de azoto e os óxidos de azoto, as partículas em suspensão, o chumbo, o benzeno e o monóxido de carbono no ar ambiente, bem como os métodos e critérios de avaliação das respetivas concentrações e normas sobre informação do público.

Decreto-Lei nº 118/2013, de 20 de Agosto, aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Diretiva1996/62/CE, do Conselho, de 27 de Setembro, Diretiva-Quadro relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente.

Diretiva 1999/30/CE, de 22 de Abril, relativa a valores–limite para o dióxido de enxofre, dióxido de azoto e óxidos de azoto, partículas em suspensão e chumbo no ar ambiente.

Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

EEA – *European Environment Agency* - Air quality in Europe - 2012. Report 4/2012 (O ambiente na Europa: quarta avaliação – Sumário Executivo). Belgrado, 2007 [10].

EEA – *European Environment Agency* - Sinais Ambientais 2013. Agência Portuguesa do Ambiente. Serviço das Comunicações Oficiais das Comunidades Europeias. EEA, Copenhaga, 2013.

Essa, K. S. M., Embaby, M. M., Kozae, A. M., Mubarak, F., Kamel, I. (2006) - Estimation of Seasonal Atmospheric Stability and Mixing Height by Using Different Schemes; VII Radiation Physics & Protection Conference; Beni Sueif – Fayoum, Egipto.

Ferreira, J. (2007) – Relação Qualidade do Ar e Exposição Humana a Poluentes Atmosféricos. Tese apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente.

---

Graff, A. (2002) The New German Regulatory Model – A Lagrangian Particle Dispersion Model; 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Sofia.

Hertel, O.; De Leeuw, F.; Raaschou-Nielsen, O.; Jensen, S.; Gee, D.; Herbarth, O.; Pryor, S.; Palmgren, F.; Olsen, E. - Human exposure to outdoor air pollution – IUPAC Technical Report, Pure Applied Chemistry, (2001) p. 933-958.

Hurley, P., Physick, W. L., Luhar, A. K. E. e Edwards, M. (2005). "The Air Pollution Model (TAPM) Version 3, CSIRO – Marine and Atmospheric Research”.

IARC – *International Agency for Research on Cancer* - Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, Press Release nº 221, 17 de Outubro de 2013.

INE – Instituto Nacional de Estatística (2012) – População por freguesia no concelho de Aveiro.

ISP – Instituto de Seguros de Portugal. Parque Automóvel Seguro [11].

Janicke Consulting (2009) AUSTAL2000 Program Documentation of Version 2.4; Federal Environmental Agency; Berlim.

Miranda, A. (2013) – Qualidade do ar com fator de risco para a saúde humana. Seminário Gestão Territorial do Risco na Região Centro.

Monteiro, A. (2003). Poluição atmosférica na região de Aveiro: modelação de mesoscala e sua validação. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestrado em Poluição Atmosférica.

Monteiro, A. (2007). - Desenvolvimento de um sistema de avaliação e previsão da qualidade do ar para Portugal. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutoramento em Engenharia do Ambiente.

Monn, C. - Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone. *Atmospheric Environment*, (2001) p. 1-32.

Muller, W., Janicke, U. (2007). - Experiences with the German Regulatory Model AUSTAL2000 in Germany and in other Countries in the Framework of EU Twinning Projects. Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes; Cambridge.

Plano Estratégico do Concelho de Aveiro (2009) – Relatório Intermédio, PR00605.

Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro (2012) – Relatório de Caracterização e Diagnóstico.

Poupard, O.; Blondeau, P.; Lordache, V.; Allard, F. – Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools, *Atmospheric Environment*, (2005) p. 2071-2080.



---

Righi, S., Lucialli, P. e Pollini, E. (2009). - "Statistical and diagnostic evaluation of the ADMS-Urban model compared with an urban air quality monitoring network." Atmospheric Environment.

RQA, 2011. Relatório da Qualidade do Ar da Região de Aveiro [12].

Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2006). - Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, Inc.; New York.

Sexton K.; Ryan, P.B. - Assessment of Human Exposure to Air Pollution: Methods, Measurements and Models. Air Pollution, the Automobile and Public Health, A. Y. Watson, R. R. Bates, D. Kennedy, p. 207–238, National Academic Press, Washington, DC. 1988.

Silva R. (2009) - Modelação das Emissões Atmosféricas Associadas aos Transportes no Município de Leiria. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade do Aveiro.

TALuft – Technical Instructions on Air Quality Control (2002) First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Immission Control Act [13].

Tesche, T. W., Morris, R., Tonnesen, G., McNally, D., Boylan, J. e Brewer, P. (2006). "CMAQ/CAMx annual 2002 performance evaluation over the eastern US" Atmospheric Environment.

TREM guide book, Relatório Técnico, 2007, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

USEPA - Air Quality Criteria for Particulate Matter, v.1, 1997.

Valério, M. (2010) – Critérios de Sustentabilidade na Ocupação Urbana – Caso de Estudo na Cidade de Aveiro. Tese apresentada à Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território.

WHO - World Health Organization - The health effects of indoor air pollution exposure in developing countries. World Health Organization, Genève, 2013.

WHO, 2012 – Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. World Health Organization, Copenhagen, 2000. ISBN 92 890 1358 3

## Webgrafia

[1] [http://www.who.int/topic/air\\_pollution/en/](http://www.who.int/topic/air_pollution/en/)

[2] <http://www.iarc.fr/en/publications/books/sp161/index.php>

[3] <http://www.weblakes.com/>

[4] [www.austal2000.de](http://www.austal2000.de)

[5] <http://populacaodistritodeaveiro.jimdo.com/>

- 
- [6] <http://qualar.apambiente.pt/index.php?page=4&subpage=4>
- [7] <http://qualar.apambiente.pt/index.php?page=4&subpage=4>
- [8] <http://www.qualar.org>
- [9] <http://www.apambiente.pt/politicambient/Ar/InventarioNacional/Paginas/default.aspx>
- [10] <http://www.eea.europa.eu/>
- [11] <http://www.isp.pt/NR/exeres/7D383D46-9431-416E-98C7-395B0A9E7080.htm>
- [12] <http://sig.cm-aveiro.pt/ambiria/>
- [13] [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft\\_engl.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft_engl.pdf)

## ANEXOS

### I. Dados da frota automóvel

Tabela I.1 - Estrutura da frota automóvel por tipo de tecnologia para veículos ligeiros. Adaptado do Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro, Quadro 2.9, Caracterização das frotas.

Combustível	Diesel		Gasolina			Híbrido	GPL	Total
	<2,0 l	>2,0 l	<1,4 l	1,4-2,0 l	>2,0 l	1,4-2,0 l		
<b>Tecnologia\Cilindrada</b>								
ECE 15/04/Convencional (<1992)	15	10	93	0	50			168
Euro 1 - 91/441/EEC (1992-1996)	474	202	2416	128	927		0	4147
Euro 2 - 94/12/EEC (1996-2000)	2895	775	6536	75	1217		0	11498
Euro 3 - 98/69/EC (2000-2005)	5413	1265	4022	50	583		0	11333
Euro 4 - 98/69/EC (2005-2010)	3792	849	1553	17	206	78	293	6788
Euro 5 - EC 715/2007 (>2010)	2914	684	1316	19	198		0	5131
<b>Total</b>	<b>15503</b>	<b>3785</b>	<b>15936</b>	<b>289</b>	<b>3181</b>	<b>78</b>	<b>293</b>	<b>39065</b>
% Combustível/Cilindrada	39,7%	9,7%	40,8%	0,7%	8,1%	0,2%	0,8%	
%Combustível	49,4%		49,7%			0,2%	0,8%	

Tabela I.2 - Estrutura da frota automóvel por tipo de tecnologia para veículos pesado. Adaptado do Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro, Quadro 2.10, Caracterização das frotas.

Tecnologia\Cilindrada	<= 7,5 t	7,5-20 t	20-32 t	>32 t	Total
ECE 15/04/Convencional (<1992)	347	156	156	48	707
Euro 1 - 91/441/EEC (1992-1996)	96	44	42	13	195
Euro 2 - 94/12/EEC (1996-2000)	138	62	63	19	282
Euro 3 - 98/69/EC (2000-2005)	92	44	45	16	197
Euro 4 - 98/69/EC (2005-2010)	12	8	9	5	34
Euro 5 - EC 715/2007 (>2010)	31	20	27	13	91
<b>Total</b>	<b>716</b>	<b>334</b>	<b>342</b>	<b>114</b>	<b>1506</b>
<b>%</b>	<b>48%</b>	<b>22%</b>	<b>23%</b>	<b>8%</b>	

Tabela I.3 – Estrutura da frota de autocarros da MoveBus por classes e tecnologia (com base na idade) do veículo (adaptado do Plano Municipal de Mobilidade de Aveiro, Quadro 2.11, Caracterização das frotas).

Tecnologia \Classe do veículo	Articulados	Mini	Diesel	GNC	Total
Convencional (<1992)	0	0	28		28
Euro I - 91/441/EEC Stage I (1992-1996)	5	0	0	0	5
Euro II - 91/542/EEC Stage II (1997-2000)	2	4	0	0	6
Euro III - 2000 (2001-2005)	0	8	0	3	11
Euro IV - 2005 (2006-2009)	0	0	0		0
Euro V - 2008 (>2010)	0	2	0		2
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>	<b>3</b>	<b>52</b>
<b>%</b>		<b>13%</b>	<b>27%</b>	<b>54%</b>	<b>6%</b>

## II. Dados Meteorológicos

Tabela II.1 – Identificação dos dados para o ficheiro meteorológico (Adaptado de Janicke Consulting, 2009).

Dados	Significado	Posição	Intervalo de valores
KENN	Base de dados ID	1 bis 2	AK
STA	Estação ID	4 bis 8	00001 – 99999
Jahr	Ano	10 bis 13	1800 - 2...
MON	Mês	15 bis 16	1 – 12
TAG	Dia	18 bis 19	1 – 31
STUN	Hora	21 bis 22	0 – 23
NULL	Zeros	24 bis 25	0
QDD	Qualidade do byte (direção do vento)	27	0, 1, 2, 9
QFF	Qualidade do byte (velocidade do vento)	29	0, 1, 2, 3, 9
DD	Direção do vento	31 bis 33	0 - 360, 999
FF	Velocidade do vento	35 bis 37	0 – 999
QB	Qualidade do byte	39	0 - 5, 9
KM	Classe de estabilidade Klug/Manier	41	1 – 7,9
QB	Qualidade do byte	43	0, 1, 9
HM	Altura da camada de mistura	45 bis 48	0 – 9999
QB	Qualidade do byte	50	0 – 5,9

### Ficheiro Meteorológico:

\* AKTERM-Zeitreihe, Deutscher Wetterdienst, Offenbach (KB1A)  
 \* Zeitraum 01/2012 bis 12/2012  
 \* anonymisierte Daten, Stand: 11.04.2014  
 + Anemometerhoehen (0.1 m): 32 41 57 74 98 144 200 244 283  
 AK 10999 2012 01 01 00 00 1 1 141 1 1 3 1 .96 9  
 AK 10999 2012 01 01 01 00 1 1 132 2 1 3 1 191 9  
 AK 10999 2012 01 01 02 00 1 1 125 2 1 3 1 205 9  
 AK 10999 2012 01 01 03 00 1 1 132 2 1 3 1 214 9  
 AK 10999 2012 01 01 04 00 1 1 155 2 1 3 1 217 9  
 AK 10999 2012 01 01 05 00 1 1 201 1 1 3 1 113 9  
 AK 10999 2012 01 01 06 00 1 1 169 2 1 3 1 168 9  
 AK 10999 2012 01 01 07 00 1 1 169 1 1 3 1 123 9  
 AK 10999 2012 01 01 08 00 1 1 204 1 1 3 1 137 9  
 AK 10999 2012 01 01 09 00 1 1 149 2 1 4 1 161 9  
 AK 10999 2012 01 01 10 00 1 1 149 3 1 4 1 180 9  
 AK 10999 2012 01 01 11 00 1 1 174 2 1 4 1 102 9  
 AK 10999 2012 01 01 12 00 1 1 209 3 1 4 1 136 9  
 AK 10999 2012 01 01 13 00 1 1 219 3 1 4 1 341 9  
 AK 10999 2012 01 01 14 00 1 1 211 4 1 4 1 180 9  
 AK 10999 2012 01 01 15 00 1 1 220 4 1 4 1 173 9  
 AK 10999 2012 01 01 16 00 1 1 213 4 1 3 1 398 9  
 AK 10999 2012 01 01 17 00 1 1 199 3 1 3 1 316 9  
 AK 10999 2012 01 01 18 00 1 1 192 3 1 3 1 330 9  
 AK 10999 2012 01 01 19 00 1 1 195 3 1 3 1 336 9  
 AK 10999 2012 01 01 20 00 1 1 197 3 1 3 1 307 9  
 AK 10999 2012 01 01 21 00 1 1 180 2 1 3 1 236 9  
 AK 10999 2012 01 01 22 00 1 1 243 5 1 3 1 498 9  
 AK 10999 2012 01 01 23 00 1 1 260 3 1 3 1 293 9 (...)