



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

A Influência da Morfologia e Vegetação Urbanas na
Dispersão de Poluentes Atmosféricos.
Estudo de Caso: Avenida da Liberdade, Lisboa

Thelma Araujo Coutinho

Dissertação

Mestrado em Tecnologias Ambientais

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Paulo Gabriel Fernandes de Pinho

Janeiro 2026



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

**A Influência da Morfologia e Vegetação Urbanas
na Dispersão de Poluentes Atmosféricos.
Estudo de Caso: Avenida da Liberdade, Lisboa**

Thelma Araujo Coutinho

Dissertação

Mestrado em Tecnologias Ambientais

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Paulo Gabriel Fernandes de Pinho

Janeiro 2026

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Instituto Politécnico de Viseu, e aos professores do mestrado do Departamento de Ambiente, por todo o conhecimento partilhado, que me permitiu olhar o mundo por outras lentes. Agradeço com especial gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Gabriel Fernandes de Pinho, pela disponibilidade, incentivo, conhecimento de alto nível e pelo acompanhamento seguro ao longo desta jornada que enriqueceu profundamente a minha visão enquanto arquiteta.

RESUMO

Este estudo analisa como a morfologia urbana e a cobertura arbórea influenciam a ventilação e a dispersão de poluentes, tendo como estudo de caso principal a Avenida da Liberdade, em Lisboa — uma avenida de tráfego intenso e densa arborização. A investigação combinou uma revisão da literatura sobre a dinâmica atmosférica em diferentes morfologias, em especial em cânions urbanos arborizados, com a análise de dados locais de NO₂ da rede de monitorização da qualidade do ar e de dados meteorológicos. Os resultados demonstram que a elevada densidade e continuidade da copa das árvores na Avenida da Liberdade, conjugadas com o seu contexto geomorfológico e urbano, limitam significativamente a ventilação horizontal e vertical e favorecem a acumulação de poluentes, com concentrações que excedem os limites legais da UE e os valores de referência da OMS. Conclui-se que o desenho urbano desempenha um papel decisivo na ventilação e dispersão de poluentes e que, assim, o planeamento urbano deve equilibrar o espaço construído com os benefícios microclimáticos da vegetação, essencial para assegurar a ventilação eficaz, compatibilizando a qualidade espacial com a qualidade do ar urbano e a saúde pública.

PALAVRAS-CHAVE

desenho urbano, planeamento urbano, qualidade do ar, dispersão de poluentes atmosféricos, morfologia urbana, vegetação urbana

ABSTRACT

This study examines how urban morphology and tree canopy coverage affect ventilation and pollutant dispersion, focusing on Lisbon's Avenida da Liberdade — a traffic-intense avenue with a dense tree canopy — as the case study. The research combines a literature review on atmospheric dynamics in urban canyons with an analysis of local NO₂ concentrations from the air quality monitoring network, together with meteorological data. The results show that the dense and continuous tree canopy of Avenida da Liberdade, combined with its geomorphological and urban context, significantly restricts both horizontal and vertical ventilation. This leads to pollutant accumulation, with concentrations exceeding EU legal limits and WHO guideline values. The study concludes that urban design plays a decisive role in pollutant dispersion. Therefore, integrated urban planning is needed to balance the built environment with the microclimatic benefits of vegetation. This balance is essential to ensure effective ventilation, safeguarding urban air quality, and reconciling spatial quality with public health.

KEYWORDS

urban design, urban planning, air quality, atmospheric pollutant dispersion, urban morphology, urban vegetation

ÍNDICE GERAL

INTRODUÇÃO	1
METODOLOGIA	2
PARTE I - CONCEITOS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
1. QUALIDADE DO AR.....	3
1.1. <i>Química atmosférica urbana</i>	3
1.2. <i>Legislação Comunitária e Nacional</i>	4
2. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	7
2.1. <i>Camada limite</i>	7
2.1.1. Padrões Atmosféricos em áreas urbanas	11
2.2. <i>Canópia Urbana e dispersão de poluentes</i>	13
2.2.1. Dispersão de poluentes num cânion urbano.....	15
2.2.2. Dispersão de Poluentes em cânions arborizados	19
PARTE II - ESTUDO DE CASO - AVENIDA DA LIBERDADE, LISBOA.....	27
3. TRÁFEGO RODOVIÁRIO E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM LISBOA	27
3.1. <i>Qualidade do ar e tráfego rodoviário na Área metropolitana</i>	28
3.1.1. Tráfego pendular e demografia - Área metropolitana de Lisboa	30
3.2. <i>Qualidade do ar e tráfego rodoviário na Cidade de Lisboa</i>	31
4. ASPETOS MORFOLÓGICOS E GEOCLIMÁTICOS DA CIDADE DE LISBOA	36
4.1. <i>Aspetos climáticos</i>	36
4.2. <i>Aspetos geomorfológicos</i>	38
4.3. <i>Morfologia urbana - rugosidade e ventilação</i>	39
4.4. <i>Densidade e rugosidade da malha urbana na área central</i>	42
5. MORFOLOGIA E QUALIDADE DO AR NA AVENIDA DA LIBERDADE	48
5.1. <i>Morfologia local</i>	48
5.2. <i>Poluição atmosférica local</i>	51
5.2.1. Análise por comparação dos dados disponíveis -	53
CONCLUSÃO FINAL.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Progresso dos poluentes das fontes para os sumidouros (recetores) através da atmosfera (extraído e adaptado Oke, 1987).	7
Figura 2 Absorção em vários comprimentos de onda pelos constituintes da atmosfera e pela atmosfera no seu todo (extraído e adaptado de Oke, 1987).	8
Figura 3 Escalas de tempo e espaço de vários fenómenos atmosféricos. A área sombreada representa o domínio típico das estruturas da camada limite (extraído e adaptado do de Oke, 1987).	9
Figura 4 Estrutura vertical da Atmosfera (extraído e adaptado de Oke, 1987).	9
Figura 5 Desenvolvimento de uma camada limite laminar sobre uma placa plana e a sua transição para o fluxo turbulento (extraído e adaptado de Oke, 1987).	10
Figura 6 Variação do perfil vertical da velocidade do vento em função da rugosidade do terreno (extraído de Borrego, 1994).	12
Figura 7 "Cúpula" urbana quando o escoamento regional está praticamente calmo (extraído e adaptado de Oke <i>et al.</i> 2017).	12
Figura 8 camada-limite interna urbana e "pluma" a jusante com escoamento regional moderado (extraído e adaptado de Oke <i>et al.</i> 2017).	12
Figura 9 Ilustração da atmosfera com a modificação urbana classificada por duas camadas (camada limite urbana e canópia urbana (adaptado de Oke, 1987).	13
Figura 10 Padrões de fluxo em torno de um edifício com arestas definidas. Vista lateral de (a) linhas de corrente e zonas de fluxo, e (b) perfis de velocidade e zonas de fluxo com o edifício com orientação ao fluxo (adaptado de Oke, 1987).	13
Figura 11 Padrões de fluxo em torno de um edifício com arestas definidas. Vista em planta de linhas de fluxo com o edifício orientado (a) ao fluxo, e (b) diagonalmente ao fluxo (adaptado de Oke, 1987).	14
Figura 12 Representação esquemática do padrão de fluxo de vento em torno de um edifício alto (adaptado de Blocken & Carmeliet, 2004).	14
Figura 13 Padrões de influência das construções no fluxo do ar (extraído de Oke, 1987).	15
Figura 14 Ilustração esquemática das condições de fluxo e dispersão em cânion sujeito a um fluxo de aproximação perpendicular (adaptado de Berkowicz, 2000).	15
Figura 15 Campo de fluxo dentro e em torno a um cânion urbano (adaptado de Gromke & Ruck, 2007).	16
Figura 16 À esquerda, a abordagem do tipo "rede de ruas" aplicada a um distrito da cidade de Lyon (França). À direita, túnel de vento configurado e o respetivo domínio numérico; A linha tracejada representa a fonte da linha (extraído de Soulhac <i>et al.</i> 2009)	17
Figura 17 Simulações por CFD do fluxo de ar em cruzamentos (extraído e adaptado de Soulhac <i>et al.</i> , 2009).	17
Figura 18 a) Vista geral da instalação do túnel de vento com a posição do desfiladeiro da rua (b) Esboço da secção transversal do cânion com uma representação qualitativa do fluxo	

bidimensional. A fonte da linha está localizada numa ranhura cortada no piso do túnel. (c) Esboço da configuração para as configurações com aquecimento da parede a favor do vento (DW). d) Coordenadas horizontais (x) e verticais (z) dos pontos onde foram medidas as curvas de varredura (extraído de Fellini <i>et al.</i> 2020).	18
Figura 19 À esquerda, linhas de corrente do campo de velocidades médias para razões de aspeito (a) $H/W = 1$, (b) $H/W = 1,5$ e (c) $H/W = 2$. À direita, concentração média do escalar passivo no interior da cavidade nas razões de aspeito (a) $H/W = 1$, (b) $H/W = 1,5$ e (c) $H/W = 2$ (extraído de Fellini <i>et al.</i> , 2020).	18
Figura 20 Efeito sobre o campo de velocidade média da rugosidade da parede na (a) parede a sotavento (UW) e (b) parede a barlavento (DW) para uma cavidade com $H/W = 3/2$. (c) Perfil vertical da velocidade horizontal média em $x = 0$ para diferentes razões de aspeito e diferentes condições das paredes: paredes lisas (linhas pontilhadas), rugosidade na parede a barlavento (linhas tracejadas) e rugosidade na parede a sotavento (linhas contínuas). (extraído e adaptado de Fellini <i>et al.</i> , 2020).	19
Figura 21 À esquerda, concentração de um escalar passivo libertado ao nível da rua numa cavidade quadrada para aquecimento diferente da parede a favor do vento: (a) $\Delta T = 0K$ (b) $\Delta T = 70K$ e (c) $\Delta T = 170K$. À direita, Concentração de um escalar passivo libertado ao nível da rua numa cavidade estreita para um aquecimento diferente da parede a favor do vento: (a) $\Delta T = 0K$, (b) $\Delta T = 70K$ e (c) $\Delta T = 170K$ (extraído de Fellini <i>et al.</i> , 2020).	19
Figura 22 Configuração do túnel de vento para o cânion urbano, escala 1:150 (adaptado de Gromke & Ruck, 2007).	20
Figura 23 As árvores foram substituídas por grelhas de metal que foram preenchidas com diferentes quantidades de enchimento de fibras (extraído de Gromke <i>et al.</i> , 2008; Gromke & Ruck, 2009).	20
Figura 24 Modelo de túnel de vento de cânion com presença de árvores de alta densidade em duas linhas paralelas ao longo do cânion. (adaptado de Buccolieri <i>et al.</i> , 2011).	21
Figura 25 À esquerda, cânion idealizado e sem árvores. À direita, cânion de rua idealizado com plantação de árvores de alta densidade. Vetores de magnitude de velocidade U/U_H obtidos a partir de simulações CFD a $z/H = 0,5$ e $z/H = 0,9$ (a), e junto à Parede A e à Parede B (b) (adaptado de Buccolieri <i>et al.</i> , 2021).	22
Figura 26 Cânion idealizado com presença de árvores de alta densidade. Vetores de magnitude de velocidade U/U_H obtidos a partir de simulações CFD a $z/H \approx 0,5$ e $z/H \approx 0,9$ (a) e junto à Parede A e à Parede B (b) (adaptado de Buccolieri <i>et al.</i> , 2011).	22
Figura 27 Vista área da cidade e modelo em escala reduzida em laboratório (extraído de Fellini <i>et al.</i> , 2022).	23
Figura 28 Medições nos cortes transversal e longitudinal (extraído de Fellini <i>et al.</i> , 2022).	23
Figura 29 Perspetiva tridimensional dos obstáculos presentes no domínio de estudo (edifícios representados a cinzento e árvores a verde e respetiva malha gerada pelo pré-processador GAMBIT (extraído de Amorim, 2003).	24

Figura 30 À esquerda, comparação dos campos verticais de concentração e de velocidade na Avenida da Liberdade obtidos com e sem (imagem superior e inferior, respetivamente) a presença de árvores. A figura representa a simulação horária das 1 às 12 h e a escala de cores é referente aos valores de concentração (em ug/m ³). À direita, pormenor dos vetores de velocidade (valores em m/s) numa zona específica do domínio onde há a ocorrência de várias recirculações de escoamento (extraído de Amorim, 2003).....	25
Figura 31 Detalhe em apenas uma área selecionada do plano de linhas de corrente horizontais a 3 m de altura e campo de concentração de CO com e sem o efeito de árvores em Lisboa. Os contornos referem-se ao período compreendido entre as 9h e as 10h. Os retângulos não preenchidos indicam blocos de árvores e o triângulo branco é a localização do estação RMQA da Av. da Liberdade (extraído de Amorim <i>et al.</i> , 2013).	26
Figura 32 Imagem de grande plano de linhas de corrente horizontais de 3 m de altura e campo de concentração de CO com e sem o efeito de árvores em Aveiro. Os contornos referem-se ao período entre as 10 e as 11 horas da manhã (extraído de Amorim <i>et al.</i> , 2013).	26
Figura 33 Vista da Avenida da Liberdade - lado poente, foto tirada em maio de 2025	27
Figura 34 Evolução dos índices anuais de PM ₁₀ , (extraído do Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar Ambiente na Região de Lisboa e Vale do Tejo CCDR, CCDR-LVT, 2024 - https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente-e-conservacao-da-natureza/qualidade-do-ar/resultados-qualidade-do-ar-regiao-de-lisboa-e-vale-do-tejo/).	28
Figura 35 Evolução do índice anual de NO ₂ , (extraído do Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar Ambiente na Região de Lisboa e Vale do Tejo, CCDR-LVT, 2024 - https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente-e-conservacao-da-natureza/qualidade-do-ar/resultados-qualidade-do-ar-regiao-de-lisboa-e-vale-do-tejo/).	29
Figura 36 AML - à direita, densidade populacional (dados do censo 2021). Hierarquia da rede viária da AML (PMMUS – AML – Relatório Técnico – Julho 2024, TML, 2024).	31
Figura 37 Localização das estações de monitorização na cidade de Lisboa (Google Earth).	32
Figura 38 Médias anuais de NO ₂ , de 2020 a 2024 nas estações RMQA na cidade de Lisboa (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).....	33
Figura 39 Concentrações médias de NO ₂ para todos os meses de 2020 em estações da Área Metropolitana de Lisboa Norte (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	33
Figura 40 Concentrações médias anuais de NO ₂ entre janeiro de 2020 e junho de 2022 em estações da Área Metropolitana de Lisboa Norte (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	34
Figura 41 Concentrações médias anuais de NO ₂ entre junho de 2022 e junho de 2025 em estações da Área Metropolitana de Lisboa Norte (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	35
Figura 42 Temperatura do ar (Normas Climatológicas 1991 a 2020, (Estação Lisboa Geofísico - IPMA).	36

Figura 43 Precipitação (Normais Climatológicas, 1991 a 2020, (Estação Lisboa Geofísico - IPMA)	37
Figura 44 Rosa-dos Ventos – Intensidade e frequência médias entre 1998 e 2018 (Estação meteorológica Gago Coutinho).	37
Figura 45 Hipsometria do território da cidade com o Valverde (Av. Liberdade) em destaque à esquerda, e à direita, a declividade do terreno a complementar a visualização.	39
Figura 46 Delimitação das áreas para as quais são definidas orientações climáticas para o ordenamento urbano (extraído de Alcoforado et al., 2006).	40
Figura 47 - O limite médio de penetração da brisa (extraído de Baltazar (2010)).	41
Figura 48 À esquerda, mapa da densidade urbana (em destaque, a avenida da Liberdade para melhor localização). À direita, rugosidade aerodinâmica (Z_0) (extraído de Correia, CML (2019) ...	42
Figura 49 Relevo e densidade urbana na área central e ribeirinha da cidade.	42
Figura 50 Relevo e densidade urbana na área central e ribeirinha da cidade (Google Earth).	43
Figura 51 À esquerda, a implantação da avenida. À direita, gradação dos declives. à direita, inserção da Avenida relativamente à topografia (Google Earth / adaptado do PUALZE/CML - 2009).	44
Figura 52 Vista do final da avenida junto à praça dos Restauradores, na direção Sul com o Rio Tejo ao fundo (Google Earth).	44
Figura 53 Vista da Av. da Liberdade desde a Praça do Marques do Pombal (Google Earth).	45
Figura 54 À esquerda, Rosa-dos-Ventos – médias de Intensidade e frequência em 2024 (Lisboa – Geofísico). À direita, Rosa de poluição 2024– Lisboa (Geofísico) / estação RMQA Av. Liberdade	45
Figura 55 Rosa de poluição 2023– Lisboa (Geofísico) / estação RMQA Av. Liberdade	47
Figura 56 Vista da região ao norte da avenida da Liberdade na direção do planalto (Google Earth).	47
Figura 57 Representação gráfica aproximada da morfologia do cânion da avenida da Liberdade (desenho realizado a partir de dados estimados sobre mapa interativo CML). As construções ao longo da avenida variam de altura, assim como, a espécie, a porosidade das copas e o número de árvores em cada linha.	48
Figura 58 Espécies arbóreas na área envolvente à estação da RMQA Av. da Liberdade (CML-Geodados).	49
Figura 59 À esquerda, uma <i>Celtis Australis</i> , espécie predominante em diversos quarteirões; e à direita, sequência de árvores da espécie <i>Platanus x hybrida</i> , que em primeiro plano, um exemplar a sobressair. (fotografado em dezembro de 2024, desde o centro da avenida, em frente à estação RMQA, à esquerda. O teatro São Jorge e o Hotel Tivoli estão à direita).	51
Figura 60 Avenida da Liberdade fotografada em maio de 2025 (Lado oposto à RMQA Av. Liberdade).	51
Figura 61 Localização da estação RMQA Avenida da Liberdade (Google Earth).	52

Figura 62 A estação RMQA Av. Liberdade à esquerda, fotografada na primavera. À direita, sobre a estação, o teto de céu possível por entre a canópia formada pelas copas das árvores e da palmeira <i>Phoenix canariensis</i> .	53
Figura 63 Concentrações mensais de NO ₂ , obtidas a partir dos dados das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	53
Figura 64 - Intensidade de radiação - Verão / Inverno - Lisboa (Geofísico)	54
Figura 65 Perfil diário das concentrações de NO ₂ , obtidos a partir dos dados das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	54
Figura 66 Perfil de concentrações diárias de NO ₂ , para o primeiro semestre 2024 (janeiro a julho), e primeiro semestre de 2025 obtido a partir das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	55
Figura 67 Localização das duas estações RMQA em questão, Entrecampos, ao norte na região planáltica, e Av. Liberdade, num dos vales na franja SSE da cidade.	55
Figura 68 Concentrações médias anuais de NO ₂ obtidas a partir das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade e na EMQA - Entrecampos (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	58
Figura 69 Concentrações médias diárias de NO ₂ obtidas a partir das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade e na EMQA - Entrecampos (dados de base obtidos na plataforma https://qualar.apambiente.pt).	58
Figura 70 Visão aérea da Avenida do Campo Grande, com a extensa área arborizada, e a EMQA Entrecampos localizada junto à rotunda na confluência com a Avenida das Forças Armadas (Google Earth).	56
Figura 71 Localização da estação de Entrecampos, em frente aos edifícios alinhados, no primeiro troço da avenida Campo Grande, na confluência com a avenida das Forças Armadas. No mapa de localização (à direita, no alto), o círculo vermelho assinala a localização aproximada da estação de Entrecampos na cidade, enquanto o branco, a estação da Av. da Liberdade (Google Earth).	57
Figura 72 Morfologia urbana na área da Estação RMQA-Entrecampos, que se encontra ao pé de construções de até 15 andares, sem árvores no envolvente próximo, presente somente no lado nascente da avenida Campo Grande (Google Earth).	57
Figura 73 Mapas de poluição sazonais para as duas estações.	59
Figura 74 Variação de direção e intensidade do vento para o período, de 28 de junho e 1 de julho, 2025 (Lisboa Geofísico).	60
Figura 75 Concentração NO ₂ no período de 25 de junho a 4 de julho de 2025, nas estações RMQA Av. Liberdade e Entrecampos (RMQA).	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Comparação entre os índices aplicados na legislação atual em Portugal, os índices europeus revistos em 2024, índices-meta, segundo recomendações da OMS, 2021.	6
Tabela 2 Quadro comparativo quanto ao número de estações em incumprimentos valores limite na legislação nacional em vigor, na nova Diretiva da UE para 2030, valores-guia estabelecidos pela OMS em 2021 (CCDR-LVT, 2023).	30
Tabela 3 Locais e tipos das estações da RMQA instaladas na cidade de Lisboa.....	32
Tabela 4 Número de ocorrências de ventos nas diferentes direções em 2024 – Lisboa (Geofísico).	45
Tabela 5 Direção e intensidade do vento nas ocorrências de $\text{NO}_2 < 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na Avenida da Liberdade em 2024 (Lisboa Geofísico / RMQA Av. Liberdade).....	46
Tabela 6 Direção e intensidade do vento nas ocorrências de $\text{NO}_2 > 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na Avenida da Liberdade em 2024 (Lisboa Geofísico / RMQA Av. Liberdade).....	46
Tabela 7 Fatores de Emissão de Compostos Orgânicos Voláteis Biogénicos (COV-B) para Espécies Arbóreas da Avenida da Liberdade, Lisboa (Nowak, 2021).....	50
Tabela 8 tipos de medições realizadas na estação RMQA Av. Liberdade.....	51
Tabela 9 Tipos de medições realizadas na estação de Entrecampos (Qualar).	56

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AEA - Agência Europeia do Ambiente (EEA - European Environmental Agency)

AML - Área Metropolitana de Lisboa

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

CCDR-LVT – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional – Lisboa-Vale do Tejo

IMT - Instituto de Mobilidade e dos Transportes

OMS - Organização Mundial da Saúde (WHO - World Health Organization)

RMQA - Rede de estações de medição da qualidade do ar

EMQA - Estação de medição da qualidade do ar

UE - União Europeia (EU - European Union)

INTRODUÇÃO

As cidades, quanto mais crescem e se densificam, mais se tornam ambientes hostis à vida humana, animal e vegetal. A crise climática põe em xeque o futuro das cidades com o agravamento de ilhas de calor urbanas que em conjunção com as ilhas de poluição, deterioram a qualidade de vida da população.

A densificação do construído, o sobreaquecimento das superfícies edificadas e vias de circulação, as intensificações dos engarrafamentos, entre outros, resultam das políticas adotadas num contexto de embate de forças - políticas, económicas, sociais. Os impactes resultantes são corrigidos na legislação urbana (uso e ocupação do solo, exigências energéticas, acesso ao transporte público sustentável, entre outras). Essas medidas tornam-se, eventualmente, eficazes no longo prazo, mas no curto prazo, outras, exigem contínua atenção, como a gestão do tráfego de veículos à combustão, maiores responsáveis pela poluição atmosférica no espaço urbano.

Nesse contexto, a ampliação de áreas verdes, a arborização de ruas e avenidas são medidas defendidas como muito eficazes na mitigação das ilhas de calor urbanas/ilhas de poluição. De facto, diversos são os serviços ambientais que a vegetação urbana proporciona. A fixação do CO₂, gás de efeito estufa, é um exemplo. Além desse ciclo básico, a vegetação atua na remoção de poluentes atmosféricos mais nocivos por diferentes mecanismos, seja pela absorção e transformação desses elementos em menos nocivos, seja pela captura de partículas suspensas, que ficam retidas nas superfícies foliares, ajudando a reduzir a concentração de material particulado no ar. No que tange ao conforto térmico a nível dos peões, o sombreamento é desejável em qualquer espaço público. A canópia, formada pelas copas das árvores, funciona como um filtro gigante que permite a transmissão de alguma radiação de onda longa por entre a folhagem (*e.g.* Oke, 1987). Servem, ainda, de refúgio a pequenos animais, e plantas, criando ambientes com mais biodiversidade.

Florestas e parques urbanos, assim, são necessários e devem ser ampliados e protegidos. Entretanto, a arborização em ruas e avenidas por onde circulam os veículos, sobretudo aqueles por onde motores a combustão circulam, precisa ser bem planeada para evitar efeitos potencialmente negativos na qualidade do ar local, os quais são bem menos considerados entre os decisores políticos e o público em geral.

A morfologia da vegetação presente numa configuração urbana típica, de edificações alinhadas ao longo de ruas e avenidas, pode ter influência negativa na qualidade do ar, como demonstram diversos estudos (*e.g.* Gromke *et al.*, 2007, Gromke & Ruck, 2009, Buccolieri *et al.* 2011), em túnel de vento e por simulação numérica (modelos de Dinâmica dos Fluidos Computacional - Computational Fluid Dynamics (CFD)). A depender da gradação, tanto a densidade da plantação, quanto a porosidade das copas obstaculizam a passagem do ar, e diminuem a velocidade do vento e a eficiência da dispersão atmosférica vertical e horizontal.

Esta investigação propõe-se, portanto, averiguar, a partir da bibliografia científica, esta relação entre vegetação e qualidade do ar em ambiente urbano, tendo como objeto real de análise, o caso da Avenida da Liberdade, em Lisboa,

METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada em torno a conceitos científicos e de legislação, que conjuntamente a dados meteorológicos e de concentração de NO₂ (poluente-modelo deste estudo), formaram a base para o estudo do caso escolhido.

Na PARTE I, no primeiro capítulo, a qualidade do ar é abordada, na descrição genérica da química da atmosfera urbana, e na legislação pertinente tanto nacional quanto europeia. No segundo capítulo, são apresentados os conceitos fundamentais sobre a natureza da atmosfera, e fatores que influenciam a dispersão de poluentes no ambiente urbano. São apresentados estudos realizados em túneis de vento e modelos CFD demonstrando o comportamento da atmosfera sob cenários urbanos.

Na PARTE II, é apresentado o caso de estudo, a avenida da Liberdade, em Lisboa, cuja escolha decorre do facto de na EMQA existente nesta avenida se verificar o incumprimento do valor-limite anual de NO₂ definido no regime de avaliação e gestão da qualidade do ar.

O estudo desenrola-se em 3 níveis, ou escalas. No terceiro capítulo, está apresentado o primeiro nível, numa visão geral sobre o contexto metropolitano: a Área Metropolitana de Lisboa (AML) - tráfego rodoviário, demografia, e padrões de mobilidade da população. No quarto capítulo, numa escala mais aproximada, a cidade de Lisboa, os fatores meteorológicos e morfológicos que influenciam a circulação atmosférica e ventilação. No quinto capítulo, o terceiro nível de aproximação, com a caracterização da morfologia da avenida e do abundante arvoredado existente no local, discute-se aspetos relativos à ventilação, por comparação de médias de concentração de NO₂ obtidos na EMQA-Av. Liberdade, e de dados meteorológicos do Instituto Geofísico de Lisboa, tanto anuais, quanto semanais. Por último, de forma a complementar o estudo, com os mesmo dados meteorológicos, é apresentada uma comparação das concentrações de NO₂ medidas na EMQA-Av. Liberdade com as concentrações medidas na estação EMQA-Entrecampos.

Nos três níveis territoriais, foram utilizadas as estatísticas publicadas pela CCDR-LVT (Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo), e medições, sobretudo, obtidos nas estações localizadas no município de Lisboa, nomeadamente, Beato, Entrecampos, Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica, com ênfase na Avenida da Liberdade. O estudo de caso, restringiu-se ao estudo das concentrações de NO₂ na EMQA - Av. da Liberdade e na EMQA - Entrecampos.

PARTE I - CONCEITOS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar é avaliada por indicadores que relacionam as concentrações de poluentes atmosféricos¹ aos riscos à saúde humana.

A Agência Europeia do Ambiente (AEA) estima que, em 2021, 253.000 pessoas morreram prematuramente na UE devido à poluição atmosférica por partículas em suspensão (PM_{2,5}), 52.000 à poluição por dióxido de azoto (NO₂) e 22.000 à poluição por ozono (O₃)⁴. A exposição a níveis elevados de poluição atmosférica contribui para a ocorrência de problemas para a saúde, como a asma, os acidentes vasculares cerebrais, as doenças cardíacas isquémicas e o cancro do pulmão. Os efeitos na saúde dependem não só da exposição, mas também da vulnerabilidade de cada pessoa, que pode aumentar devido à idade, a problemas de saúde pré-existentes ou a comportamentos específicos.

1.1. Química atmosférica urbana

A análise da atmosfera urbana é extremamente complexa, dada a interação contínua entre componentes físicos e químicos em um ambiente aberto, dinâmico e multifásico. A atmosfera das cidades funciona como um reator a céu aberto, onde compostos provenientes de diferentes fontes reagem entre si, interagem com a radiação solar, formando novos poluentes, alguns ainda mais nocivos que os originais. Essas reações envolvem substâncias presentes nas fases gasosa e particulada, em diferentes quantidades, influenciadas por fatores meteorológicos como radiação, temperatura, humidade (e.g. Jacob, 2000)².

Na área urbana, o transporte rodoviário é o sector responsável pela maior parte da poluição atmosférica. A queima incompleta de combustíveis fósseis, como a gasolina, o gasóleo, emitem poluentes, como os óxidos de azoto (NO e NO₂), precursores do ozono troposférico (O₃), poluente muito agressivo; compostos orgânicos voláteis (COV), cancerígenos, como o benzeno, e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), como o benzo(a)pireno, também presente na queima de biomassa para aquecimento residencial, prática tradicional em muitas áreas das cidades; aldeídos primários, precursores de secundários, como o formaldeído (HCHO), e PAN; além de partículas finas (sobretudo PM₁₀), como a fuligem (carbono negro), precursor da maior parte das PM_{2,5} secundárias. As partículas podem ter origem antropogénica — como nos processos industriais, nos sistemas de aquecimento urbano ou nos motores à combustão e nos travões dos veículos — mas também natural, como no caso das poeiras do solo, esporos, sal marinho ou

¹ Poluente atmosférico é qualquer substância, seja proveniente de fontes de origem natural ou fontes de origem antropogénica, presente no ar ambiente. (Regime da Avaliação e Gestão da Qualidade do Ar Ambiente (Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, Art 2º alínea ee)

² Tendo em consideração o objetivo do estudo, apenas é apresentada análise superficial da química atmosférica sendo apresentada uma análise mais aprofundada da dispersão dos poluentes no capítulo 2 – “Dispersão Atmosférica”.

aerossóis biogénicos libertados por vegetação (COVB). Em Portugal, os eventos naturais comuns são as intrusões de massas de ar contendo partículas e poeiras em suspensão com origem nos desertos do Norte de África, e transportadas pela circulação atmosférica, quando se verificam condições meteorológicas particulares, podendo alcançar regiões distantes e afetar ocasionalmente o território nacional³. A proporção relativa entre estas fontes varia com a estação do ano, o clima e a morfologia urbana (e.g. Oke *et al.*, 2017; Seinfeld, J. H., e Pandis, S. N., 2016).

Os COV antropogénicos predominam em regiões densamente urbanizadas, porém, nas áreas com presença significativa de vegetação urbana, as emissões naturais das plantas - compostos orgânicos voláteis biogénicos (COVB), como isopreno, sob condições favoráveis, contribuem para a formação de ozono e aerossóis secundários (e.g Atkinson, 2003; Nowak, 2021). A interação entre emissões antropogénicas e naturais adiciona uma camada de complexidade à análise da qualidade do ar em ruas e avenidas arborizadas.

A rápida urbanização é uma tendência global. Mais de 50% da população mundial vive em áreas urbanas, e deverá aproximar-se dos 68% até 2050⁴. Com a densificação das aglomerações humanas, que implica no crescimento da área construída, na maior circulação de pessoas, de fluxos (de entrada e saída) de materiais, energia, informação etc., embora possa também caracterizar maior dinamismo financeiro, económico, cultural, inevitavelmente, amplia as quantidades de emissões e as concentrações de poluentes.

Essa tendência implicou na necessidade de se ter uma política para a redução das emissões, de forma a garantir uma melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas, e está na origem de um arcabouço legislativo comunitário com estes objetivos. Nos relatórios mais recentes sobre poluição do ar, da Agência Europeia do Ambiente, os resultados demonstram que a poluição do ar, nas últimas décadas, tem diminuído constantemente em toda a Europa, mas continua a ser o maior risco ambiental para a saúde da região, que causa doenças, diminui a qualidade de vida e leva a mortes evitáveis (AEA, 2023, 2025).

1.2. Legislação Comunitária e Nacional

A legislação europeia relativa à qualidade do ar ambiente foi constituída por duas diretivas fundamentais, a Diretiva 2004/107/CE e Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Ambas foram transpostas para a ordem jurídica interna pelo Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, que estabeleceu o regime da avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente. Este diploma foi alterado pelo Decreto-Lei n.º 43/2015, de 27 de março, e novamente alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 47/2017, de 10 de maio, que procedeu à transposição da Diretiva (UE) 2015/1480 da Comissão Europeia, de 28 de agosto de 2015, com alterações de vários

³ <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/particulas-em-suspensao-pm>

⁴ <https://population.un.org/wup/>

anexos das diretivas fundamentais, nas regras relativas aos métodos de referência, à validação dos dados e à localização dos pontos de amostragem para a avaliação da qualidade do ar ambiente.

Em 2016, a Diretiva (UE) 2016/2284 do Parlamento Europeu e do Conselho, transposta para a legislação portuguesa pelo Decreto-Lei n.º 84/2018, de 23 de outubro, estabeleceu novos compromissos para uma gama mais ampla de substâncias tóxicas, ou seja, “redução das emissões atmosféricas antropogênicas de dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de azoto (NO_x), compostos orgânicos voláteis não-metânicos (NMVOC), amoníaco (NH₃) e partículas finas (PM_{2.5}) e exigiu a elaboração, adoção e execução de programas nacionais de controlo da poluição atmosférica, bem como a monitorização e a comunicação das emissões desses poluentes e dos outros poluentes (CO, metais pesados (Cd, Hg, Pb), POP (poluentes orgânicos persistentes) com total de HAP (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, indeno(1,2,3-cd)pireno, dioxinas/furanos, PCB (policlorobifenilos), HCB (hexaclorobenzeno), PM₁₀. Num quadro mais amplo, inclui-se a transversalidade da legislação pelo controlo de emissões por setores.

Nesse contexto, em consonância com o Plano de Ação para Poluição Zero (COM (2021) 500), dentro do Pacto Ecológico Europeu (COM (2019) 640), em 2022, a Comissão Europeia propôs uma avaliação e revisão das diretivas de qualidade do ar ambiente para um maior alinhamento às recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), revistas em 2021 (OMS, 2021). A proposta aceita foi publicada em outubro de 2024 (Diretiva (UE) 2024/2881 de 23 de outubro de 2024), com novos índices para serem adotadas pelos estados-membros de forma gradual, ou seja, com índices de adaptação para 2026, para adoção em 2030, com vistas às metas de 2050 (**Tabela 1**).

Tabela 1 Comparação entre os índices aplicados na legislação atual em Portugal, os índices europeus revistos em 2024, índices-meta, segundo recomendações da OMS, 2021.

	Tempo	Valores-Limites				
		DL 102/2010	OMS 2021	Diretiva/2024 (até 2026)	Diretiva/2024 (até 2030)	AQG 2050
PM_{2.5} µg/m³	1 dia	25	15	25	25 ^a	15
	1 ano		5		10	5
PM₁₀ µg/m³	1 dia	50	45	50	45 ^a	45
	1 ano	40	15	40	20	15
NO₂ µg/m³	1 hora	200		200	200 ^b	
	1 dia		25		50	
	1 ano	40	10	40	20	10
O₃ µg/m³	8 horas	120	100	120	100 ^a	100
SO₂ µg/m³	1 hora	350		350	350 ^b	
	1 dia	125		125	50 ^a	40
	1 ano				20	
CO mg/m³	1 dia		4	10	4 ^a	4
	8 horas	10	10			10
Chumbo Pb µg/m³	1 ano	0,5		0,5	0,5	
Arsénio (As) ng/m³	1 ano			6,0	6,0	
Cádmio (Cd) ng/m³	1 ano			5,0	5,0	
Benzo(a)pireno ng/m³	1 ano			1,0	1,0	
Níquel (Ni) ng/m³	1 ano			20	20	
Benzeno µg/m³	1 ano	5		5	3,4	
^a A não exceder mais de 18 vezes por ano civil.						
^b A não exceder mais de 1 vez por ano civil						

Em Portugal, em conformidade com o Regime Jurídico de Avaliação e Gestão da Qualidade do Ar, cabe à Agência Portuguesa do Ambiente (APA) a responsabilidade de promover e implementar uma política de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente. Conforme o regime jurídico, Portugal está dotado de estações e redes de medição fixas para a avaliação da qualidade do ar ambiente, na sua maior parte geridas e operadas pelas comissões de coordenação e desenvolvimento regional (CCDR). Para cada poluente existe um conjunto de locais de medição (estações) cuja localização obedece a um conjunto de requisitos tendo em vista garantir a representatividade das medições em cada uma das zonas

2. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Neste capítulo, para melhor compreender os padrões atmosféricos que permitem a dispersão de poluentes no espaço urbano, é apresentada uma breve descrição sobre a atmosfera e sobretudo, sobre a camada mais próxima da superfície terrestre que, por sua vez condiciona a ventilação vertical e horizontal da cidade.

A eventual remoção de poluentes, por dispersão, assim como, por processos relacionados com a precipitação (denominados de eliminação), por sedimentação gravitacional ou por adsorção e impactação de superfície, está relacionada com o estado da atmosfera (**Figura 1**).

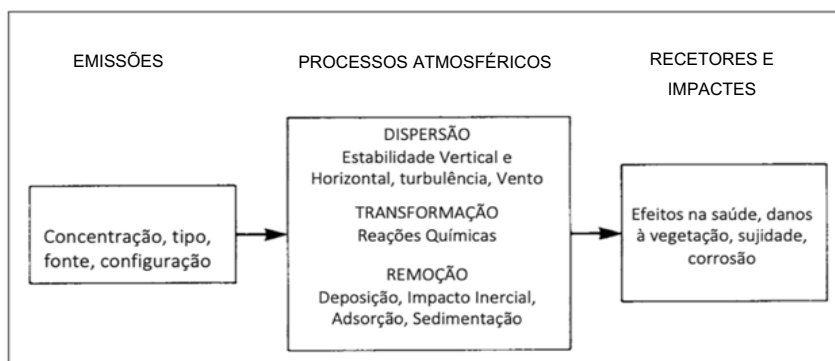


Figura 1 Progresso dos poluentes das fontes para os sumidouros (recetores) através da atmosfera (extraído e adaptado Oke, 1987).

2.1. Camada limite

A atmosfera terrestre é uma camada relativamente fina de uma mistura gasosa, distribuída quase uniformemente sobre a superfície da Terra. Na vertical, mais de 99% da massa da atmosfera encontra-se abaixo de uma altitude de 30 km.

Devido à gravidade, está estratificada, com as camadas mais densas junto à superfície, que diferem em composição, temperatura, estabilidade e dinâmica energética. É colocada em movimento principalmente devido ao aquecimento diferencial pelo Sol. Quando a radiação solar penetra na atmosfera, é absorvida e dispersada não apenas pelos gases atmosféricos, mas também pelos aerossóis e nuvens⁵ (e.g. Peixoto & Oort 1993).

O ozono (O_3) é muito eficaz na filtragem da radiação ultravioleta em comprimentos de onda inferiores a $0,3 \mu\text{m}$, e o vapor de água torna-se cada vez mais importante em comprimentos de onda superiores a $0,8 \mu\text{m}$, mas na gama intermédia a atmosfera é relativamente transparente, resultando numa maior intensidade da radiação solar nesta gama à superfície. A absorção por gotas de água

⁵ As partículas de aerossol na atmosfera provêm principalmente de dois processos: (1) injeção direta de poeira, fuligem, partículas de sal marinho etc., por vulcões, incêndios florestais, atividades humanas e outros processos naturais, e (2) reações químicas de materiais gasosos na atmosfera, como a transformação de SO_2 em HSO_4 ou sulfatos, NO_x em ácidos nítricos, entre outros. São definidos como suspensões de partículas líquidas ou sólidas no ar, excluindo gotas de nuvens e precipitação. O raio médio das partículas de aerossol varia de cerca de 10^{-4} a $10 \mu\text{m}$. Afeta vários fenómenos na Terra, incluindo a química atmosférica, as nuvens e a chuva, o clima, a saúde e a atividade biológica, entre outros (Tiwayry & Colls, 2009).

líquida na nuvem é relativamente reduzida. Além da absorção, ocorre também diminuição da radiação solar pela dispersão atmosférica⁶.

Na troposfera, camada em contato com a superfície terrestre e limitada pela tropopausa⁷, a absorção da radiação solar é bastante fraca; ocorre nas regiões visível e infravermelho próximo ($0,55 < 4,0 \mu\text{m}$) do espectro, principalmente devido a H_2O , CO_2 e nuvens (**Figura 2**).

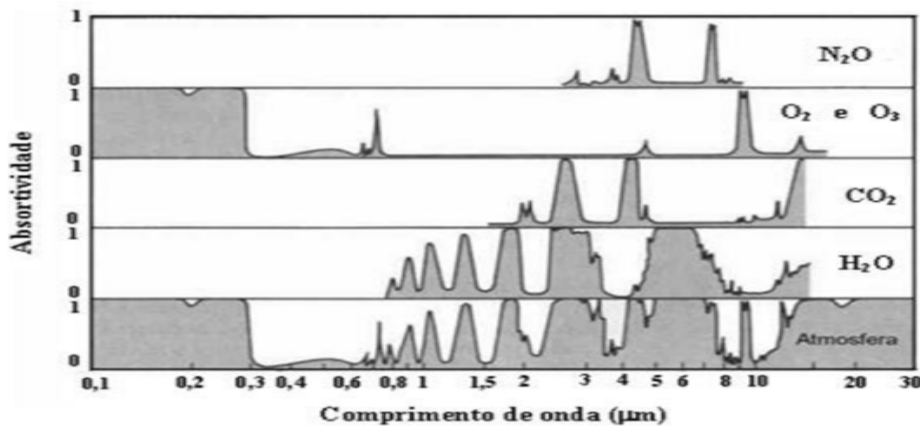


Figura 2 Absorção em vários comprimentos de onda pelos constituintes da atmosfera e pela atmosfera no seu todo (extraído e adaptado de Oke, 1987).

Esta camada, entretanto, apresenta uma circulação geral de grande escala, ilustrada na **Figura 3**, com movimentos turbulentos em latitudes médias, como os sistemas meteorológicos, e movimentos turbulentos aleatórios, principalmente, na camada limite planetária e perto das correntes de jato (jet stream) (e.g. (Peixoto & Oort, 1993)).

⁶ Durante a sua passagem pela atmosfera, o raio solar encontra nuvens e outros constituintes atmosféricos, incluindo vapor de água, cristais de sal, partículas de poeira e vários gases. Cada um destes constituintes tem o seu próprio conjunto de propriedades radiativas em relação à radiação de onda curta incidente, pelo que parte do feixe é refletida (dispersa), uma parte é absorvida e o restante é transmitido para a superfície (e.g. Peixoto & Oort (1993)).

⁷ A tropopausa é uma camada de transição complexa entre a troposfera superior e a estratosfera inferior. A dinâmica diversa, químico e radiativo, entre a troposfera e a estratosfera e a troca bidirecional de ar entre estratosfera-troposfera, impactam significativamente o balanço da radiação e o clima da Terra. A definição original e mais utilizada, baseada na estabilidade, é a criada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 1957. A definição da taxa de variação da temperatura com a altitude para a tropopausa (LRT) estabelece que esta corresponde ao "nível mais baixo em que a taxa de variação da temperatura diminui para 2°C por km ou menos, desde que a taxa média de variação entre este nível e todos os níveis superiores num intervalo de 2 km não exceda 2°C por km" (Tinney et al., 2022).

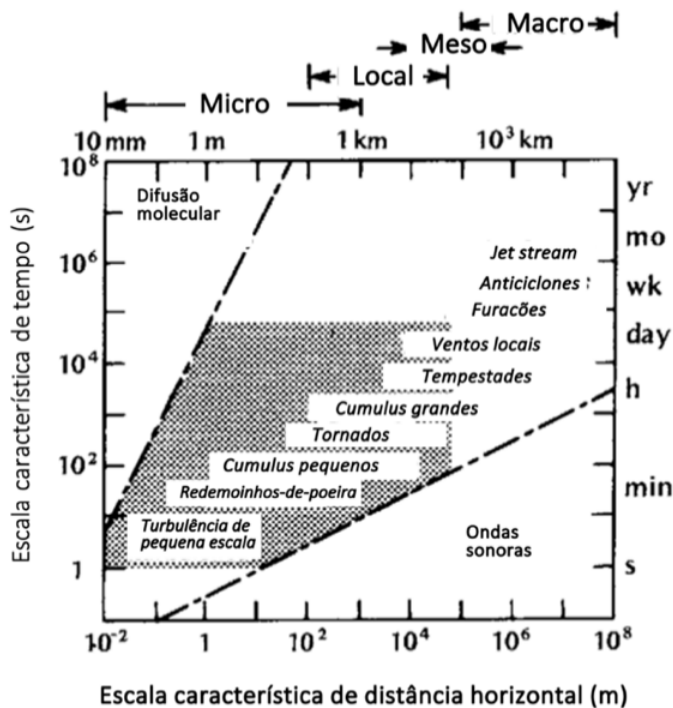


Figura 3 Escalas de tempo e espaço de vários fenômenos atmosféricos. A área sombreada representa o domínio típico das estruturas da camada limite (extraído e adaptado do de Oke, 1987).

Perto da superfície terrestre, a circulação atmosférica é fortemente afetada pelo atrito, causando modificações profundas no escoamento do ar. A espessura do ar modificado aumenta em altura até se estabelecer uma camada limite de dezenas a centenas de metros de espessura (**Figura 4**).

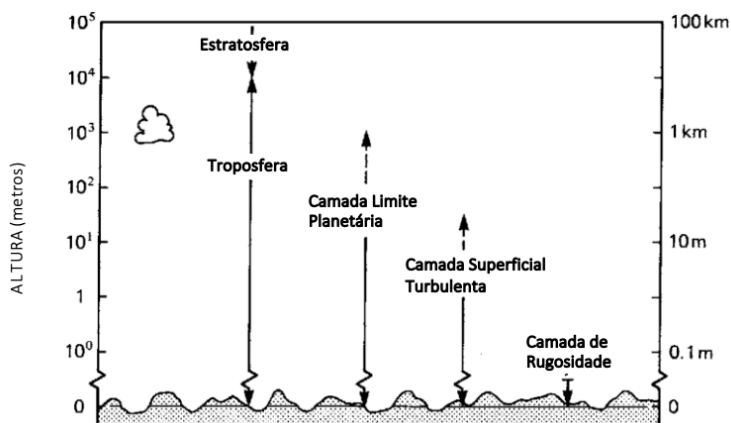


Figura 4 Estrutura vertical da Atmosfera (extraído e adaptado de Oke, 1987).

A camada limite planetária é caracterizada por um forte gradiente de vento, que juntamente com o aquecimento da superfície, leva ao desenvolvimento de um fluxo turbulento, com redemoinhos de várias escalas. Essa troca turbulenta ou mistura turbulenta constitui um mecanismo muito eficiente para a transferência de massa, momento e calor através da camada limite, tanto para cima como para baixo, ligando assim a superfície terrestre à atmosfera livre. Na troca de massa com a superfície, considera-se também a troca de vários gases, partículas de poeira e outros aerossóis (Peixoto & Oort, 1993).

A altura da camada limite não é constante com o tempo, depende de radiação da superfície terrestre. Durante o dia, quando a superfície da Terra é aquecida pelo Sol, há uma transferência

ascendente de calor para a atmosfera mais fria. Esta vigorosa mistura térmica (convecção) permite que a profundidade da camada limite se estenda até cerca de 1 a 2 km. Por outro lado, à noite, quando a superfície da Terra arrefece mais rapidamente do que a atmosfera, há uma transferência descendente de calor. Isto tende a suprimir a mistura e a profundidade da camada limite pode diminuir para menos de 100 m. Assim, de forma simples, imaginamos uma camada de influência que aumenta e diminui num ritmo sincrônico ao ciclo solar diário. Naturalmente a descrição geral pode ser consideravelmente perturbada por sistemas meteorológicos de grande escala, cujos padrões de vento e nuvens não estão ligados às características da superfície ou ao ciclo de aquecimento diário (Oke, 1987).

A camada superficial turbulenta é caracterizada por intensa turbulência em pequena escala gerada pela rugosidade e convecção da superfície; durante o dia pode atingir uma altura de cerca de 50 m, mas à noite, quando a camada limite diminui, pode atingir apenas alguns metros de profundidade. Apesar de sua variabilidade no curto prazo (por exemplo, segundos), a camada superficial é horizontalmente homogênea quando vista por períodos mais longos (maiores que 10 min).

Podem ser caracterizadas duas outras camadas que são controladas pelas características da superfície e cujas profundidades dependem das dimensões dos elementos de rugosidade da superfície. A primeira é a camada *de rugosidade* que se estende nos topos dos elementos pelo menos 1 a 3 vezes a sua altura ou espaçamento. Nesta zona o fluxo é altamente irregular, sendo fortemente afetado pela natureza das características de rugosidade individuais (por exemplo, folhas de relva, árvores, edifícios, etc.). O segundo é a camada limite laminar que está em contato direto com a(s) superfície(s). É a camada não turbulenta, com no máximo alguns milímetros de espessura, que adere a todas as superfícies e estabelece um amortecedor entre a superfície e o ambiente de difusão mais livre acima (Oke, 1987).

A **Figura 5** mostra como uma camada limite cresce com a distância sobre uma placa plana. A espessura da camada limite laminar aumenta, mas eventualmente uma combinação crítica de propriedades (velocidade do fluxo, distância e viscosidade) é excedida, após o que o fluxo se decompõe na confusão aleatória de turbilhões característicos do fluxo turbulento. No entanto, note que uma subcamada laminar ainda permanece na superfície. A espessura da subcamada depende principalmente da rugosidade da superfície e da velocidade do vento exterior.

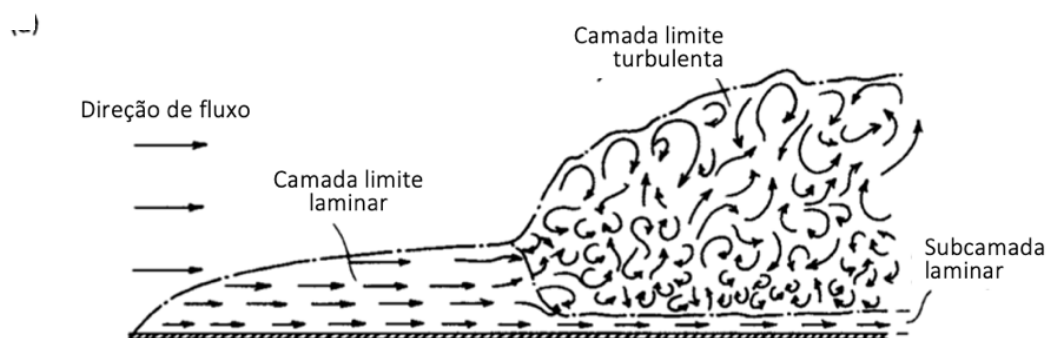


Figura 5 Desenvolvimento de uma camada limite laminar sobre uma placa plana e a sua transição para o fluxo turbulento (extraído e adaptado de Oke, 1987).

O movimento atmosférico serve tanto para dispersar (diluir) como para transportar poluentes no ar. Se o tamanho dos turbilhões for menor que a nuvem ou pluma poluente, estes irão difundi-la; se forem maiores, irão transportá-la. Quando o vento sopra, a poluição é difundida tanto na direção do vento como pela difusão turbulenta nas direções transversal e vertical (Oke, 1987).

2.1.1. Padrões Atmosféricos em áreas urbanas

Os climas urbanos estão sempre sob o controle de eventos climáticos sinóticos que, em escalas de tempo mais longas, criam o clima de fundo de um lugar, porém, esse conhecimento não é suficiente para avaliar as características climáticas no espaço urbano.

O processo de urbanização produz alterações radicais na natureza da superfície e nas propriedades atmosféricas de uma região. Envolve a transformação das características radiativas, térmicas, de humidade e aerodinâmicas e, portanto, desloca os equilíbrios solares e hidrológicos naturais. Como exemplos que podem ser citados (*e.g. Oke et al. 2017*), (i) o aumento aparentemente inevitável da poluição do ar, que afeta a transferência de radiação e produz núcleos extras em torno dos quais podem-se formar gotículas de nuvens, a deslocar o ciclo hidrológico; (ii) os materiais de construção, num meio urbano denso, que tornam o sistema num grande armazenador de calor, e que (iii) impermeabilizam a superfície, a obstruir o escoamento da água de forma mais homogénea, e alimentar os lençóis freáticos; (iv) o calor e a água libertados como produtos “residuais” das atividades humanas complementam as fontes naturais de calor e de água no sistema urbano; (v) a geometria urbana na forma de blocos cria a possibilidade de aprisionamento da radiação e estagnação do ar, além de proporcionar uma superfície muito rugosa, a afetar os padrões de ventilação em todo núcleo urbano.

A determinação dos parâmetros de rugosidade baseia-se em variáveis geométricas dos elementos urbanos, como a altura dos edifícios, a área ocupada no solo e a área das fachadas expostas ao vento. As duas primeiras podem ser obtidas por meio de cálculos simples. Já a estimativa da área das fachadas voltadas para a direção predominante do vento exige procedimentos mais complexos de natureza espacial, que podem ser realizados num ambiente SIG - Sistema de Informação Geográfica. (Correia, E., 2019). O efeito da rugosidade do terreno (Z), no perfil do vento está representado esquematicamente na **Figura 6**.

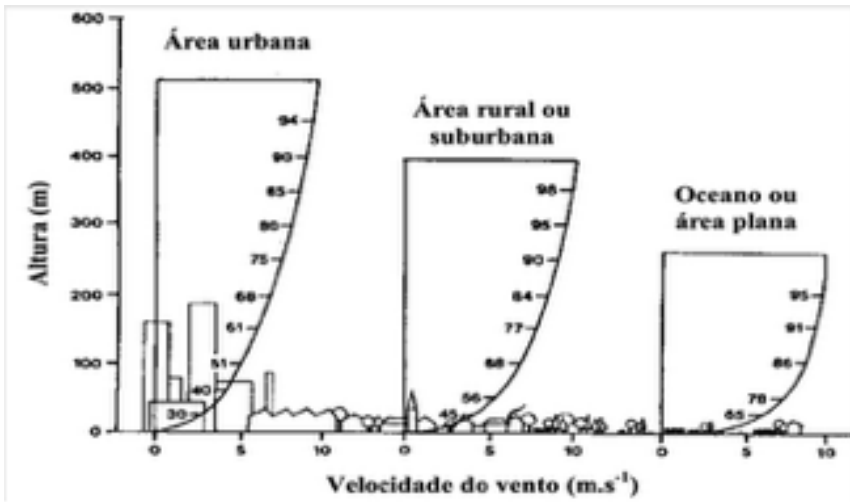


Figura 6 Variação do perfil vertical da velocidade do vento em função da rugosidade do terreno (extraído de Borrego, 1994).

Assim, à medida que o ar flui do campo para a cidade, encontra um novo e muito diferente conjunto de condições. Uma camada limite desenvolve-se a favor do vento a partir da borda inicial da cidade (e.g. Oke *et al.* 2017). Na **Figura 7** e **Figura 8**, de forma geral, as camadas-limite urbanas típicas em mesoescala:

Cúpula urbana

Sem vento ambiente regional

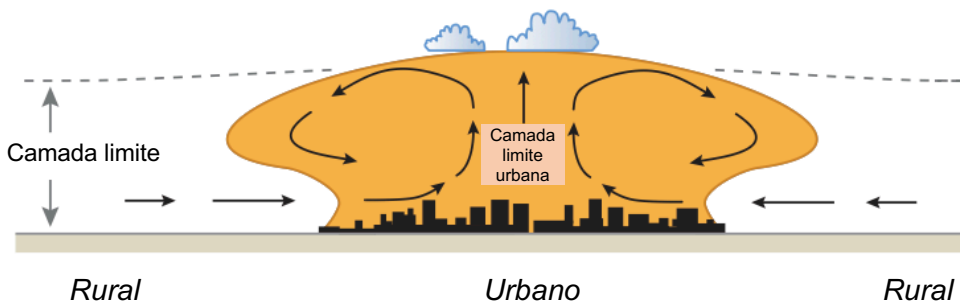


Figura 7 "Cúpula" urbana quando o escoamento regional está praticamente calmo (extraído e adaptado de Oke *et al.* 2017).

Pluma urbana

Com vento regional

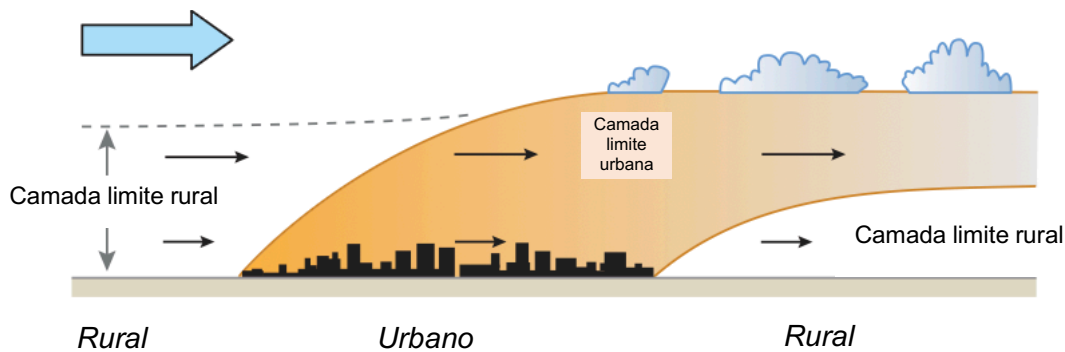


Figura 8 camada-limite interna urbana e "pluma" a jusante com escoamento regional moderado (extraído e adaptado de Oke *et al.* 2017).

2.2. Canópia Urbana e dispersão de poluentes

Ao pormenor, ao nível do telhado encontra-se a camada da canópia urbana, que é produzido por processos de microescala que operam nos cânions entre os edifícios (**Figura 9**). O seu clima é uma amálgama de microclimas, cada um dos quais é dominado pelas características do seu meio envolvente imediato (Oke, 1987).

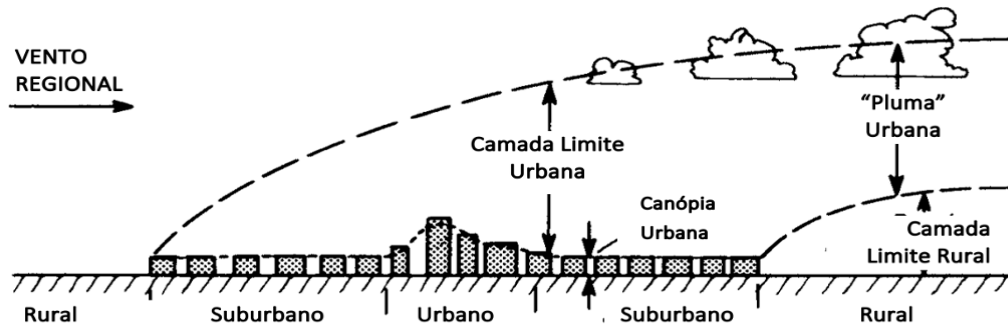


Figura 9 lustração da atmosfera com a modificação urbana classificada por duas camadas (camada limite urbana e canópia urbana (adaptado de Oke, 1987).

Ao encontrar um obstáculo impenetrável, como um edifício, por exemplo, o fluxo do ar é desviado para cima, para baixo na frente, ou para os lados. O ar que é 'empurrado' contra o edifício produz pressões relativamente elevadas sobre grande parte da superfície da parede de barlavento.

O padrão de fluxo de vento em torno de um edifício é indicado esquematicamente na **Figura 10 (a)**⁸. Os perfis de velocidade do vento associados a este padrão de fluxo são apresentados na **Figura 10 (b)**⁹.

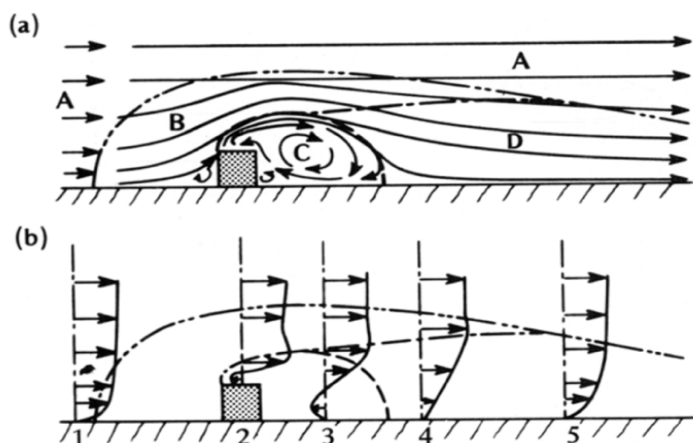


Figura 10 Padrões de fluxo em torno de um edifício com arestas definidas. Vista lateral de (a) linhas de corrente e zonas de fluxo, e (b) perfis de velocidade e zonas de fluxo com o edifício com orientação ao fluxo (adaptado de Oke, 1987).

⁸ Fluxo não perturbado (A); Fluxo por deslocamento (B); Região de cavidade (C); Região de esteira turbulenta (D).

⁹ No fluxo ascendente não perturbado (perfil 1), a forma logarítmica padrão é evidente. Imediatamente acima do edifício (perfil 2), o perfil está fortemente distorcido. Na camada de deslocamento acima do limite da esteira, existe um jato pronunciado de ar a alta velocidade à medida que as linhas de corrente convergem. Abaixo deste, a velocidade diminui muito bruscamente e nas camadas mais baixas observa-se o fluxo de retorno do teto. A sotavento do edifício (perfil 3), o jato é menos pronunciado à medida que as linhas de corrente começam a divergir, e o turbilhão da zona do cânion proporciona um fluxo de retorno junto ao solo.

A pressão máxima ocorre perto da parte central superior da parede, onde o vento fica parado, e a pressão diminui para fora desse ponto de estagnação. Perto das extremidades externas da face de barlavento, o fluxo acelerado produz, na realidade, áreas onde a pressão é inferior à da superfície não perturbada. Se a mesma forma cúbica estiver orientada diagonalmente em relação ao vento (**Figura 11**), existem duas paredes a barlavento e duas a sotavento orientadas obliquamente ao fluxo.

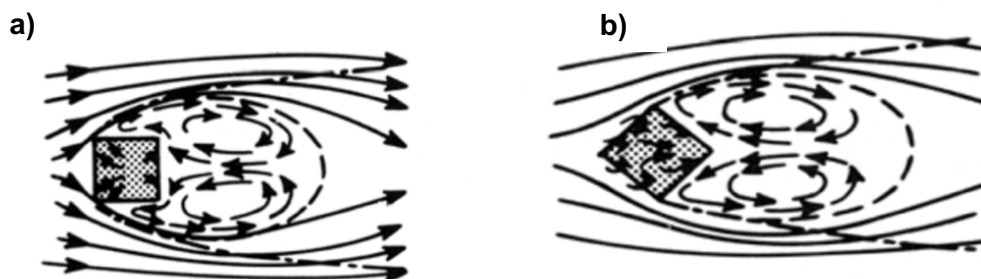


Figura 11 Padrões de fluxo em torno de um edifício com arestas definidas. Vista em planta de linhas de fluxo com o edifício orientado (a) ao fluxo, e (b) diagonalmente ao fluxo (adaptado de Oke, 1987).

Isto tende a reduzir a força das zonas de sucção, especialmente no telhado. Se a inclinação do telhado for superior a 20° , a face de barlavento estará sob pressão aumentada, a face de sotavento estará sob sucção. Os edifícios arredondados (por exemplo, um silo) perturbam menos o fluxo, mas o padrão básico mantém-se.

Os edifícios altos (**Figura 12**), por sua vez, trazem maior desafio, pois podem introduzir ventos de alta velocidade ao desviar o vento, de elevações mais altas, em direção ao nível dos peões, o que pode levar a condições incômodas ou mesmo perigosas (Moonen *et al.*, 2012).

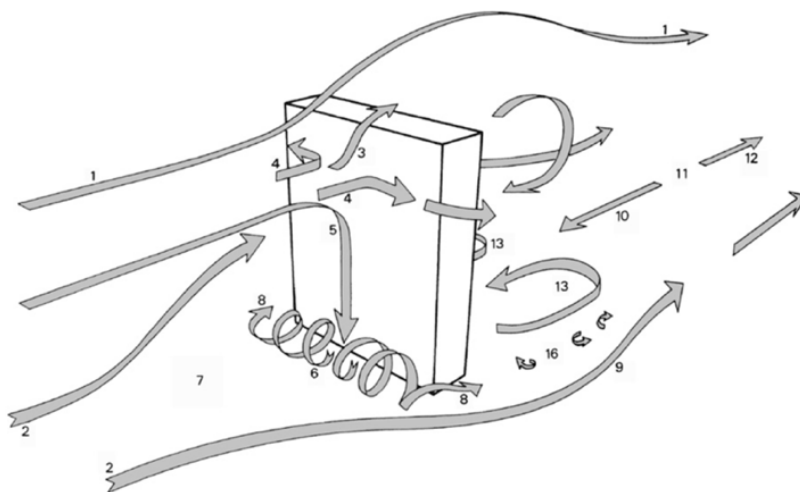


Figura 12 Representação esquemática do padrão de fluxo de vento em torno de um edifício alto (adaptado de Blocken & Carmeliet, 2004).

Portanto, a altura e forma de obstáculos isolados e em grupos são significantes para o padrão geral de circulação do ar numa dada área, e conseqüentemente na formação de áreas de maior concentração de poluentes, ou de melhor “limpeza”. Em áreas caracterizadas por edifícios baixos, a circulação do ar entre o nível da rua, onde os poluentes dos carros são emitidos, e o nível acima do telhado depende da proporção entre altura/largura; se as ruas forem estreitas, a troca aérea será

mais restrita em comparação com um arranjo mais aberto, onde a circulação do vórtice ajuda a “limpeza” do ar no nível da rua.

2.2.1. Dispersão de poluentes num cânion urbano.

Ao longo das últimas três décadas (e.g. Berkowicz *et al.*, 1997; Soulhac *et al.*, 2001), vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para estudar a troca de massa entre um cânion urbano e o escoamento atmosférico acima, com o objetivo de prever a dispersão de poluentes no interior do cânion (**Figura 13**).

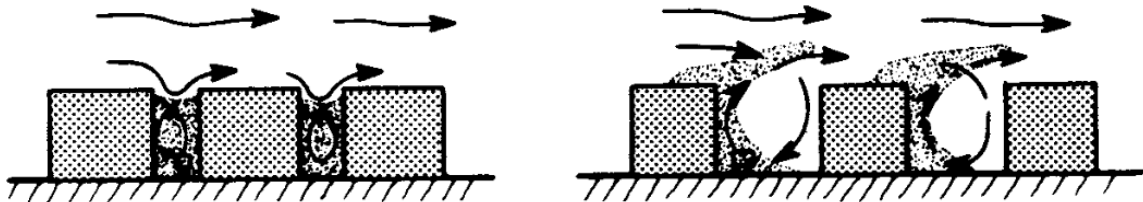


Figura 13 Padrões de influência das construções no fluxo do ar (extraído de Oke, 1987).

O desenvolvimento de modelos para a dispersão de poluentes em cânions urbanos é fundamental para testar e validar os conceitos físicos da dinâmica do escoamento e da ventilação urbana, permitindo também a realização de experiências virtuais e controladas. Dada a complexidade do ambiente real — com suas diversas formas, materiais, condições meteorológicas e vegetação —, torna-se necessário simplificar essa realidade para viabilizar a aplicação de modelos computacionais, paramétricos e experimentais. Essas simplificações são fundamentais para viabilizar a modelação do escoamento em cânions urbanos, pois reduzem significativamente a carga computacional, facilitam a interpretação dos resultados e possibilitam a análise sistemática de diferentes configurações urbanas.

Nesse contexto, o escoamento do ar em um cânion urbano é frequentemente representado como um vento constante e perpendicular ao topo dos edifícios (**Figura 14**), que gera um vórtice criando um fluxo ao nível do solo com direção oposta à do vento na cobertura (Oke, 1987). Na realidade, a formação e a intensidade desse vórtice são influenciadas tanto pela configuração geométrica dos edifícios quanto pela presença e densidade de vegetação quando presente (Ng & Chau, 2012).

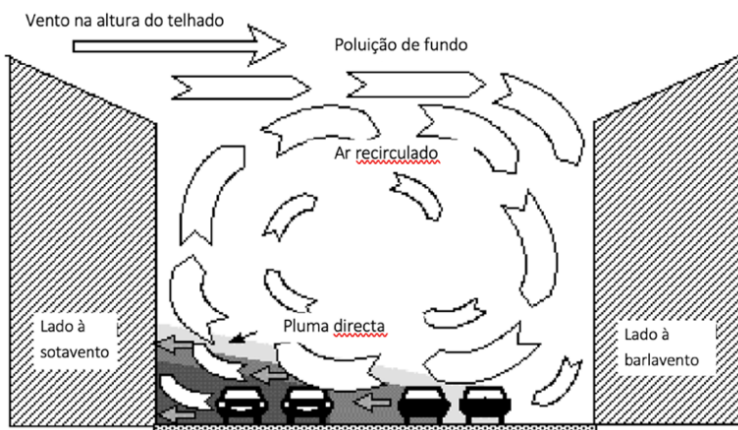


Figura 14 Ilustração esquemática das condições de fluxo e dispersão em cânion sujeito a um fluxo de aproximação perpendicular (adaptado de Berkowicz, 2000).

Se o vento sopra paralelo ao alinhamento do cânion, o escoamento é canalizado ao longo do corredor urbano; já ventos oriundos de outras direções podem ser compreendidos como combinações desses dois padrões básicos.

O esquema simplificado, apresentado ao longo de um cânion de rua (**Figura 15**), destaca a importância de considerar a circulação do ar não apenas no centro do cânion, mas também nas esquinas, onde a formação de turbulências é significativa para a dinâmica geral do fluxo.

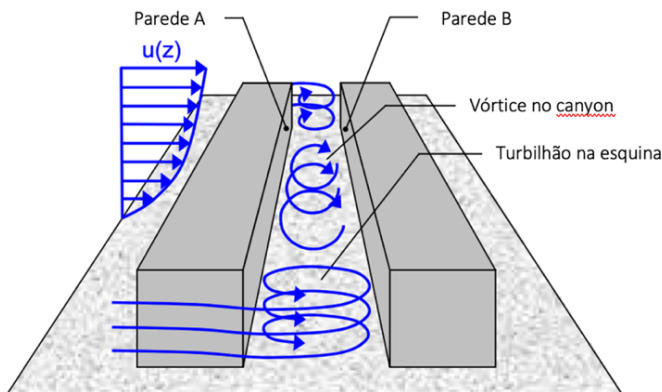


Figura 15 Campo de fluxo dentro e em torno a um cânion urbano¹⁰ (adaptado de Gromke & Ruck, 2007)

Em 2009, Soulhac *et al.* desenvolveram um modelo de fluxo capaz de analisar como os escoamentos de ar se dividem em cruzamentos urbanos. Demonstraram que o fluxo em um cruzamento pode ser descrito a partir de duas características principais: o fluxo horizontal de ar entre ruas e o fluxo vertical entre a canópia urbana e a atmosfera exterior.

O fluxo horizontal foi estimado assumindo uma dinâmica bidimensional, ou seja, considerando que a topologia das linhas de corrente não varia com a altura em relação ao solo. Já o fluxo vertical foi modelado por meio de um balanço simples dos volumes de ar que entram e saem da interseção. Quando o fluxo nas secções transversais das ruas a favor e contra o vento difere, ocorre a geração de um fluxo vertical para equilibrar essa diferença.

A configuração urbana foi idealizada como uma grelha, onde os detalhes das reentrâncias das quadriculas foram desprezados para simplificar o modelo (**Figura 16**).

¹⁰ Na **Figura 15**, observa-se dois fenômenos de fluxo dominantes: um vórtice no cânion (CV) na parte central e turbilhões de esquina (CE) nas extremidades do cânion. Enquanto o vórtice do cânion que gira horizontalmente, impulsionado pelas forças de cisalhamento do fluxo acima do nível do telhado, é a única fonte de troca de ar na parte central do cânion em direção às extremidades da rua, a troca de ar adicional é fornecida por turbilhões de esquina, que giram verticalmente. A sobreposição de ambos nas extremidades da rua resulta num campo de escoamento mais tridimensional e, claro, numa melhor ventilação.

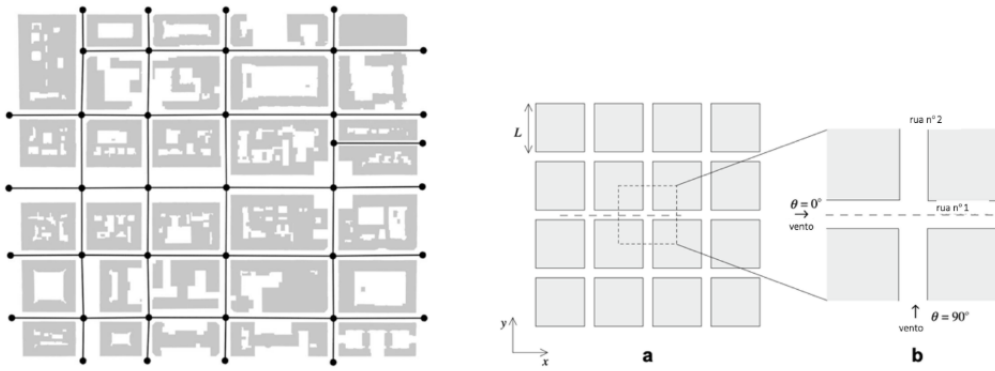


Figura 16 À esquerda, a abordagem do tipo “rede de ruas” aplicada a um distrito da cidade de Lyon (França). À direita, túnel de vento configurado e o respetivo domínio numérico; A linha tracejada representa a fonte da linha (extraído de Soulhac *et al.* 2009)

Os autores identificaram três regimes aerodinâmicos distintos: (1) fluxo canalizado, para ventos paralelos à rua principal; (2) recirculação assimétrica, para ventos oblíquos; e (3) confluência turbulenta, para ventos perpendiculares. Na Avenida da Liberdade e suas transversais, os ventos predominantes de norte incidem em ângulos entre aproximadamente 30° e 60°. Na **Figura 17** é apresentado o escoamento para ângulos de 30° e 60° obtido por simulações CFD (ver **Anexo 1** para outras graus de incidência).

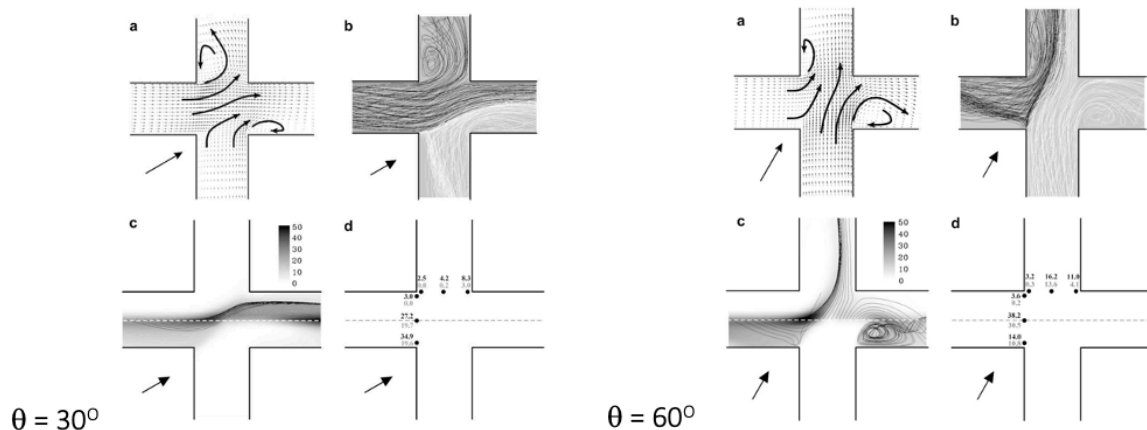


Figura 17 Simulações por CFD do fluxo de ar em cruzamentos (extraído e adaptado de Soulhac *et al.*, 2009).

Os autores destacaram, também, que, primeiramente, os fluxos de tráfego interrompidos — quando veículos aceleram e travam em cruzamentos — geram emissões significativamente maiores do que em condições de fluxo livre. Em segundo lugar, os cruzamentos funcionam como pontos de troca intensa de poluentes entre as ruas. A influência da vegetação, quando presente, é secundária frente à complexidade aerodinâmica causada pelos edifícios e pelo tráfego. Árvores podem modificar padrões locais de turbulência, mas não dominam a dinâmica geral de dispersão. Em cruzamentos com vegetação, a turbulência induzida pelas copas aumenta a mistura vertical do ar, reduzindo as concentrações de monóxido de carbono (CO) em 20-30% nos cantos dos edifícios, embora possa provocar elevações locais de óxidos de azoto (NO_x) junto aos semáforos devido ao aprisionamento em microredemoinhos (Soulhac *et al.* 2009).

Fellini *et al.* (2020) investigaram o efeito combinado da geometria do cânion, da rugosidade das paredes e do aquecimento diferencial das fachadas dos edifícios na dispersão de poluentes dentro

e fora do cânion urbano. O estudo experimental foi conduzido em túnel de vento, utilizando uma geometria idealizada composta por barras quadradas dispostas perpendicularmente à direção do vento. As condições dentro do cânion foram modificadas pelo aquecimento das paredes a barlavento e sotavento, pela variação da razão de aspeito (razão entre a altura dos edifícios (H) e a largura da rua (W)) e pela introdução de elementos de rugosidade nas superfícies **Figura 18**.

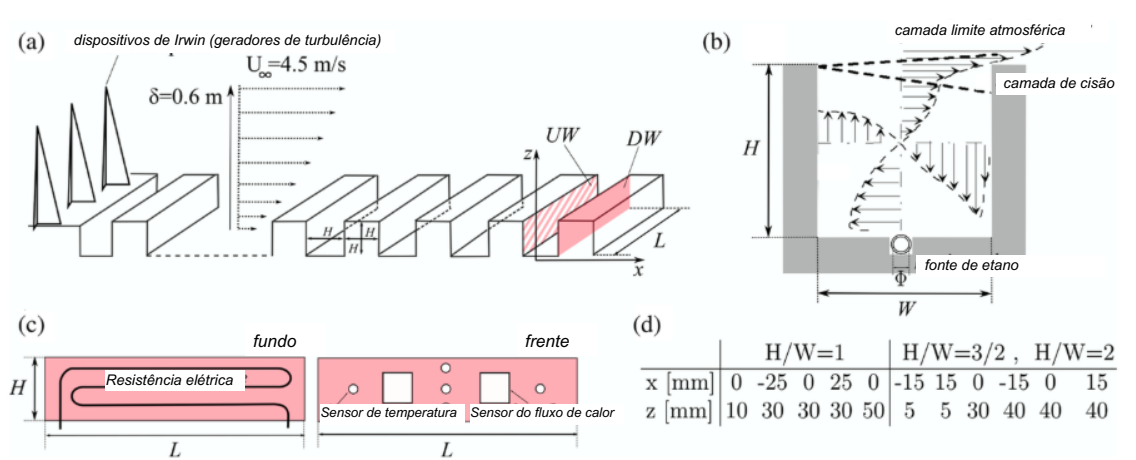


Figura 18 a) Vista geral da instalação do túnel de vento com a posição do desfiladeiro da rua (b) Esboço da secção transversal do cânion com uma representação qualitativa do fluxo bidimensional. A fonte da linha está localizada numa ranhura cortada no piso do túnel. (c) Esboço da configuração para as configurações com aquecimento da parede a favor do vento (DW). d) Coordenadas horizontais (x) e verticais (z) dos pontos onde foram medidas as curvas de varredura (extraído de Fellini *et al.* 2020).

Os campos de fluxo e concentração foram medidos em uma seção transversal do cânion, e as velocidades características de troca de ar foram estimadas comparando os dados experimentais a um modelo analítico para a renovação do ar no cânion (**Figura 19**). Os resultados indicam que, com o aumento da razão de aspeito, os fluxos totais de vorticidade no sentido anti-horário nas paredes do cânion se intensificam, o que resulta em pior qualidade do ar ao nível dos pedestres em cânions estreitos.

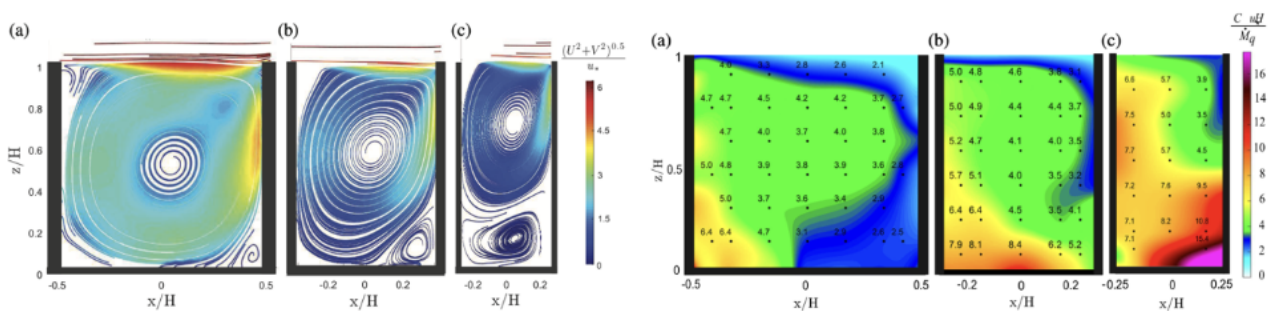


Figura 19 À esquerda, linhas de corrente do campo de velocidades médias para razões de aspeito (a) $H/W = 1$, (b) $H/W = 1,5$ e (c) $H/W = 2$. À direita, concentração média do escalar passivo no interior da cavidade nas razões de aspeito (a) $H/W = 1$, (b) $H/W = 1,5$ e (c) $H/W = 2$ (extraído de Fellini *et al.*, 2020).

A rugosidade das paredes aumentou os gradientes de velocidade próximos às superfícies, induzindo maiores fluxos de vorticidade no sentido anti-horário. A rugosidade na parede a barlavento facilitou a transição para um padrão de duas células de recirculação, ao passo que a rugosidade na parede a sotavento teve influência reduzida, já que a vorticidade gerada é rapidamente removida pelo escoamento médio (**Figura 20**).

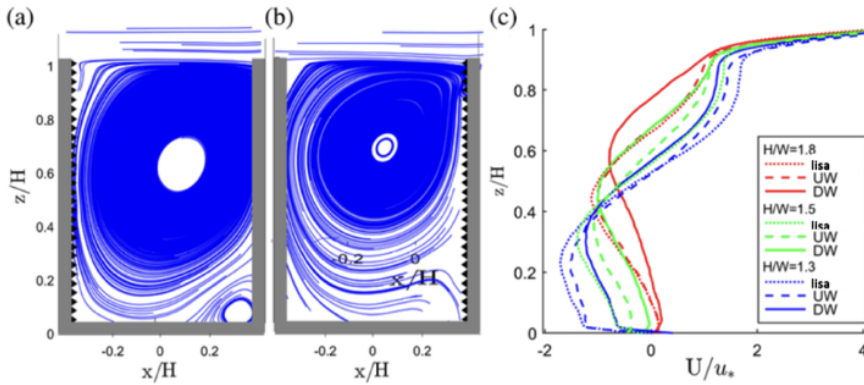


Figura 20 Efeito sobre o campo de velocidade média da rugosidade da parede na (a) parede a sotavento (UW) e (b) parede a barlavento (DW) para uma cavidade com $H/W = 3/2$. (c) Perfil vertical da velocidade horizontal média em $x = 0$ para diferentes razões de aspeito e diferentes condições das paredes: paredes lisas (linhas pontilhadas), rugosidade na parede a barlavento (linhas tracejadas) e rugosidade na parede a sotavento (linhas contínuas). (extraído e adaptado de Fellini *et al.*, 2020).

O aquecimento da parede de sotavento teve efeito insignificante na ventilação, enquanto o aquecimento da parede a barlavento acelerou a remoção de poluentes em cânions quadrados, mas agravou a qualidade do ar em cânions estreitos (**Figura 21**).

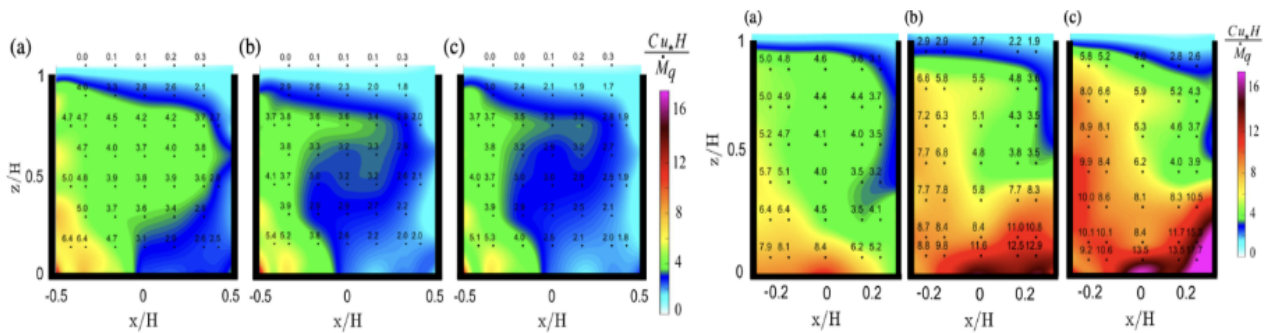


Figura 21 À esquerda, concentração de um escalar passivo libertado ao nível da rua numa cavidade quadrada para aquecimento diferente da parede a favor do vento: (a) $\Delta T = 0K$ (b) $\Delta T = 70K$ e (c) $\Delta T = 170K$. À direita, Concentração de um escalar passivo libertado ao nível da rua numa cavidade estreita para um aquecimento diferente da parede a favor do vento: (a) $\Delta T = 0K$, (b) $\Delta T = 70K$ e (c) $\Delta T = 170K$ (extraído de Fellini *et al.*, 2020).

2.2.2. Dispersão de Poluentes em cânions arborizados

Em ruas arborizadas, onde as árvores ocupam um volume significativo dentro do cânion urbano, o padrão do fluxo turbulento torna-se ainda mais complexo. Nesses contextos, o efeito da vegetação na dispersão de poluentes depende de características específicas, como a forma das copas, a altura dos troncos e o espaçamento entre as árvores (Huang *et al.*, 2019).

Gromke & Rucke (2007) realizaram ensaios pioneiros em túnel de vento, simulando a camada limite atmosférica, por meio de um modelo físico em escala 1:150 de um cânion urbano idealizado com árvores dispostas internamente. O modelo representava uma rua de 18 m de largura, 18 m de altura e 180 m de comprimento, onde o fluxo de aproximação incidia perpendicularmente ao seu eixo. Para avaliar a dispersão de poluentes, foi utilizada a emissão de um gás traçador (SF_6) a partir de uma fonte linear no solo da via (**Figura 22**).

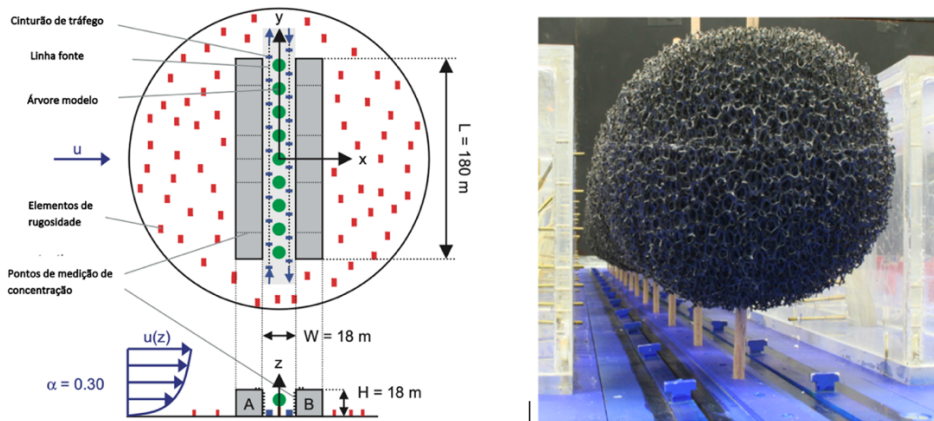


Figura 22 Configuração do túnel de vento para o cânion urbano, escala 1:150 (adaptado de Gromke & Ruck, 2007).

As concentrações foram medidas nas fachadas dos edifícios do cânion utilizando 90 pontos de amostragem, sendo analisadas com um detetor de captura de eletrões (ECD). Observaram que as árvores reduzem a ventilação natural no cânion urbano e aumentam as concentrações de poluentes, especialmente junto às paredes a sotavento (leeward), devido ao bloqueio do escoamento de ar pelas copas das árvores.

O estudo de 2008 utilizou também simulações em CFD, e nos ensaios em túnel de vento, simplificou a configuração, ao utilizar apenas uma grelha preenchida com materiais porosos pré-fabricados a simular a porosidade das copas (**Figura 23**). Em 2009, o modelo foi refinado numa nova abordagem por ajustar a porosidade das copas através de uma estrutura em grelha com diferentes quantidades de material sintético (fibra sintética).

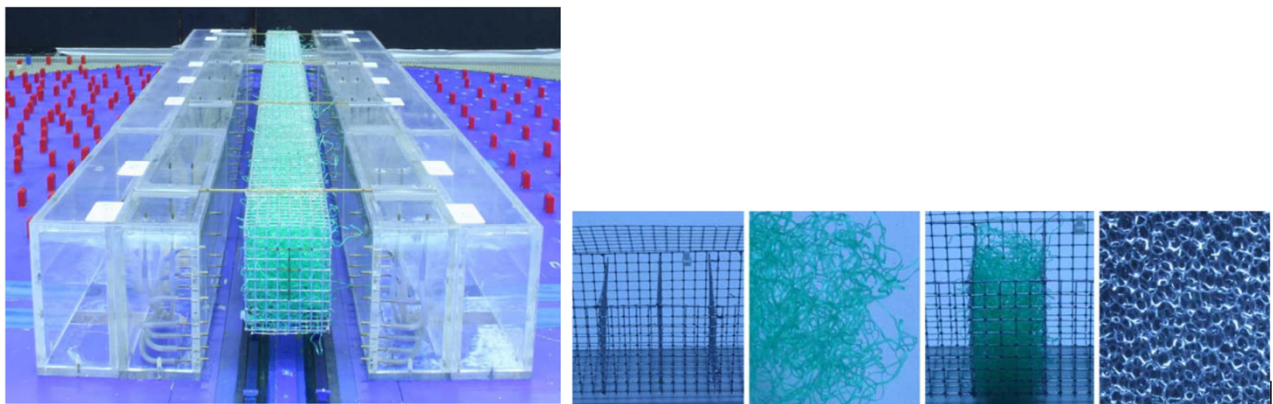


Figura 23 As árvores foram substituídas por grelhas de metal que foram preenchidas com diferentes quantidades de enchimento de fibras (extraído de Gromke *et al.*, 2008; Gromke & Ruck, 2009).

Quando a porosidade volumétrica das copas das árvores é superior a 97%, a dispersão dos poluentes ainda é afetada, mas de forma proporcional à permeabilidade da copa: quanto mais porosa, mais eficaz é a ventilação. Por outro lado, copas com porosidade inferior a 97% passam a se comportar quase como barreiras impermeáveis ao fluxo de ar, comprometendo significativamente a dispersão dos poluentes.

Buccolieri *et al.* (2009), por meio de simulações numéricas em CFD, aprofundaram a análise sobre os efeitos da vegetação em cânions urbanos idealizados, retomando questões levantadas por Gromke & Ruck (2007, 2009). Os autores investigaram especificamente a influência de árvores

dispostas em fileira ao longo da rua, com foco na dispersão de poluentes gerados pelo tráfego. Os resultados confirmaram observações anteriores quanto ao impacto da vegetação: a presença de árvores pode modificar substancialmente a qualidade do ar dentro do cânion, com aumento das concentrações junto à fachada a sotavento e uma redução mais moderada na fachada a barlavento. Nesse estudo, destacaram dois fatores como determinantes principais para a acumulação de poluentes ao nível do pedestre: a razão geométrica entre altura e largura do cânion (H/W) e a velocidade do vento incidente. Observou-se que, quanto menor a razão H/W , menor é o efeito das árvores sobre a concentração de poluentes ao nível do solo. Além disso, em condições de vento fraco, o impacto das árvores tende a ser ligeiramente mais acentuado do que sob ventos mais intensos.

Buccolieri *et al.*, 2011) reinterpretaram as análises em cenários de casos reais, com foco na escala do bairro, próximo a uma junção urbana complexa formada por cânions de razões H/W semelhantes aos investigados em laboratório (**Figura 24**).

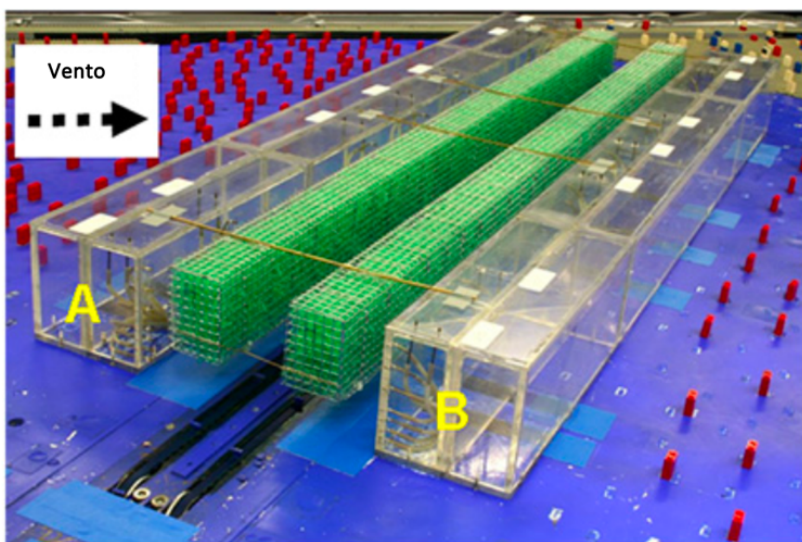


Figura 24 Modelo de túnel de vento de cânion com presença de árvores de alta densidade em duas linhas paralelas ao longo do cânion. (adaptado de Buccolieri *et al.*, 2011).

As simulações CFD foram para dois dias típicos de inverno/primavera. Como é geralmente assumido na literatura, um vento perpendicular leva a concentrações mais elevadas em cânions sem árvores. No entanto, para a direção do vento oblíqua, quanto maior for a razão de aspecto, maior será a diminuição das concentrações de poluentes. Os resultados acima foram também válidos para cânions com árvores, embora neste caso, ao aumentar a relação de aspecto, a diminuição da concentração associada à direção oblíqua do vento foi menos acentuada. De forma geral, assim, pode-se dizer que para proporções relativamente pequenas, o efeito das árvores no aumento da concentração é mais pronunciado quando o vento é perpendicular ao eixo da rua, enquanto que para proporções maiores, o efeito é mais forte para direções oblíquas do vento (**Figura 25 e Figura 26**).

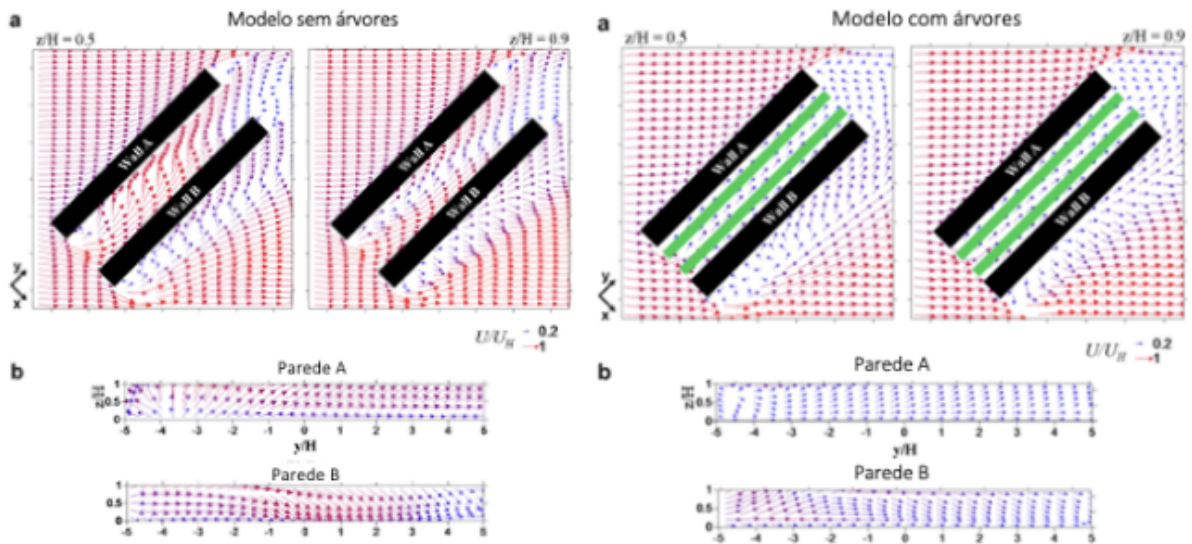


Figura 25 À esquerda, cânion idealizado e sem árvores. À direita, cânion de rua idealizado com plantação de árvores de alta densidade. Vetores de magnitude de velocidade U/U_H obtidos a partir de simulações CFD a $z/H = 0,5$ e $z/H = 0,9$ (a), e junto à Parede A e à Parede B (b) (adaptado de Buccolieri *et al.*, 2021).

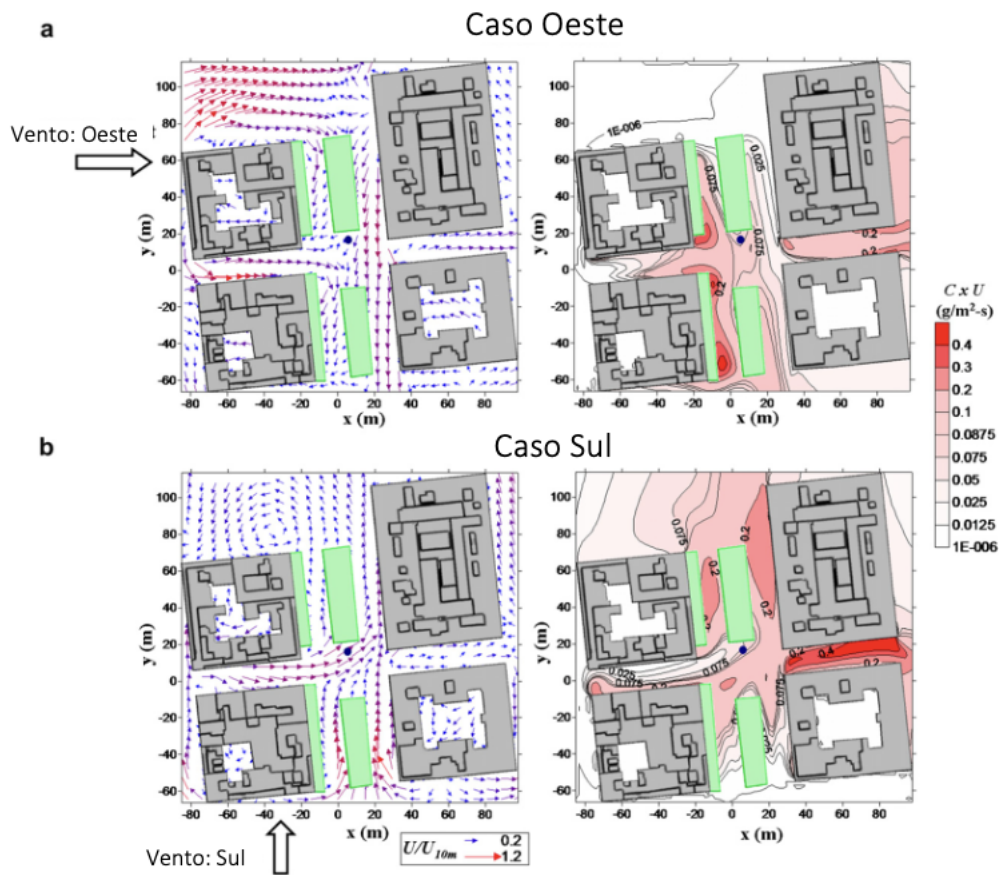


Figura 26 Cânion idealizado com presença de árvores de alta densidade. Vetores de magnitude de velocidade U/U_H obtidos a partir de simulações CFD a $z/H = 0,5$ e $z/H = 0,9$ (a) e junto à Parede A e à Parede B (b) (adaptado de Buccolieri *et al.*, 2011).

Fellini *et al.* (2022) avançaram na compreensão dos efeitos das árvores ao demonstrar, através de ensaios em túnel de vento de alta resolução, que a disposição espacial e a geometria realista das copas — mais do que a porosidade isolada — são determinantes para a ventilação urbana e para a acumulação de poluentes. Os seus resultados desafiam limiares definidos em estudos anteriores,

como os de Buccolieri *et al.* (2011), ao evidenciar que mesmo árvores com elevada porosidade (~90%) podem comprometer a qualidade do ar quando dispostas em configurações inadequadas.

A montagem experimental foi realizada no Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), na École Centrale de Lyon (**Figura 27**), e consistiu na simulação, em escala reduzida, de uma matriz urbana formada por blocos típicos de cidades europeias. A medição das concentrações de poluentes nas ruas foi realizada com um detetor de ionização de chama (FID), permitindo a obtenção de um campo de dados de alta resolução.



Figura 27 Vista aérea da cidade e modelo em escala reduzida em laboratório (extraído de Fellini *et al.*, 2022).

Com base nessas medições, os autores analisaram os efeitos da vegetação arbórea na eficiência de ventilação e na distribuição espacial de poluentes em cânions urbanos (**Figura 28**). A configuração sem árvores ("Zero") apresentou um campo de concentração relativamente homogêneo ao longo do eixo longitudinal, permitindo uma modelação quase bidimensional da dispersão. Em contraste, nas configurações com árvores (meia e total densidade), observou-se uma distribuição acentuadamente tridimensional, com alternância de zonas de alta e baixa concentração, sobretudo na parte inferior do cânion. Esses padrões revelam uma variabilidade significativa na exposição de pedestres, questionando a validade de modelos simplificados que assumem homogeneidade ao nível da rua.

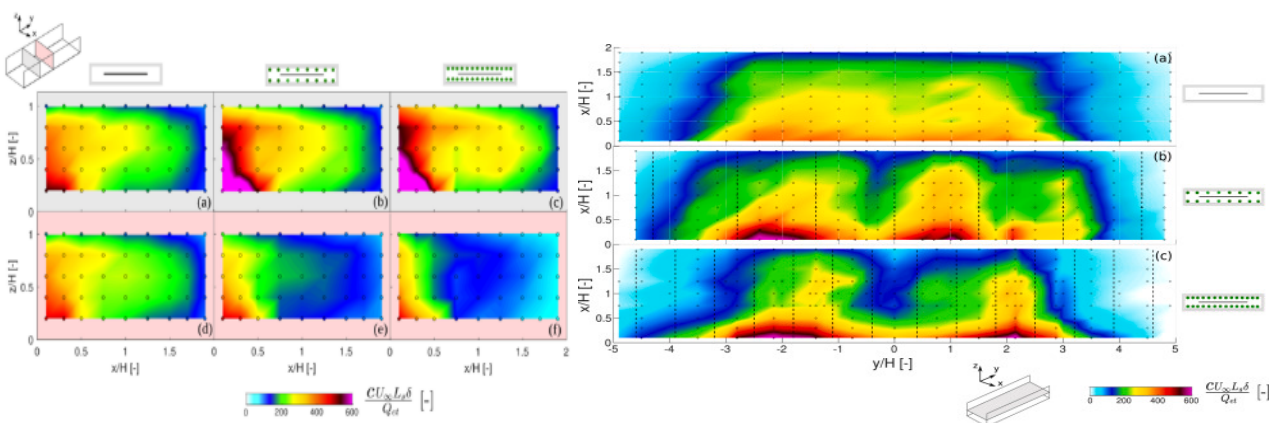


Figura 28 Medições nos cortes transversal e longitudinal (extraído de Fellini *et al.*, 2022).

Jeanjean *et al.* (2017), neste artigo, verificaram que, no caso de ventos perpendiculares, as árvores atuam como obstáculo ao fluxo de ar, levando ao aumento das concentrações, conforme encontrado em muitos estudos anteriores mencionados acima. No entanto, para direções de vento paralelas a um cânion de rua, a presença de árvores leva a uma redução nas concentrações de poluentes.

Huang *et al.* (2019) focaram-se num aspeto morfológico específico e frequentemente negligenciado: a altura do tronco em relação à copa. Utilizando modelação CFD com volumes porosos para representar as copas, analisaram como diferentes alturas de tronco afetam o escoamento ao nível pedonal. Os resultados indicam que copas mais elevadas favorecem a ventilação transversal, pois permitem que o escoamento principal interaja com a rua sem obstáculos diretos, ao contrário das copas baixas que bloqueiam o escoamento lateral e promovem recirculações fechadas. Este fator morfológico revelou-se tão ou mais relevante do que a densidade da copa.

Salmond *et al.* (2013) realizaram um estudo por coleta de dados em Auckland, Nova Zelândia, através de monitorização de NO₂ (pelo método de quimiluminescência) num cânion urbano de tráfego intenso e com árvores caducifólias (Plátanos de Londres) ao longo das calçadas. Para avaliar o impacto da vegetação na distribuição de NO₂, foram utilizadas três estações de monitorização, posicionadas a diferentes alturas (nível do solo, primeiro andar e topo do cânion urbano), ao longo de um período que incluía fases com (outono) e sem (inverno) folhas nas árvores, por métodos estatísticos, comparação entre médias sazonais, análise de variação diurna e impacto da vegetação na dispersão dos poluentes.

Durante o período de folhagem, houve menor transporte ascendente das emissões dos veículos e menor penetração de ar limpo para dentro do cânion urbano. A presença de folhas aumentou o armazenamento de poluentes dentro do espaço da copa das árvores, reduzindo a dispersão vertical. Observou-se, ainda, um aumento da concentração de NO₂ abaixo da copa das árvores durante o período de folhas, enquanto na ausência delas, os poluentes se dispersavam mais uniformemente. A diferença entre os lados barlavento e sotavento do cânion foi reduzida na presença de vegetação, sugerindo que as árvores impactam a circulação do ar e a dispersão dos poluentes.

Em Portugal, Amorim (2003), na sua dissertação de mestrado, desenvolveu modelações CFD para avaliar o impacto da arborização na Avenida da Liberdade, em Lisboa, com base em condições reais de tráfego e meteorologia (**Figura 29**). O trabalho foi realizado com o propósito de contribuir para o desenvolvimento de metodologias adequadas à avaliação da qualidade do ar por intermédio da aplicação de uma ferramenta numérica do tipo CFD.

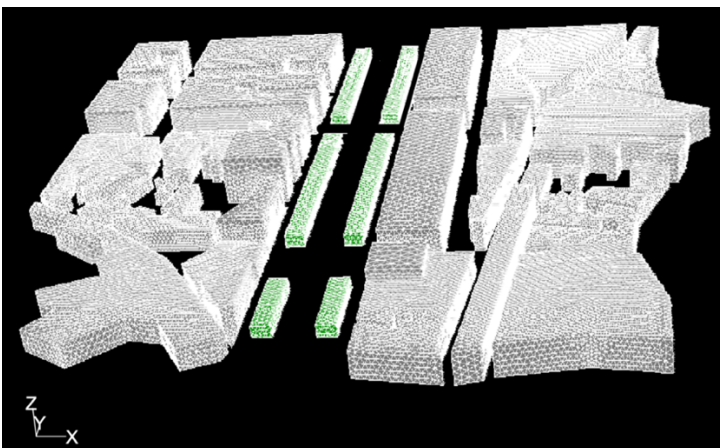


Figura 29 Perspetiva tridimensional dos obstáculos presentes no domínio de estudo (edifícios representados a cinzento e árvores a verde e respetiva malha gerada pelo pré-processador GAMBIT (extraído de Amorim, 2003).

Nestas simulações, a consideração das zonas arborizadas como volumes porosos permitiu a identificação do pronunciado efeito destes elementos sobre o escoamento. Ficou, ainda, expressa a influência da configuração e distribuição dos edifícios sobre o campo tridimensional de concentrações.

Na vista lateral (**Figura 30, esquerda**), a interferência da ventilação do cânion na presença de vegetação. Nota-se que com a presença de árvores, a pluma de poluição é mais concentrada, mais ampla e mais espalhada pela extensão da largura da avenida, enquanto sem, estaria mais restrita a fachada à sotavento. Na **Figura 30, direita**, uma vista de topo demonstra a complexa influência que a morfologia de cânion exerce no padrão do fluxo do vento.

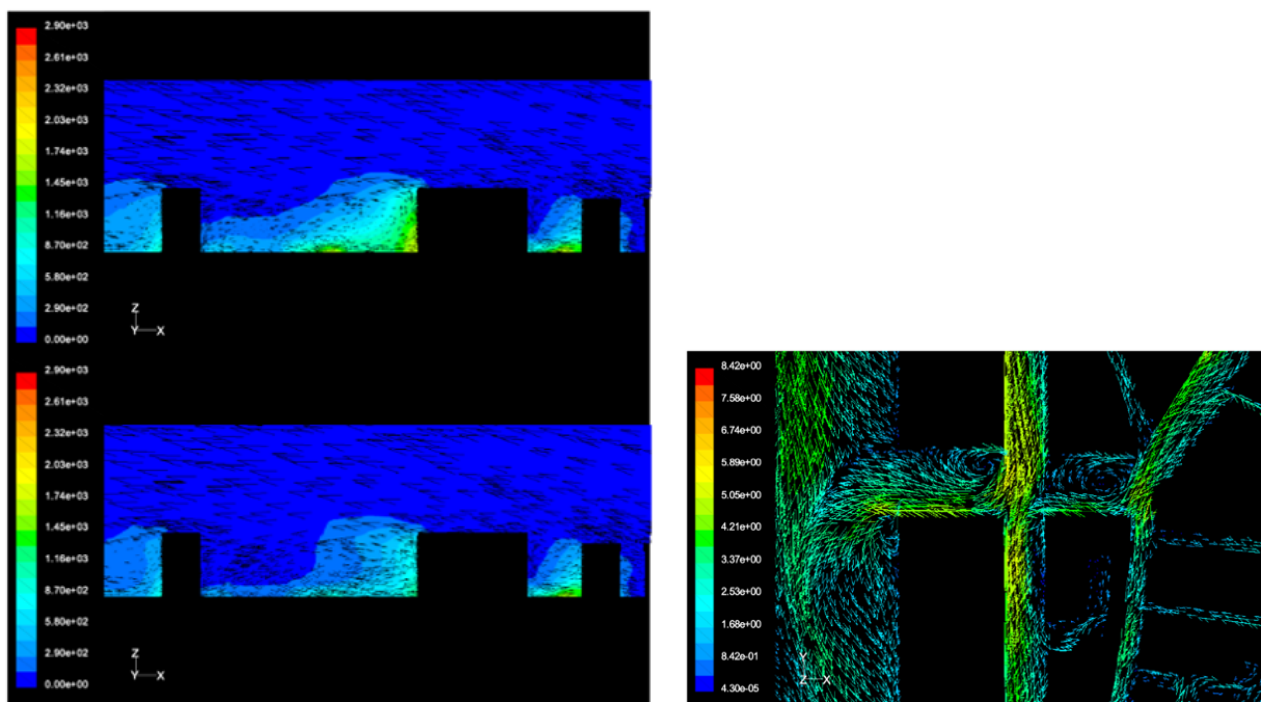


Figura 30 À esquerda, comparação dos campos verticais de concentração e de velocidade na Avenida da Liberdade obtidos com e sem (imagem superior e inferior, respetivamente) a presença de árvores. A figura representa a simulação horária das 1 às 12 h e a escala de cores é referente aos valores de concentração (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$). À direita, pormenor dos vetores de velocidade (valores em m/s) numa zona específica do domínio onde há a ocorrência de várias recirculações de escoamento (extraído de Amorim, 2003).

Para o estudo de Amorim *et al.* (2013), também foi utilizado a morfologia do troço onde está localizada a estação RMQA da avenida da Liberdade como modelo para a simulação. Desta forma, é possível, mais uma vez, verificar que para uma direção do vento de entrada de aproximadamente a 45° , observa-se um aumento das concentrações ao longo da Av. da Liberdade, em particular no lado a sotavento do cânion da rua (no lado onde se localiza a estação). Este comportamento é originado pelos ventos oblíquos que sopram do nível do telhado e induzem um fluxo giratório no sentido anti-horário ao longo do cânion. Como resultado, este fluxo de ar vertical transporta o poluente emitido junto ao nível do solo pelo tráfego em direção ao lado a sotavento da rua (através do espaço aberto sob as copas das árvores), onde o CO (poluente utilizado no estudo) fica retido pela diminuição da taxa de troca vertical do ar com a atmosfera acima do nível do telhado.

As concentrações de CO acontecem nos dois cenários - com ou sem árvores -, porém, com aumento médio de 12% no segundo caso, devido à ação aerodinâmica das árvores sobre as taxas de troca de ar poluído com a atmosfera acima do nível do telhado (**Figura 31**).



Figura 31 Detalhe em apenas uma área selecionada do plano de linhas de corrente horizontais a 3 m de altura e campo de concentração de CO com e sem o efeito de árvores em Lisboa. Os contornos referem-se ao período compreendido entre as 9h e as 10h. Os retângulos não preenchidos indicam blocos de árvores e o triângulo branco é a localização da estação RMQA da Av. da Liberdade (extraído de Amorim *et al.*, 2013).

Nesse mesmo estudo, numa configuração morfológica existente em Aveiro, Amorim *et al.*, 2013, obtiveram resultados nos quais o posicionamento das árvores em relação ao vento de entrada proporcionou uma melhoria na ventilação, com a dispersão de CO dentro da avenida e do entorno dos edifícios adjacentes, evidenciado na análise comparativa dos contornos de concentração na **Figura 32**.

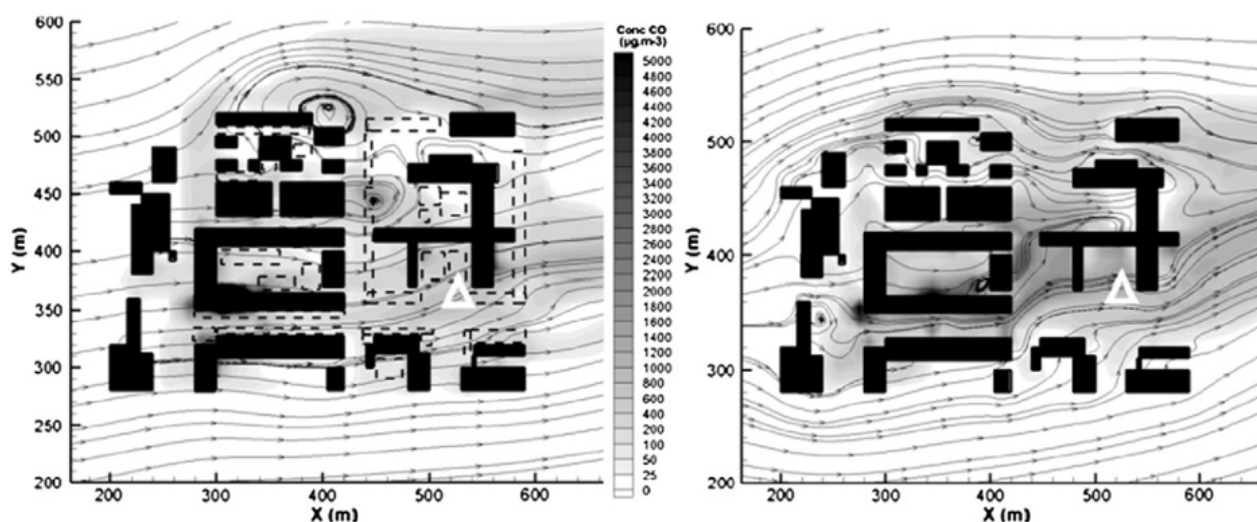


Figura 32 Imagem de grande plano de linhas de corrente horizontais de 3 m de altura e campo de concentração de CO com e sem o efeito de árvores em Aveiro. Os contornos referem-se ao período entre as 10 e as 11 horas da manhã (extraído de Amorim *et al.*, 2013).

Entretanto, pode-se também verificar que, apesar da melhoria geral da qualidade do ar, em áreas específicas, como na localização do RMQA, as árvores levam à formação de pontos quentes adicionais devido ao rearranjo das estruturas de fluxo vertical.

PARTE II - ESTUDO DE CASO - AVENIDA DA LIBERDADE, LISBOA

A avenida da Liberdade é uma das avenidas mais emblemáticas da cidade, percebida pela população como uma avenida-parque, pelas dimensões amplas, pela presença de esplanadas, quiosques, além de lojas, hotéis e restaurantes de luxo sob vasta plantação de árvores caducifólias (**Figura 33**). Por outro lado, é um eixo viário importante, a conectar tanto a parte sul e oeste da área metropolitana, quanto bairros do norte da cidade, ao centro histórico, onde se encontram muitas atrações turísticas, teatros, restaurantes, comércio e instituições, na Baixa Pombalina e margens do Rio Tejo. Entretanto, o tráfego¹¹ constante e a morfologia urbana contribuem para a baixa qualidade do ar no local, como será discutido nos capítulos a seguir.



Figura 33 Vista da Avenida da Liberdade - lado poente, foto tirada em maio de 2025

3. TRÁFEGO RODOVIÁRIO E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM LISBOA

Desde 2010, Portugal tem ultrapassado os limites máximos de poluição atmosférica permitidos pela legislação europeia e nacional. Em maio de 2019, Portugal recebeu uma notificação de alerta da Comissão Europeia (CE) relativa à qualidade do ar, que se seguiu, em fevereiro de 2020, por um parecer fundamentado. Em 2021, a CE decidiu por abrir uma ação contra Portugal no Tribunal de Justiça da União Europeia (TJUE)¹², devido às “excedências contínuas e persistentes do valor-limite

¹¹ Mapa de Ruído da cidade de Lisboa - Anexo I - Mapa estratégico de ruído rodoviário da cidade de Lisboa (Lden e Ln), ano de referência 2022

https://ambiente.pt/sites/default/files/_Ar_Ruido/Ruido/SituacaoNacional/MapasAglomeracoes/ag_pt_00_2_lisboa_rnt.pdf

¹² Tribunal de Justiça da União Europeia. (2023, 29 de junho). Acórdão do Tribunal de Justiça (Sexta Secção) de 29 de junho de 2023 — Comissão Europeia/República Portuguesa (Processo C-220/22). ECLI:EU:C:2023:537. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:62022CJ0220>

anual de dióxido de azoto fixado pela legislação (Diretiva 2008/50/CE) em três zonas de qualidade do ar: «Lisboa Norte», «Porto Litoral» e «Entre Douro e Minho». Este cenário levou à condenação de Portugal pelo (TJUE), em junho de 2023.

3.1. Qualidade do ar e tráfego rodoviário na Área metropolitana

A Avenida da Liberdade localiza-se na área central da cidade de Lisboa, cujo município possui uma área de 100 km² e tem 545 796 habitantes (censos 2021). É o centro da Área Metropolitana de Lisboa (AML), que se estende numa área de 2 962,6 km², com 2 870 208 habitantes (censos de 2021), distribuídos em 18 municípios agrupados em duas sub-regiões: Grande Lisboa e Península de Setúbal, à margem esquerda do estuário do Tejo.

A Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional – Lisboa-Vale do Tejo (CCDR-LVT) é a entidade responsável pela avaliação da qualidade do ar na região de Lisboa Norte, onde se insere a avenida da Liberdade. Segundo o mais recente relatório de qualidade do ar (CCDR-LVT, 2024), nas diversas estações da RMQA-LVT, houve um decréscimo das concentrações para vários dos poluentes nas duas últimas décadas. Para as partículas em suspensão (PM₁₀ e PM_{2,5}), a partir de 2010 foram observadas situações de incumprimento ao valor limite diário nalguns anos, com maior incidência nas áreas de maior tráfego rodoviário da cidade de Lisboa e em zonas industriais da AML Sul. Nos anos mais recentes, as concentrações nos últimos anos têm sido muito condicionadas pela maior ou menor ocorrência de eventos naturais (**Figura 34**).

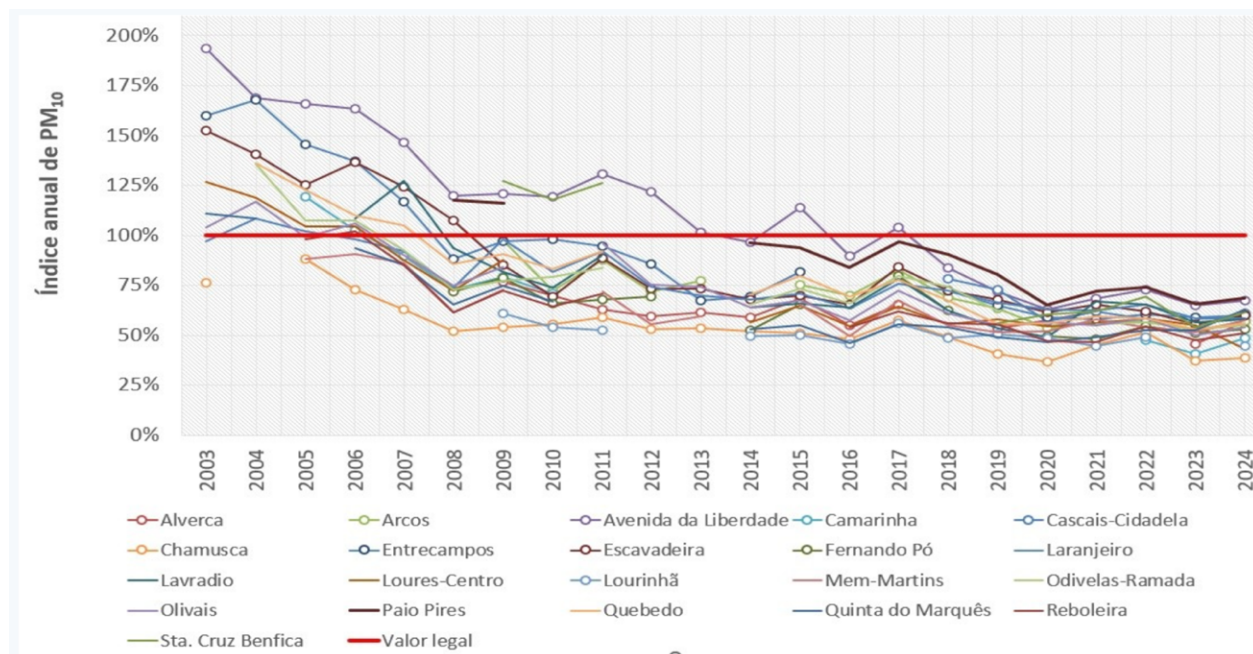


Figura 34 Evolução dos índices anuais de PM₁₀, (extraído do Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar Ambiente na Região de Lisboa e Vale do Tejo CCDR, CCDR-LVT, 2024 - <https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente-e-conservacao-da-natureza/qualidade-do-ar/resultados-qualidade-do-ar-regiao-de-lisboa-e-vale-do-tejo/>).

Por outro lado, alguns problemas de QA persistem nas zonas de maior densidade urbana, nomeadamente, nas zonas centrais e nas vias principais de tráfego da cidade de Lisboa, onde as concentrações de NO₂ foram superiores ao valor limite diário para proteção da saúde humana, imposto pelo regime jurídico de avaliação e gestão da qualidade do ar até então (**Figura 35**).

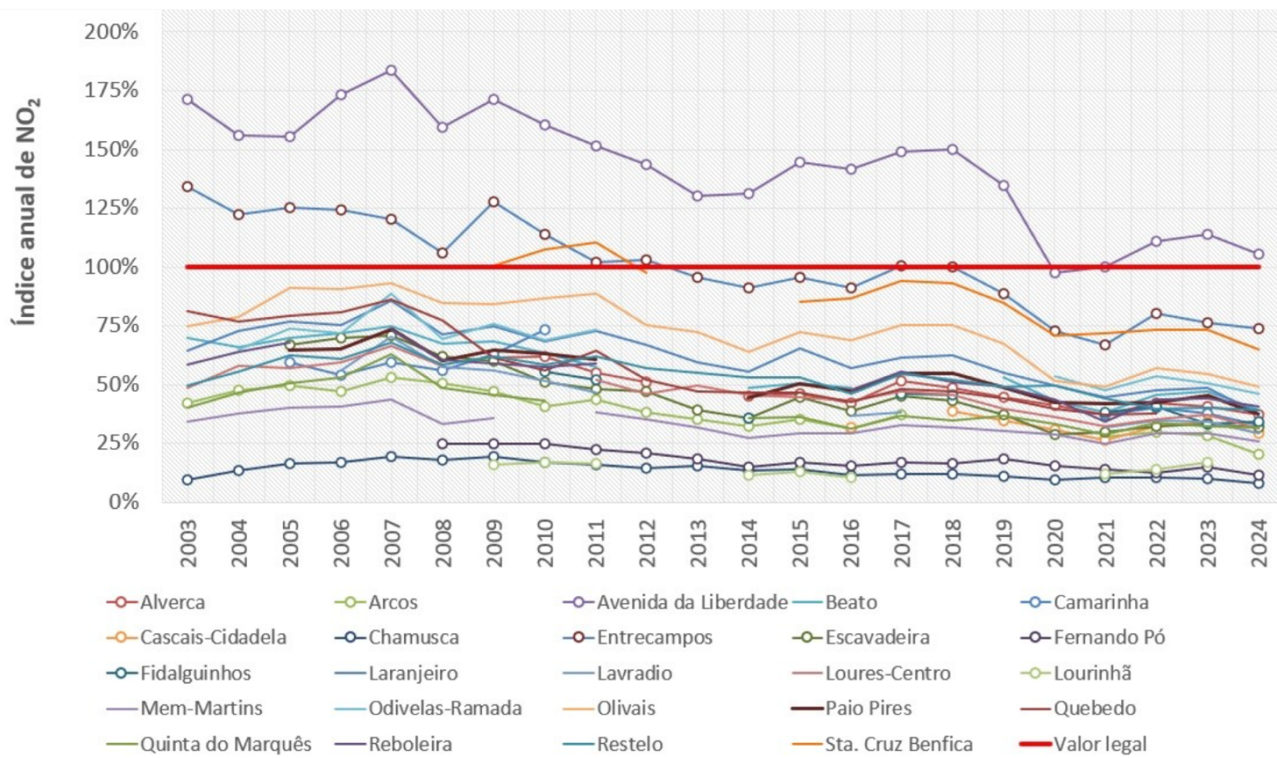


Figura 35 Evolução do índice anual de NO₂, (extraído do Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar Ambiente na Região de Lisboa e Vale do Tejo, CCDR-LVT, 2024 - <https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente-e-conservacao-da-natureza/qualidade-do-ar/resultados-qualidade-do-ar-regiao-de-lisboa-e-vale-do-tejo/>).

Quando se considera as normas para cumprimento em 2030, estabelecidas na Diretiva da Qualidade do Ar da UE Diretiva (UE) 2024/2881, várias estações da RLVT, em 2023, registaram concentrações de NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} e O₃ ainda bem acima dos valores limites para a proteção da saúde humana definidos para 2030. As concentrações de O₃, em todas as estações da RMQA-LVT, registaram níveis superiores aos dois valores guia definidos, e também para o NO₂, poluente para o qual apenas as estações rurais de fundo cumprem os dois valores guia (**Tabela 2**).

Tabela 2 Quadro comparativo quanto ao número de estações em incumprimentos valores limite na legislação nacional em vigor, na nova Diretiva da UE para 2030, valores-guia estabelecidos pela OMS em 2021 (CCDR-LVT, 2023).

		Regulamentação nacional atual		Diretiva (UE) (2030)		Recomendações da OMS 2021 (valores guias)	
		Valor	Nº de estações em incumprimentos / total de estações	Valor	Nº de estações em incumprimentos / total de estações	Valor	Nº de estações em incumprimentos / total de estações
NO ₂	Horário	200 ^a	0/24	200 ^b	0/24	200 ^g	0/24
	Diário			50 ^a	3/24	25 ^c	21/24
	Anual	40	1/24	20	4/24	10	21/24
PM ₁₀	Diário	50 ^d	0/21	45 ^a	0/21	45 ^c	1/21 [*]
	Anual	40	0/21	20	2/21 [*]	15	16/21 ^{**}
PM _{2.5}	Diário			25 ^a	0/9	15 ^c	8/9 ^{***}
	Anual	25	0/9	10	0/9	5	5/9 ^{***}
O ₃	Max. diário	120 ^e	0/18	120 ^a	1/18	100 ^c	18/18
	Pico Sazonal					60	18/18

^a Permitida 18 horas ou dias em ultrapassagem

^b Permitida apenas uma ultrapassagem ao ano

^c Permitido 3-4 dias em ultrapassagem no ano

^d Permitido 35 dias em ultrapassagem no ano

^e Permitido 25 dias em ultrapassagem no ano

^f Média dos máximos diários das médias de 8hrs nos 6 meses consecutivos com as médias mais altas.

Foram considerados os meses de abril a setembro

^g Limites que não foram revistos em 2021

^{*} 0 estações descontando eventos naturais

^{**} 6 estações em ultrapassagem descontado os eventos naturais

^{***} Não foram testados os descontos dos eventos naturais

Os níveis de partículas PM₁₀ e PM_{2.5} observados em 2023 não cumprem os valores guia recomendados pela OMS em algumas estações, no entanto, a diferença face ao valor recomendado pela OMS, não é tão relevante como para o NO₂, e está em grande parte relacionada com a ocorrência de eventos naturais

No ponto seguinte é apresentada a caracterização da região de Lisboa em termos da dinâmica geodemográfica e do deslocamento pendular diário intermunicipal e intramunicipal, de forma a melhor compreender os fatores diários e recorrentes que influenciam a qualidade do ar na região.

3.1.1. Tráfego pendular e demografia - Área metropolitana de Lisboa

Segundo o Relatório de Caracterização e Diagnóstico do PMMUS (Plano Metropolitano de Mobilidade Urbana Sustentável, TML, 2024)ⁱ, a AML Norte continua a concentrar mais de 70% da população metropolitana (**Figura 36**), mas a AML Sul manteve um crescimento mais acentuado,

favorecido por melhorias nas acessibilidades, como a construção da Ponte Vasco da Gama (em 1998), o Eixo Ferroviário Norte/Sul e a conclusão da A33 (em 2021).

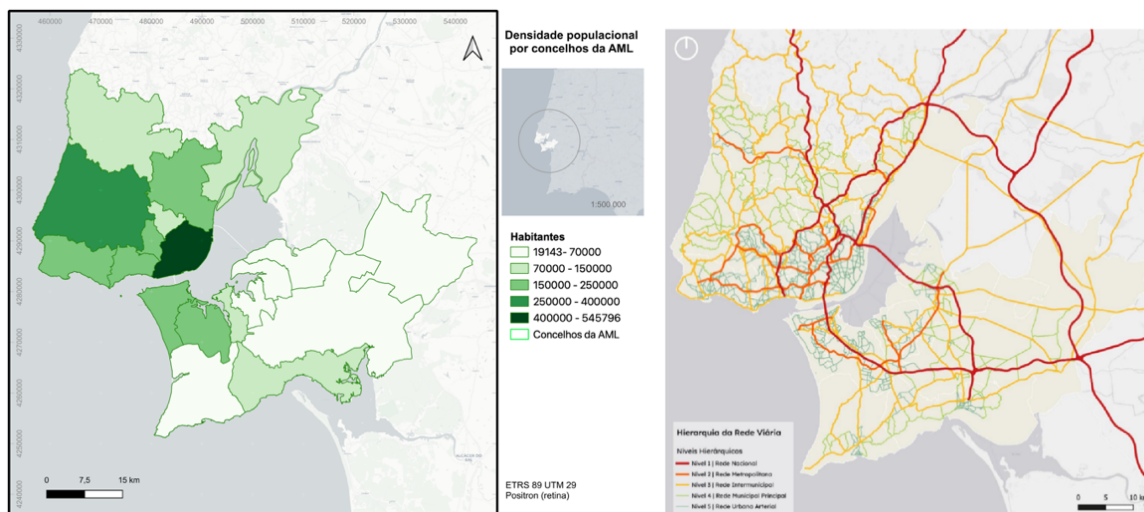


Figura 36 AML - à direita, densidade populacional (dados do censo 2021). Hierarquia da rede viária da AML (PMMUS – AML – Relatório Técnico – Julho 2024, TML, 2024)¹³.

A expansão da conurbação urbana em torno da capital política e económica do país implica na expansão dos deslocamentos pendulares diários de veículos, periferia-centro, para chegar ao trabalho, ao estudo, na procura por serviços públicos, comércio, lazer, diretamente relacionados com a localização de polos geradores de tráfego nas principais vias de acesso à cidade. Segundo o IMT, (2025)¹⁴, são cerca de 390 mil veículos que circulam diariamente por Lisboa¹⁵, mais 20 mil que em 2017. Os maiores aumentos registaram-se nas vias com origem na Margem Sul, em Loures e Odivelas, e na região Oeste.

Em 2019, as estimativas de emissões de NO_x (CCDR-LVT *et. al.*, 2023), por sector de atividade na RLVT e no concelho de Lisboa confirmaram que o NO₂ tem como principal origem as emissões do setor de Transporte Rodoviário, com cerca de 76% das emissões totais deste poluente, seguido das contribuições dos sectores da Indústria e Construção (10%). Para o concelho de Lisboa o peso do Transporte Rodoviário¹⁶ foi um pouco menor (68%), com o peso, também, do Transporte Aéreo (17%) e do Transporte Marítimo (12%) (CCDR-LVT, 2023).

3.2. Qualidade do ar e tráfego rodoviário na Cidade de Lisboa

Em Lisboa, existem 6 estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar (RMQA) espalhadas pela cidade (**Figura 37**). Duas estações estão localizadas diretamente em avenidas que recebem tráfego intenso – Entrecampos e Avenida da Liberdade; duas estações, em ruas secundárias, mas

¹³ <https://pmmus.tmlmobilidade.pt/>

¹⁴ <https://www.imt-ip.pt/biblioteca/reportorio-geral/estatisticas-reportorio-geral/relatorios-setoriais-imt/#anuarios-estatisticos-e-boletim-estatistico>

¹⁵ Muitos veículos que circulam podem não ter Lisboa como destino final, ou seja, é um tráfego de passagem a passar pela região.

¹⁶ De se destacar que veículos pesados de passageiros (29%) apresentam emissões muito semelhantes aos ligeiros de passageiros (28%),

muito próximas de vias de tráfego de circulação intensa – Santa Cruz de Benfica e Olivais -; e duas, em localidades de bairro – Restelo e Beato. Apesar de poucas, foram instaladas em morfologias urbanas diferenciadas que servem de padrão (morfologia urbana/dispersão de poluentes) para outras morfologias similares pela cidade.

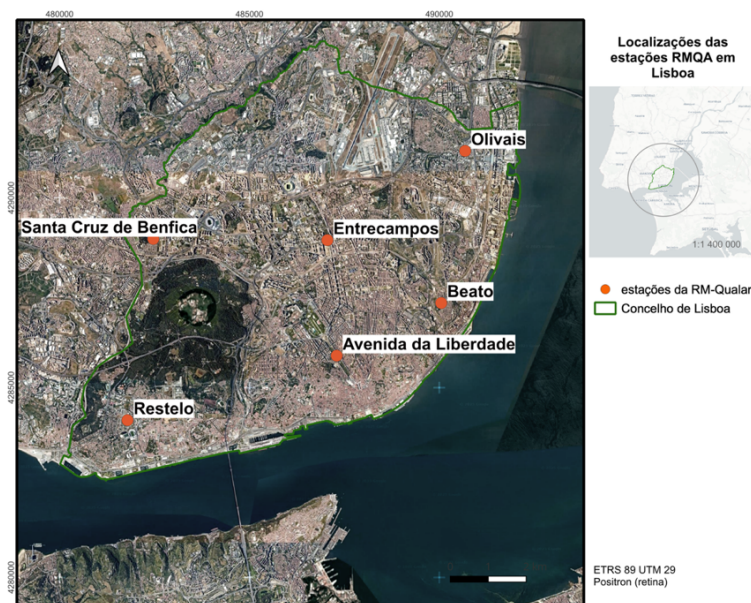


Figura 37 Localização das estações de monitorização na cidade de Lisboa (Google Earth).

Na **Tabela 3**, as características das estações da RMQA instaladas na cidade de Lisboa:

Tabela 3 Locais e tipos das estações da RMQA instaladas na cidade de Lisboa

Tipo	Concelho	Estação	Poluentes medidos atualmente
Urbana de tráfego ¹⁷	Lisboa	Avenida da Liberdade ¹⁸	PM ₁₀ , NO ₂ , NO _x , CO, NO
		Santa Cruz de Benfica ¹⁹	PM ₁₀ , NO ₂ , NO _x , CO, NO
		Entrecampos ²⁰	SO ₂ , PM ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , NO _x , CO, C ₆ H ₆ , NO, PM _{2.5}
Urbana de Fundo ²¹	Lisboa	Olivais ²²	SO ₂ , PM ₁₀ , O ₃ , NO ₂ , NO _x , CO, C ₆ H ₆ , NO, PM _{2.5}
		Beato ²³	SO ₂ , O ₃ , NO ₂ , NO _x , NO
		Restelo ²⁴	O ₃ , NO ₂ , NO _x , CO, NO

Nos últimos 6 anos, de 2020 a 2025 (dados validados até 2023) entre as seis estações localizadas na cidade, a avenida da Liberdade continuou a apresentar médias anuais de NO₂ acima das demais (**Figura 38**), e Portugal pode ser multado.

¹⁷ As 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

¹⁸ NO₂, NO_x, NO – por quimiluminescência; PM₁₀ por absorção de Radiação Beta.

¹⁹ NO₂, NO_x, NO – por quimiluminescência; PM₁₀ por absorção de Radiação Beta.

²⁰ NO₂, NO_x, NO – por quimiluminescência; PM₁₀, PM_{2.5} por absorção de Radiação Beta.

²¹ As 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

²² NO₂, NO_x, NO – por quimiluminescência; PM₁₀, PM_{2.5} por absorção de Radiação Beta.

²³ NO₂, NO_x, NO – por quimiluminescência.

²⁴ NO₂, NO_x, NO – por quimiluminescência.

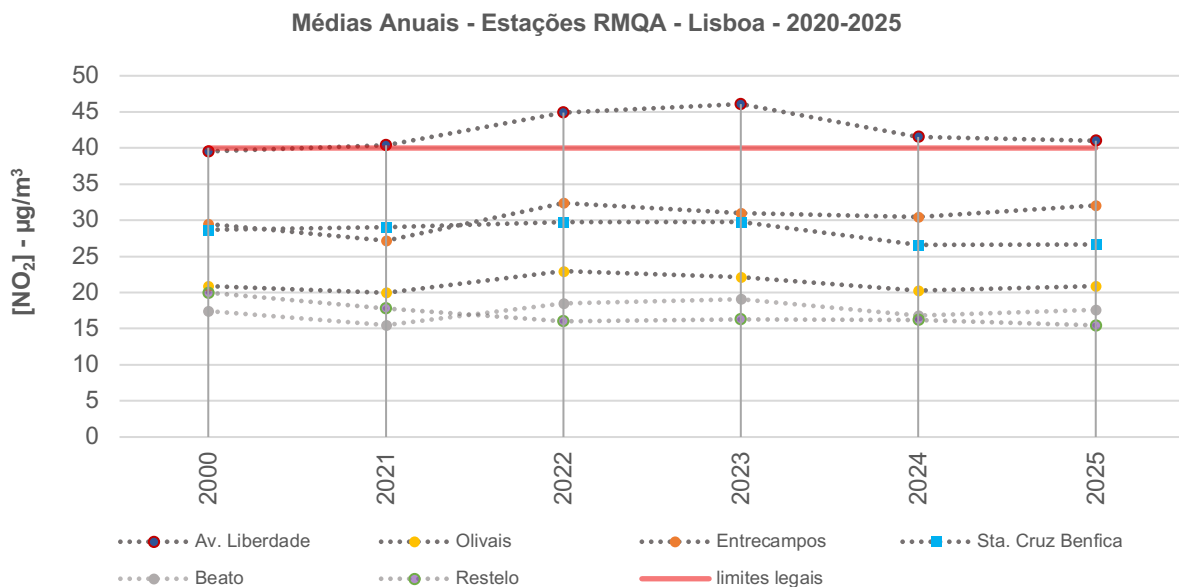


Figura 38 Médias anuais de NO₂, de 2020 a 2025 nas estações RMQA na cidade de Lisboa (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Em retrospectiva, no ano de 2020, com a crise da pandemia de COVID19, o quotidiano sofreu uma transformação. Foi criada uma situação anómala com a cessação (ou redução drástica) das atividades pelo confinamento obrigatório que acompanhou o decreto de estado de emergência de 18 de março de 2020 (Decreto do Presidente da República n.º 14-A/2020).

Pelos dados, pode-se inferir que a circulação viária não cessou completamente, mas a foi reduzida aos serviços e atividades essenciais e imprescindíveis. O mês de abril de 2020 pode ser, assim, considerado um marco zero, um ponto de referência para os melhores valores possíveis de qualidade do ar, quando todas as estações localizadas na cidade de Lisboa apresentaram índices de concentração de NO₂ abaixo dos valores limites da nova legislação (**Figura 39**).

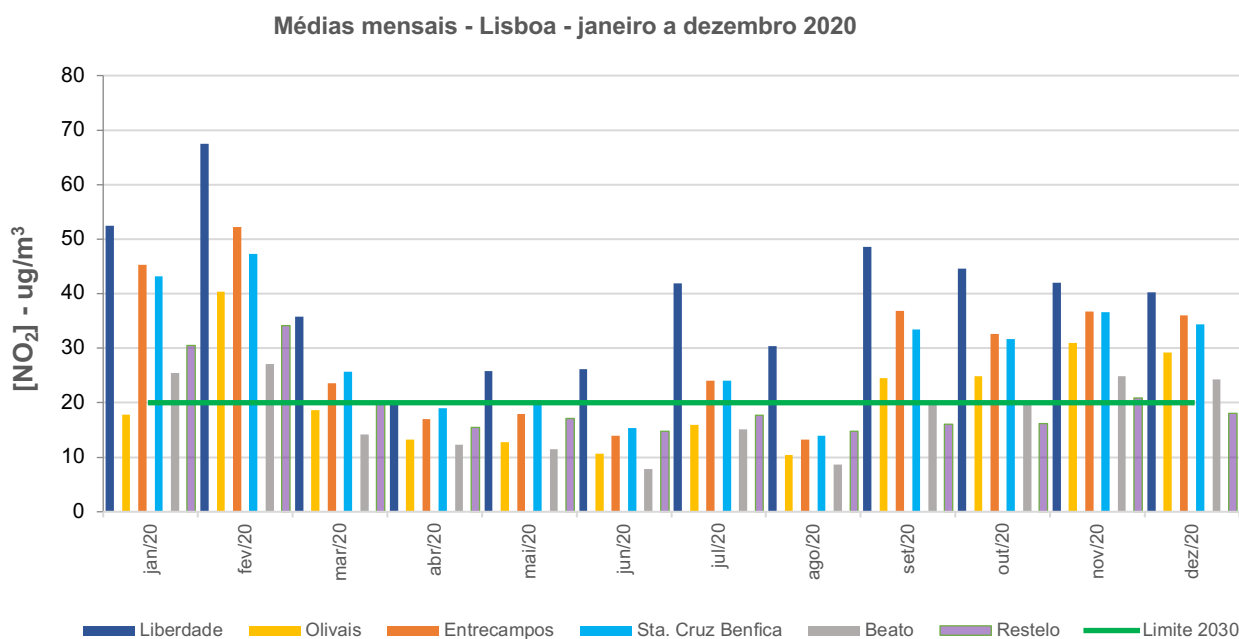


Figura 39 Concentrações médias de NO₂ para todos os meses de 2020 em estações da Área Metropolitana de Lisboa Norte (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

A partir de 4 de maio de 2020, entretanto, num plano de desconfinamento, permitiu-se a volta às escolas, com restrições temporárias, o transporte público pôde circular e o comércio pôde reabrir, com distanciamento social e uso de máscaras em todos os locais fechados. Apesar do incentivo ao teletrabalho, que mantinha uma grande parte das pessoas em casa e de o setor de turismo ter, praticamente, cessado, assim como o setor cultural, com a proibição de festivais, concertos, lentamente, a curva das concentrações de NO₂ reiniciou o movimento ascendente. Mais uma vez, as concentrações de NO₂ na avenida descola-se das outras, a mostrar a importância desta via, para a mobilidade da cidade.

Em 2020 e em 2021, a Avenida da Liberdade conseguiu cumprir o valor limite anual de 40 µg/m³ (média de 40 µg/m³ em 2020 e 2021). Porém, com a vacinação em massa da população, o regresso massivo dos veículos às ruas, fatores meteorológicos desfavoráveis, formaram as condições que concorreram para a que as médias com valores mensais, já no outono de 2021, fossem muito elevadas, sobretudo, na Avenida da Liberdade (**Figura 40**).

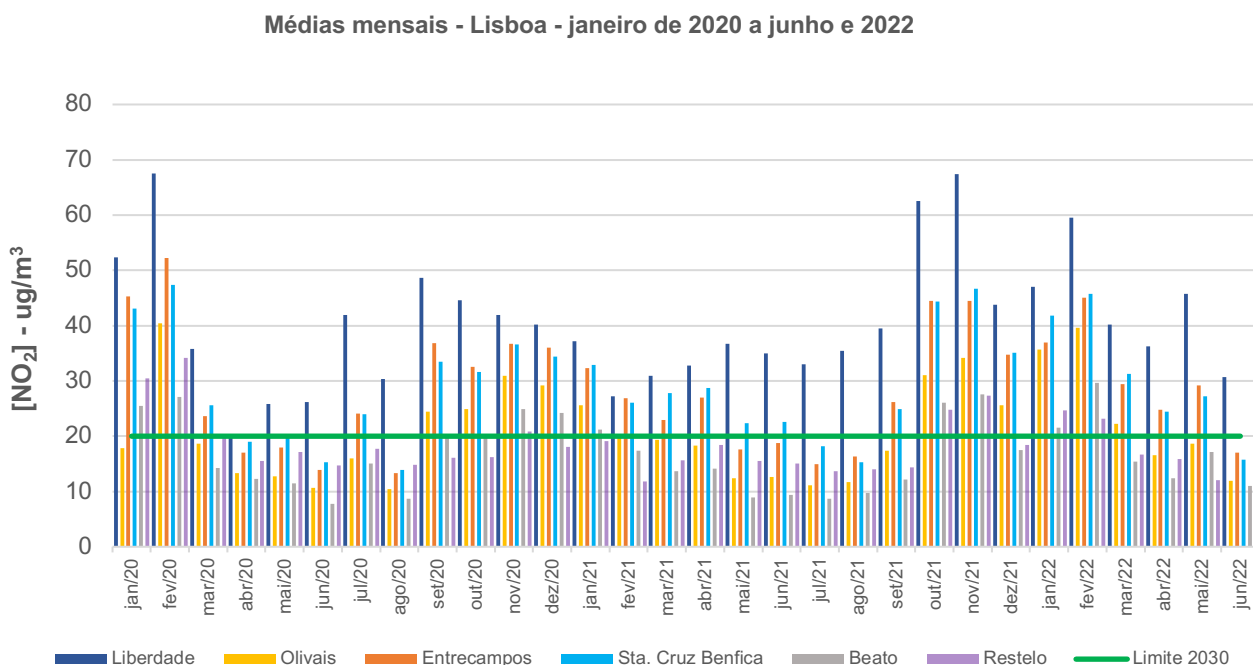


Figura 40 Concentrações médias anuais de NO₂ entre janeiro de 2020 e junho de 2022 em estações da Área Metropolitana de Lisboa Norte (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

A partir de 2022, apesar de haver restrição para veículos produzidos antes do ano 2000 (sem sistemas de menor emissão) na ZER (Zona de Emissões Reduzidas) da Zona 1 (zona da Baixa e da Av. da Liberdade), desde 2015, os níveis de concentração persistiram em níveis altos (**Figura 41**).

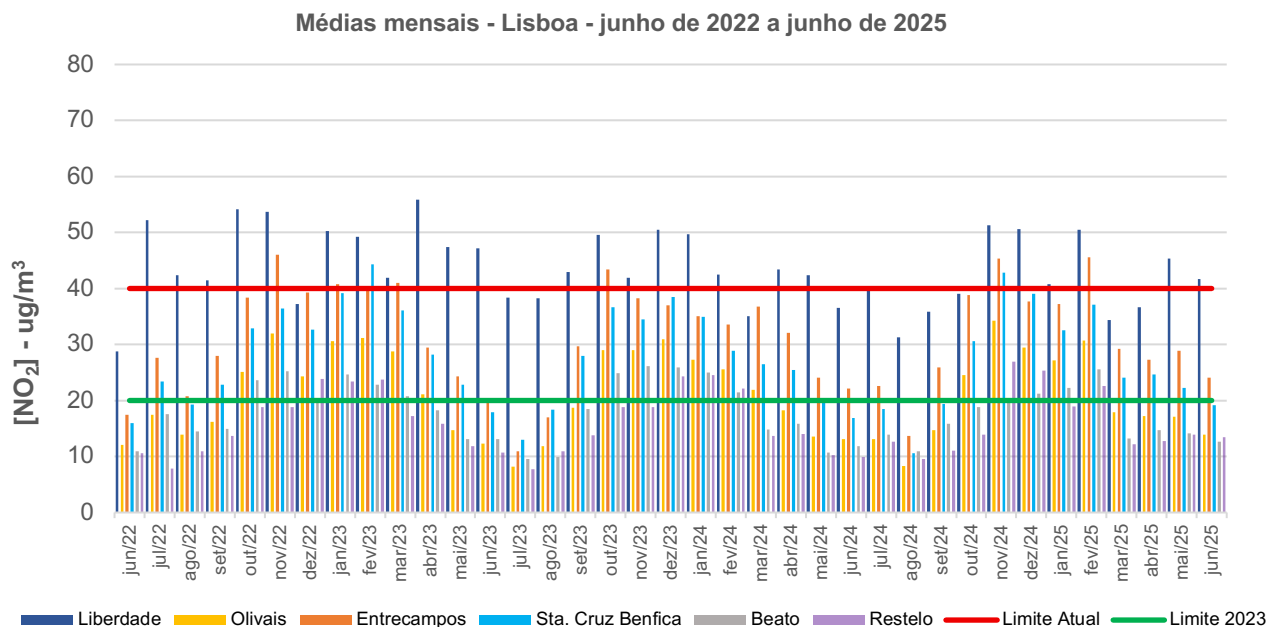


Figura 41 Concentrações médias anuais de NO₂ entre junho de 2022 e junho de 2025 em estações da Área Metropolitana de Lisboa Norte (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Desde 2021, algumas medidas foram tentadas, como a fiscalização mais eficiente dos veículos, segundo as restrições da ZER (medida difícil de realizar), a aplicação de restrições ainda mais exigentes (medida muito impopular), novas configurações das vias laterais e instalação de ciclovias no lugar de estacionamento (incompleta), ou ainda o fechamento da via nos domingos e feriados. (essa proposta, embora aprovada pelo executivo da Câmara de Lisboa (2022), não foi implementada²⁵).

Entretanto, para atender aos valores-limite para 2030, será necessário adotar medidas drásticas, como restringir completamente a circulação de carros na avenida (com exceção necessária aos veículos de serviços públicos, de carga e descarga, e autocarros com a total descarbonização da frota). Por um lado, devido ao relevo (a área central está encaixada entre colinas), a avenida da Liberdade segue sendo, por suas dimensões, uma das vias, se não a mais importante via de acesso à região da Baixa Pombalina, sendo necessário, para isso, a gestão eficiente do tráfego de todas as vias da região. Por outro lado, a Carris, companhia de transporte de Lisboa, iniciou a descarbonização da frota de autocarros. Existem, no mínimo quatro linhas que fazem paragens, intermitentemente, ao longo da avenida e dessas, apenas uma, já circula com veículos elétricos. Se ao longo de 2026, a prioridade for a descarbonização de todas as linhas a cobrir o trajeto, haverá uma chance de melhoria.

²⁵ A polémica incluiu, entre outros, a entidade que reúne lojas, hotéis, restaurantes, serviços e espaços culturais, que advertiu que o fecho ao trânsito poderia provocar uma quebra de 18% a 20% na faturação, além de impactos diretos como a perda de entre 200 a 300 postos de trabalho. A associação apontou ainda para consequências negativas no turismo, cultura e na logística dos estabelecimentos (teatros, sobretudo aos domingos e feriados). (https://rr.pt/noticia/pais/2022/05/24/lisboa-corte-de-transito-na-av-da-liberdade-pode-gerar-reducao-ate-300-postos-de-trabalho/285392/?utm_source=chatgpt.com)

Como já referido no capítulo 2, a capacidade de dispersão de poluentes está diretamente relacionada ao regime de ventos e à morfologia urbana, que serão apresentados a seguir para a cidade de Lisboa.

4. ASPETOS MORFOLÓGICOS E GEOCLIMÁTICOS DA CIDADE DE LISBOA

A caracterização da cidade de Lisboa, nos diversos aspetos, climáticos, geográficos, morfológicos, torna-se imprescindível para a compreensão do contexto urbano e climático no qual o caso em estudo se insere.

4.1. Aspetos climáticos

O clima da região é do tipo mediterrânico com influência atlântica, caracterizado por verões quentes e secos, e invernos suaves e húmidos. A análise da evolução dos valores climatológicos da temperatura mostra que os meses com valores mais elevados são julho e agosto e os meses mais frios são caracteristicamente dezembro e janeiro (**Figura 42**).

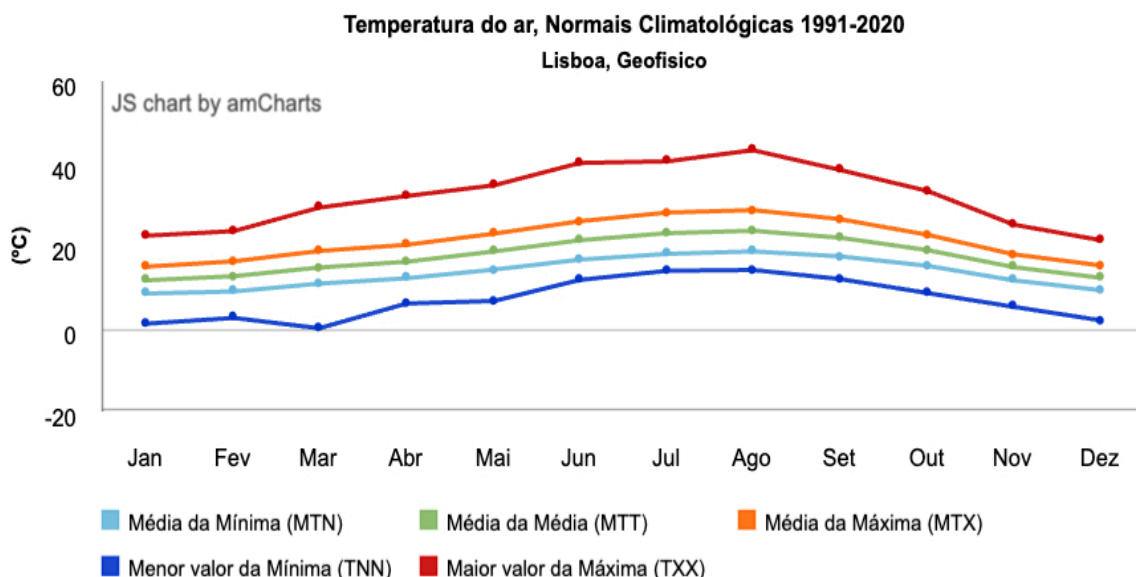


Figura 42 Temperatura do ar (Normas Climatológicas 1991 a 2020, (Estação Lisboa Geofísico - IPMA).

Os valores climatológicos mostram que a precipitação se distribui entre 600 mm e 1 000 mm anuais, sendo o mês de novembro quando se atingem valores médios mais elevados (**Figura 43**).

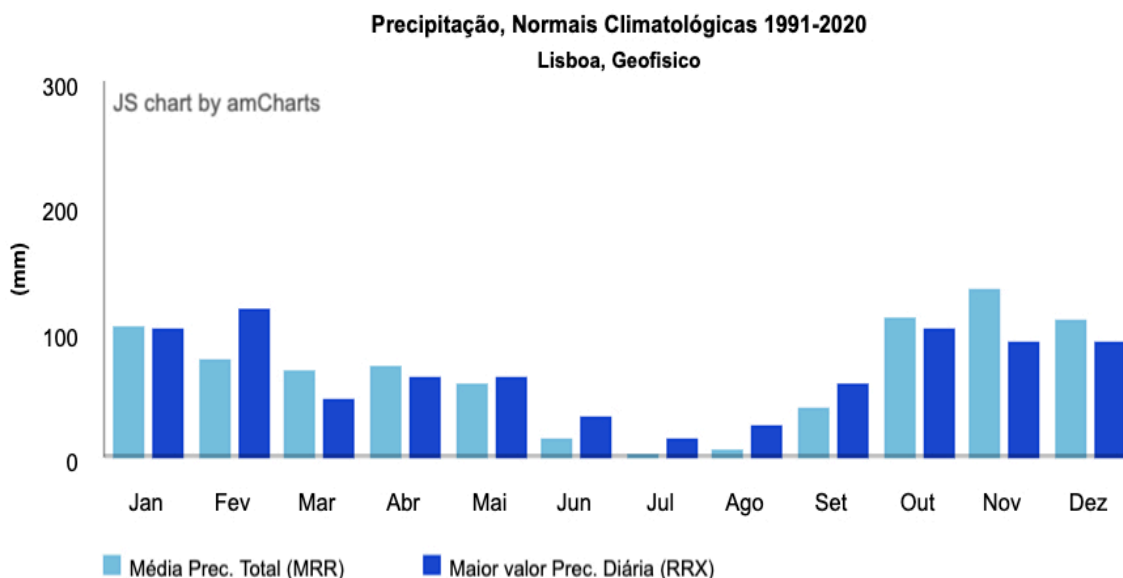


Figura 43 Precipitação (Normais Climatológicas, 1991 a 2020, (Estação Lisboa Geofísico - IPMA)

O regime regional (de mesoescala) de ventos resulta do efeito da circulação conjunta do anticiclone dos Açores e da depressão de origem térmica que se forma em regra sobre a região central da Península Ibérica. Esta característica tem expressão nos meses de primavera e verão. Nos meses de inverno e outono, também influenciados pela circulação anticiclónica, existe uma maior variabilidade dos estados de tempo.

A circulação atmosférica característica desta região é influenciada pelo forte contraste oceano-continente que favorece o estabelecimento de brisas marítimas, que desempenham um papel importante na renovação do ar nas zonas costeiras. O regime de vento dominante (Norte), de intensidades médias mais elevadas no litoral e zonas expostas, é mais persistente no verão, particularmente na parte da tarde. Atingem velocidades relativamente fortes, superiores a 20 km/h (5,5 m/s) e dispersam o calor acumulado, e os poluentes atmosféricos, com uma consequente melhoria da qualidade do ar, sobretudo na região planáltica ao norte da cidade (**Figura 44**).

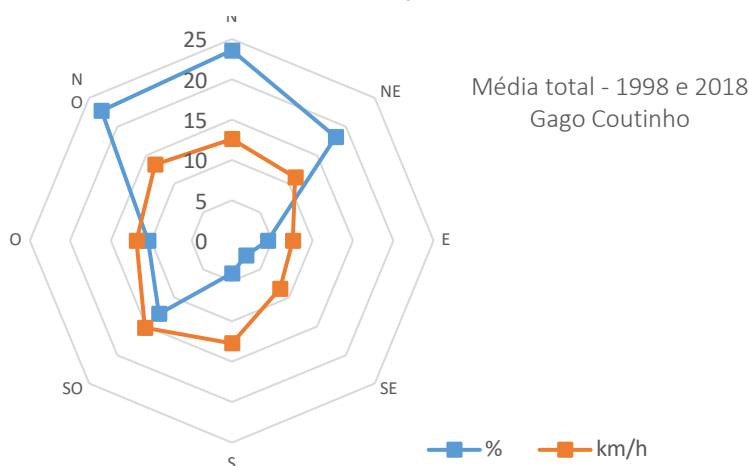


Figura 44 Rosa-dos Ventos – Intensidade e frequência médias entre 1998 e 2018²⁶ (Estação meteorológica Gago Coutinho).

²⁶ Nos Anexo 2 e Anexo 3, são apresentadas as rosas-dos-ventos para todos os anos do período.

No inverno, são mais comuns os dias de inversão térmica, quando as condições meteorológicas favorecem as altas concentrações de poluentes. O aumento da nebulosidade associada a ventos fortes e precipitação correspondem a diminuição da poluição (Alcoforado, 1987). No verão os valores críticos ocorrem em situações de estabilidade atmosférica, precedidas por situações de calma nas 24 horas antecedentes.

As brisas que sopram do Oceano Atlântico e do estuário do Tejo em direção ao continente são percebidas facilmente quando se «apaga» a circulação geral²⁷. Sopram, naturalmente, a uma velocidade de 7 a 18 km/h, estendem-se para o interior até 30 km e afetam o fluxo de ar até uma altura de 1 a 2 km. Devido a sua trajetória, as brisas de mar ou do estuário transportam, em grande parte dos casos, ar fresco e húmido. Este fenómeno de circulação local ocorre em 30% dos dias de verão (Alcoforado, 1987).

Outro fenómeno climático, que condiciona a ventilação da cidade, são as brisas térmicas, que se caracterizam pela advecção de ar induzida por diferenças de temperatura entre as superfícies terrestres e aquáticas, que resulta num sistema de brisas na costa que inverte a sua direção entre o dia e a noite. As velocidades noturnas dos ventos de brisa terrestre são menores do que as diurnas devido a função de força solar que amplia a instabilidade atmosférica.

4.2. Aspetos geomorfológicos

A geografia regional, e o relevo da cidade são fatores importantes que condicionam a circulação atmosférica local. No concelho de Lisboa, a geomorfologia revela a presença de áreas significativas de cabeços largos na zona central e zonas com relevo moderado nas restantes áreas²⁸ (**Figura 45**). A oeste, a colina de Monsanto atinge 200 m de altitude. A norte, dominam as zonas planálticas, compostas por áreas de relevo pouco acentuado com a ocorrência de zonas baixas aluvionares. O planalto inclina-se suavemente para sul, de onde quatro vales principais²⁹ correm ao Tejo, dentre eles, o Valverde (Av. Liberdade).

²⁷ São impossíveis de reconhecer em dias de vento forte ou, no caso de a direção da brisa ser próxima à do vento de gradiente

²⁸ O território de Lisboa é dominado por áreas com altitude inferior a 100m.

²⁹ Os principais vales de Lisboa, diretamente tributários do estuário do Tejo encontram-se em Alcântara, Chelas, Valverde (Av. Liberdade), Arroios (Almirante Reis) Marvila e Olivais, que definem colinas, sendo as principais a colina do Castelo, da Graça e Senhora do Monte (S. Gens). Destaca-se a Serra de Monsanto na zona ocidental de Lisboa, limitada a poente pelo Vale da Ribeira de Alcântara. Constituída pelo complexo vulcânico de Lisboa, é o ponto dominante da paisagem

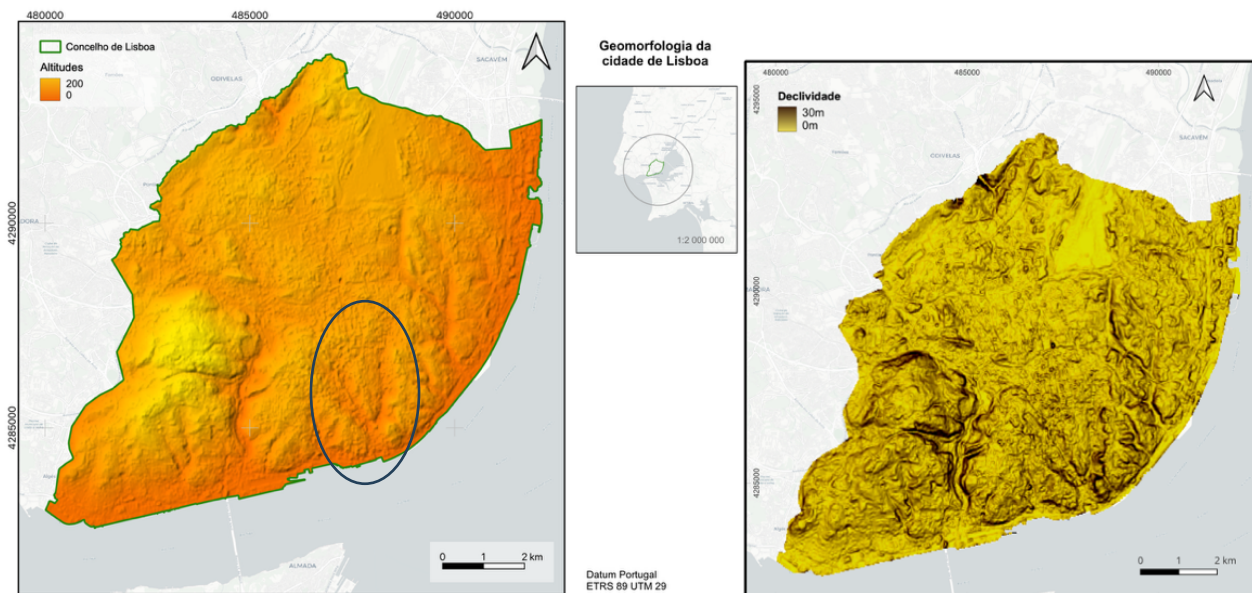


Figura 45 Hipsometria do território da cidade com o Valverde (Av. Liberdade) em destaque à esquerda, e à direita, a declividade do terreno a complementar a visualização.

4.3. Morfologia urbana - rugosidade e ventilação

Na cidade de Lisboa coabitam diferentes tipos de geometrias urbanas. Por um lado, traçados desordenados, que tiveram origens mais ou menos espontâneas, condicionadas pela natureza dos declives e, por outro lado, planos de urbanização que imprimiram malhas com alguma regularidade em vastas áreas, como resposta ao crescimento populacional (Salgueiro, 2002).

O centro tradicional está localizado perto do rio. A cidade cresceu para norte, com a abertura da Avenida da Liberdade, e nordeste, com o prolongamento da Av. Almirante Reis desde a Alameda até ao Areeiro, que, conjuntamente à abertura da Avenida do Aeroporto, formam os eixos de orientação geral Sul/Norte (Alcoforado *et al.*, 2009).

Com o recurso a modelos numéricos, Lopes (2003) realizou estudos sobre as modificações no padrão dos ventos ao longo de um decênio, relacionando-as ao crescimento urbano de Lisboa no mesmo período de 1971/1980 (Lisboa/Portela). Utilizou valores horários de velocidade e direção do vento, as características do relevo, mas também a rugosidade aerodinâmica de vários bairros e tendências futuras de expansão da cidade, para modelar vários cenários de previsão de modificações dos campos de ventos para as próximas décadas.

Em 2006, Alcoforado *et al.* realizaram estudos para determinar os *climatopos*³⁰ de Lisboa, ou seja, áreas homogêneas do ponto de vista físico (morfologia urbana e posição topográfica) que “interagem” de modo particular com a atmosfera (rugosidade aerodinâmica), e definiram mapas de

³⁰ Os *climatopos* são mapas elaborados por diversos autores, como o grupo da Basileia, como ferramentas que eficazmente “traduzissem” a informação teórica adquirida sobre o clima de uma cidade, com vistas ao trabalho dos técnicos de planeamento: mapas a delimitar áreas com “climas locais homogêneos”, condicionados pela ocupação do solo e pelas condições de ventilação particulares.

ventilação com o intuito de categorizar os impactos negativos de cada sítio, e orientar autoridades sobre o desenvolvimento urbano da cidade de forma a potenciar melhor ventilação.

No mapa das classes de ventilação elaborado por Alcoforado *et al.* (2006) (**Figura 46**), foi identificado o “limite aerodinâmico” correspondente à fronteira entre as áreas de alta rugosidade do sul da cidade e aquelas, ao norte, onde o atrito ainda não era³¹ acrescido nem pela rugosidade urbana, nem pelo relevo. A partir desta delimitação foi possível traçar corredores de ventilação com orientação N-S (NO-SE a NE-SO), aproveitando as faixas relativamente desocupadas no Norte da cidade e grandes eixos viários que se prolongam pelos fundos de vale e que possibilitam a penetração dos ventos dominantes de N e NO até ao centro da cidade.

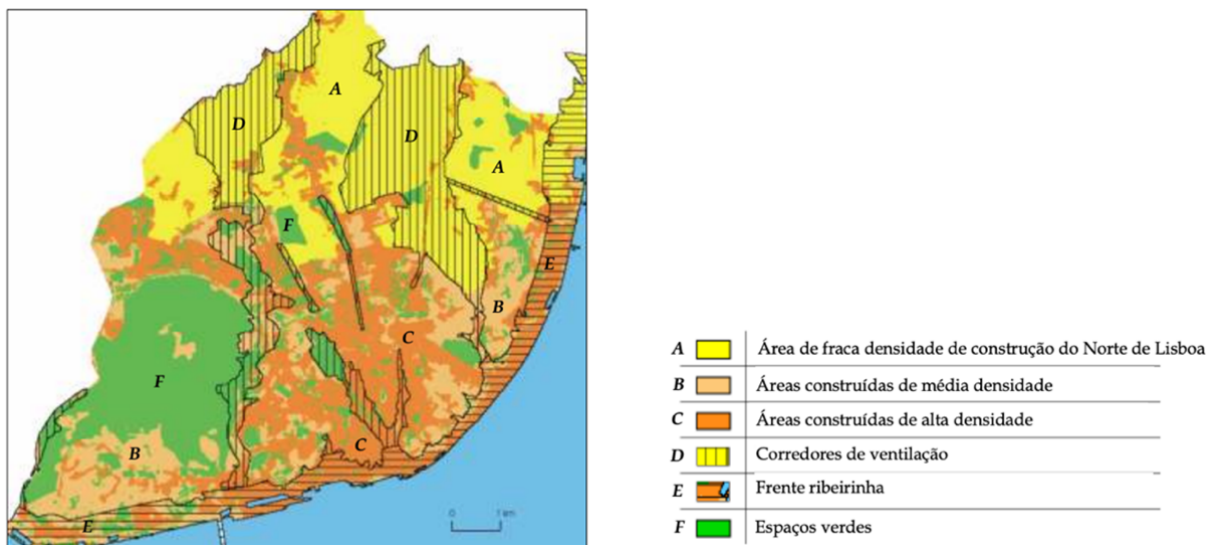


Figura 46 Delimitação das áreas para as quais são definidas orientações climáticas para o ordenamento urbano (extraído de Alcoforado *et al.*, 2006).

É importante notar que a frente ribeirinha é a área com mais frequência afetada pelas brisas do Tejo e do Oceano, importantes fatores de arrefecimento da atmosfera urbana, durante o verão.

Baltazar (2010), na sua tese de mestrado apresentou medições que demonstraram a capacidade de penetração das brisas anabáticas (**Figura 47**).

³¹ Em alguns anos, seria útil fazer um novo mapeamento da rugosidade na parte norte da cidade para averiguar se as condições favoráveis de ventilação permanecem.



Figura 47 - O limite médio de penetração da brisa (extraído de Baltazar (2010)).

O efeito das brisas de vertente (ventos catabáticos) – nomeadamente a drenagem de ar frio por gravidade e sua acumulação no fundo dos vales, segundo Alcoforado *et al.* (2006), poderia variar de caso para caso. No caso do vale da Avenida da Liberdade, existe ausência de dados suficientes relativos à velocidade do vento catabático, sobretudo nas camadas mais próximas do solo. Seria necessário realizar medições sob a canópia das copas das árvores, preferencialmente em pontos próximos à estação da RMQA, de modo a captar o escoamento local desde o Parque Eduardo VII a montante, condicionado pela morfologia da praça do Marques do Pombal e da vegetação.

Nos estudos promovidos pela Câmara Municipal de Lisboa, sobre a mitigação das ilhas de calor (fenómenos estreitamente relacionados com as ilhas de poluição e com a circulação do ar), foram atualizados os mapas de densidade e de rugosidade dos estudos já citados. Nestes (**Figura 48**) observa-se que a maior parte da cidade apresenta baixa densidade, com rugosidade moderada, baixa compacidade e baixo índice de volumetria (Correia, E., 2019). Os valores mais elevados de rugosidade, Z_0 ($Z_0 = 1,2$) estão concentrados na área central da cidade – Avenidas Novas e ao longo da Avenida da República –, e no sector oriental, no Parque das Nações³², com possíveis acelerações locais devido ao efeito de canalização de vento provocado por algumas ruas.

³²Zona requalificada com o projeto da Exposição Mundial (Expo'98, no âmbito das Comemorações dos 500 anos dos Descobrimentos Portugueses) <https://www.agendalx.pt/2018/12/06/parque-das-nacoes-20-anos-depois/>

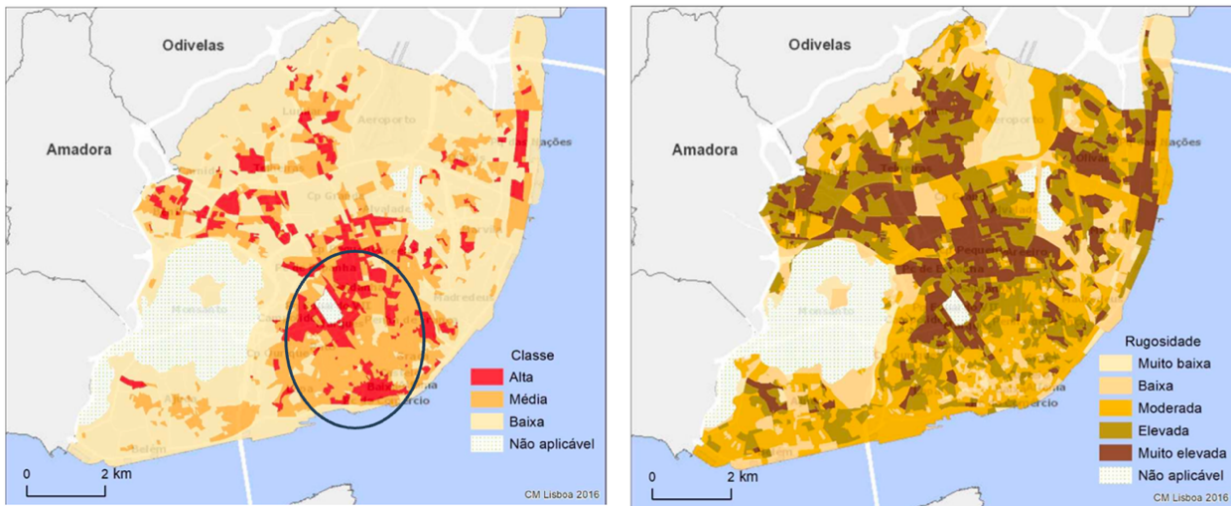


Figura 48 À esquerda, mapa da densidade urbana (em destaque, a avenida da Liberdade para melhor localização). À direita, rugosidade aerodinâmica (Z_0) (extraído de Correia, CML (2019)³³³⁴)

4.4. Densidade e rugosidade da malha urbana na área central

Um olhar mais atento ao envolvente de uma área em estudo é importante na medida de ser a região com a qual melhor se integra e dialoga. A Avenida da Liberdade, está localizada na área central da cidade, encontrando-se rodeada de colinas que a limitam e apresentando uma morfologia própria e uma elevada densidade de ocupação do solo. Todos estes fatores condicionam a circulação atmosférica e a mobilidade de pessoas na Avenida.

A área central de Lisboa é caracterizada por um relevo muito acidentado, definido por um conjunto de colinas que se estendem até muito próximo do rio Tejo, e de uma faixa plana relativamente estreita e longitudinal ao longo da margem ribeirinha (**Figura 49**).

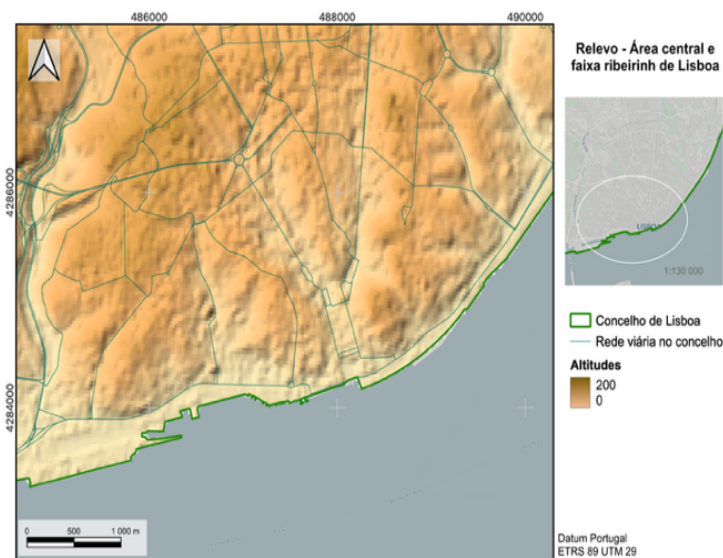


Figura 49 Relevo e densidade urbana na área central e ribeirinha da cidade.

³³https://www.lisboa.pt/fileadmin/portal/temas/ambiente/alteracoes_climaticas/ondas_calor/MapasClimaticosUrbanosRelatorio_Fase_1.pdf

³⁴ Atualizado em <https://www.lisboa.pt/temas/ambiente/qualidade-ambiental/alteracoes-climaticas/ondas-de-calor>

Apresenta uma densidade construída relativamente elevada, com predominância de edifícios de altura moderada, geralmente entre 3 e 5 andares. A ocupação tende a ser contínua, com ruas estreitas e fachadas alinhadas, sobretudo nas zonas mais antigas (**Figura 50**).

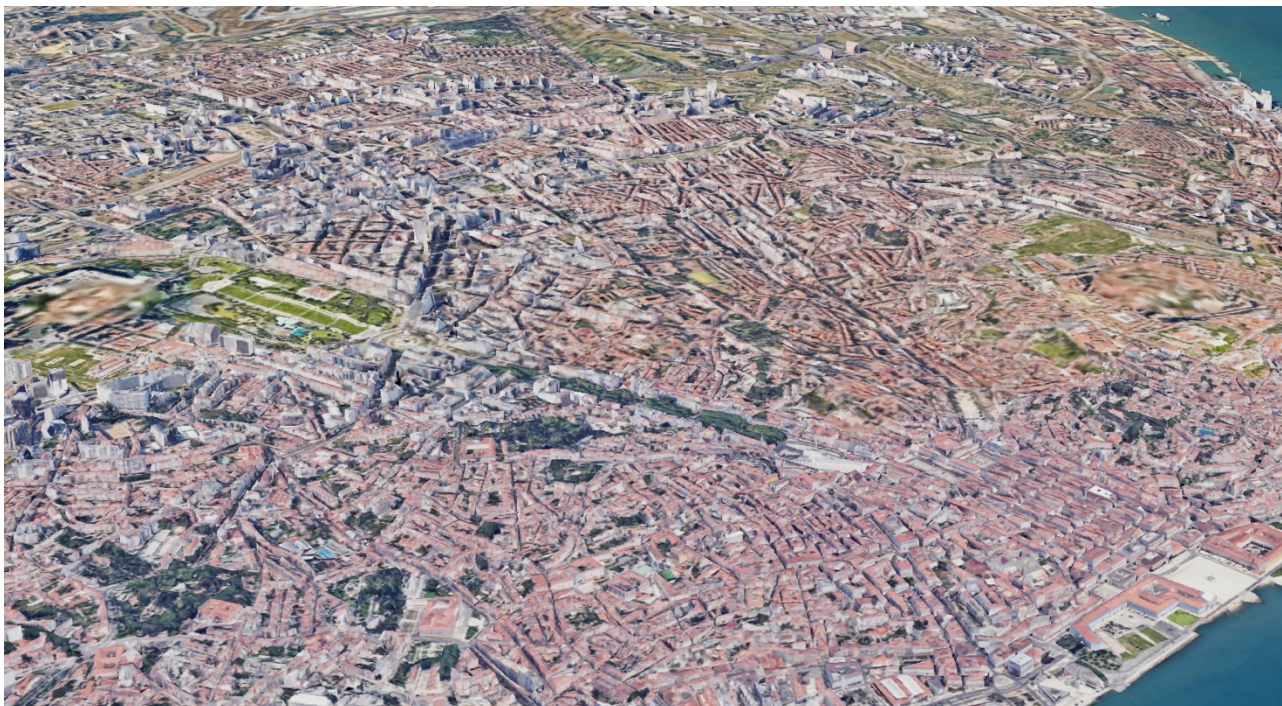


Figura 50 Relevo e densidade urbana na área central e ribeirinha da cidade (Google Earth).

A histórica Praça do Comércio, na margem do rio, está numa área plana que se estende, ao interior, até a Baixa, área reconstruída pelo Marques do Pombal após o terremoto de 1755. Desta região, que inclui a praça do Rossio e Restauradores, e ainda, a Praça da Figueira e Martim Moniz, tem-se acesso tanto à Avenida Almirante Reis, quanto à avenida da Liberdade, ambas, vales ascendentes que dão acesso às Avenidas Novas, na região planáltica da cidade.

A avenida da Liberdade é a mais larga e de maior declividade. Na parte mais baixa, a praça dos Restauradores; ao alto, a praça do Marques do Pombal, e a seguir a linha da avenida, o Parque Eduardo VII.

O eixo da Avenida (**Figura 51**), não coincide com o vale natural (Pualze / CML, 2009), e tem orientação N/NO ($325,5^\circ$). Apresenta declive médio de 5%, com alguns troços mais acentuados e as encostas rondam os 70 m de altitude. Existem alguns ascensores na região, necessários para subir as encostas ingrimes, como o elevador da Glória, próximo à Praça dos Restauradores, no lado poente, e o elevador do Lavra, no lado oposto.

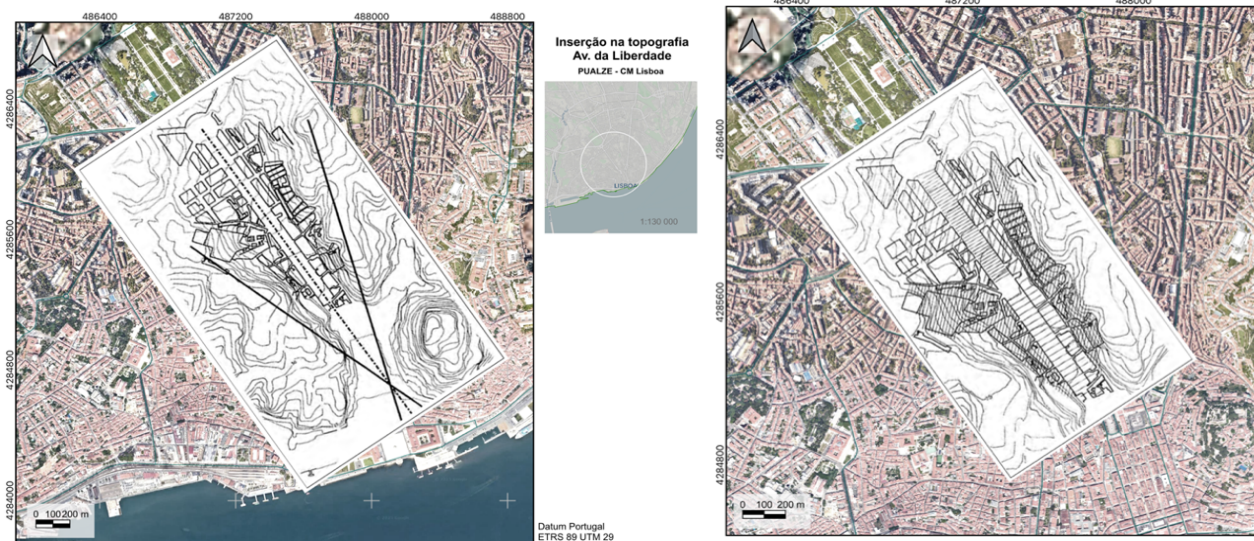


Figura 51 À esquerda, a implantação da avenida. À direita, gradação dos declives. à direita, inserção da Avenida relativamente à topografia (Google Earth / adaptado do PUALZE/CML - 2009)³⁵.

A circulação das brisas estuarinas (ventos anabáticos) e marítimas ao interior é dificultada por obstáculos - geográficos e construídos -, entretanto contribuem para a “limpeza” do ar na ribeira e para a amenização da ilha de calor³⁶. A confluência das cumeadas, que definem o vale, conjuntamente com a malha urbana a jusante, servem de porta ou barragem às massas de ar que ao longo dele se movimentam (**Figura 52**).

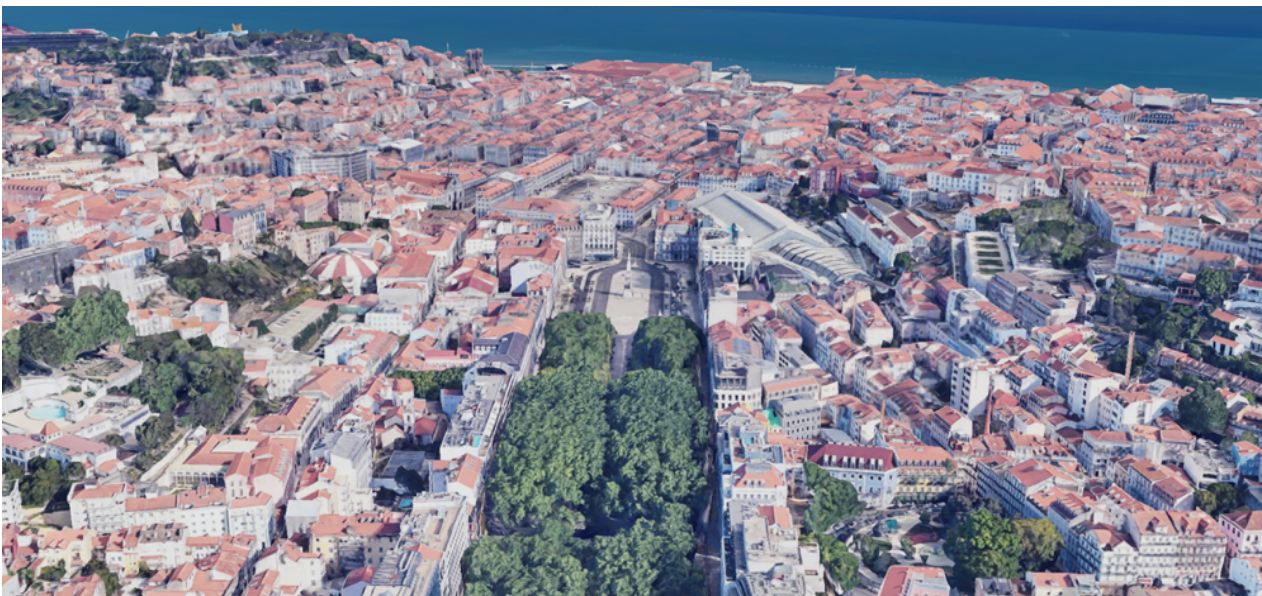


Figura 52 Vista do final da avenida junto à praça dos Restauradores, na direção Sul com o Rio Tejo ao fundo (Google Earth).

³⁵ PUALZE 2009, vol 1, páginas. 27-28.

https://www.lisboa.pt/fileadmin/porta/temas/urbanismo/planos_urbanizacao/av_liberdade_PUALZE/em_vigor_versao_inicial/elementos_acompanham_versao_inicial/pualze_Relatorio_Vol_1.pdf

³⁶ A ilha de calor é mais frequente de noite que de dia. De noite, ocorre tanto com situações de calma atmosférica, como em situação de vento fraco a moderado (neste caso, principalmente por efeito de abrigo dos ventos dominantes do quadrante Norte, sempre frios ou frescos), tanto de Verão como no Inverno. De dia, alternam situações de ilha de calor, com “ilhas de frescura”, tanto no Inverno como no Verão.

A montante, o vento de NO deveria ter melhor penetração na avenida, na medida que acompanha a orientação do vale, entretanto a rotunda da praça Marques do Pombal, e a altura dos edifícios logo à entrada da Avenida, podem constituir fatores de distúrbio na ventilação (**Figura 53**).



Figura 53 Vista da Av. da Liberdade desde a Praça do Marques do Pombal (Google Earth).

Ao analisar o padrão dos ventos em 2024, é possível perceber que predominaram os ventos de norte (N e NE), sobretudo o de Norte, e de Sudoeste (SO) no quadrante sul (**Figura 54**). Este último consegue ter uma melhor penetração e influência positiva na qualidade do ar na avenida.

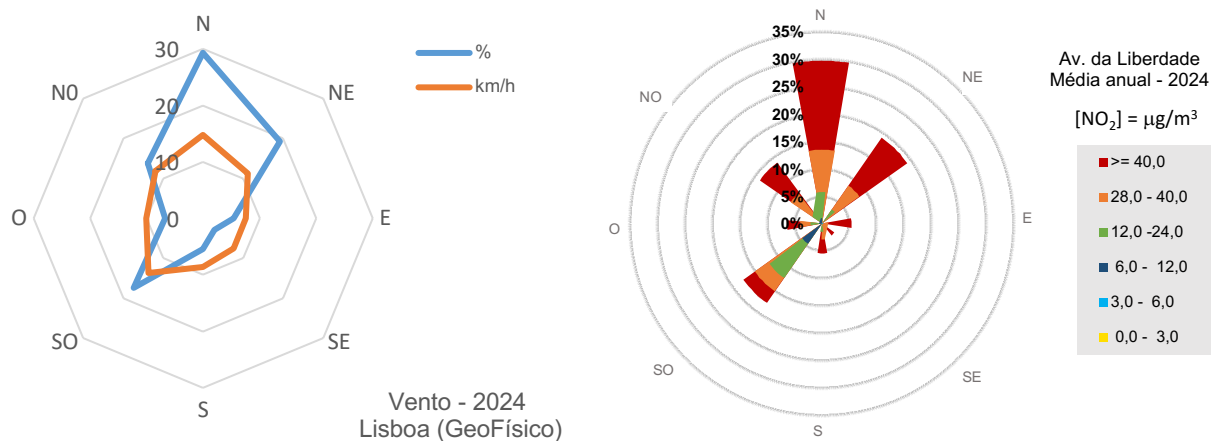


Figura 54 À esquerda, Rosa-dos-Ventos – médias de Intensidade e frequência em 2024 (Lisboa – GeoFísico). À direita, Rosa de poluição 2024– Lisboa (GeoFísico) / estação RMQA Av. Liberdade

Na **Tabela 4**, os registos horários do vento nas 8 direções, desde os mais fracos. Nota-se que 29% foram de Norte, 19% de Nordeste, 17% de Sudoeste, 14% de Noroeste.

Tabela 4 Número de ocorrências de ventos nas diferentes direções em 2024 – Lisboa (GeoFísico).

N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Total
2343	1536	429	221	428	1392	533	1105	7987
29%	19%	5%	3%	5%	17%	7%	14%	

Na **Tabela 5**, são apresentados os registos horários de frequência e intensidade dos ventos em 2024, considerando as ocorrências de NO₂ inferiores a 20 µg/m³ na Avenida da Liberdade. Pode-se observar, que de todos as 7987 ocorrências, como visto na Tabela 4, apenas em 21,8% se observaram concentrações de NO₂ inferiores a 20 µg/m³, e desses, a maioria, 48,8% aconteceram com ventos de Sudoeste.

Tabela 5 Direção e intensidade do vento nas ocorrências de NO₂ < 20 µg/m³ na Avenida da Liberdade em 2024 (Lisboa Geofísico / RMQA Av. Liberdade).

NO ₂ < 20 µg/m ³	> 0,2 <=1,5 m/s	> 1,5 <= 2,0 m/s	> 2,0 <= 2,5 m/s	>2,5 <= 2,8 m/s	>2,8 <= 3,4 m/s	>3,4 <=4,0 m/s	>4,0 <= 4,6 m/s	>4,6 <=6,0 m/s	> 6,0 m/s	TOT	%
SE	1	2	1	0	0	0	0	0	0	4	0,2%
S	11	11	12	3	8	7	8	12	25	97	5,6%
SW	14	32	51	44	89	113	144	207	156	850	48,8%
W	8	13	13	6	14	17	25	19	12	127	7,3%
NW	5	23	27	10	17	11	15	6	2	116	6,7%
N	11	13	23	14	43	52	53	69	65	343	19,7%
NE	1	5	8	13	27	33	44	32	17	180	10,3%
E	2	2	4	6	4	6	0	0	1	25	1,4%
Total	53	101	139	96	202	239	289	345	278	1742	
%	5,9%	10,5%	15,2%	17,8%	23,3%	25,6%	30,9%	33,3%	39,9%		21,8%

Na **Tabela 6**, são apresentados os registos horários de frequência e intensidade dos ventos em 2024, nas ocorrências de NO₂ superiores a 40 µg/m³ na Avenida da Liberdade. Quase metade dos registos, 47,7%, promoveram essas concentrações e destes, 71% aconteceram com ventos do quadrante norte (NO, N, NE), sendo que quase 34% de Norte, com velocidades acima de 4,6 m/s (30%). Não obstante, as calmas, 18% quase sem vento, promoveram os episódios mais frequentemente.

Tabela 6 Direção e intensidade do vento nas ocorrências de NO₂ > 40 µg/m³ na Avenida da Liberdade em 2024 (Lisboa Geofísico / RMQA Av. Liberdade).

NO ₂ > 40 µg/m ³	> 0,2 <=1,5 m/s	> 1,5 <= 2,0 m/s	> 2,0 <= 2,5 m/s	>2,5 <= 2,8 m/s	>2,8 <= 3,4 m/s	>3,4 <=4,0 m/s	>4,0 <= 4,6 m/s	>4,6 <=6,0 m/s	> 6,0 m/s	TOT	%
SE	57	40	26	9	13	10	13	6	1	175	4,6%
S	81	64	28	13	4	4	1	3	2	200	5,2%
SW	91	47	33	10	11	9	6	3	0	210	5,5%
W	81	41	31	6	19	8	2	2	0	190	5,0%
NW	59	73	62	48	60	76	76	84	17	555	14,6%
N	97	136	119	79	131	151	175	228	175	1291	33,9%
NE	125	122	152	95	134	110	71	44	7	860	22,6%
E	94	95	67	20	26	17	9	4	0	284	7,4%
Total	685	618	518	280	398	385	353	374	202	3813	
%	18,0%	16,2%	13,6%	7,3%	10,4%	10,1%	9,3%	9,8%	5,3%		47,7%

Nas rosa-de-poluição da **Figura 55**, observa-se que, no ano de 2023, na Av. da Liberdade, as concentrações médias de NO₂, acima de 40 µg/m³, também ocorreram maioritariamente com ventos de quadrante norte, e na situação inversa (< 40 µg/m³), com ventos de Sudoeste.

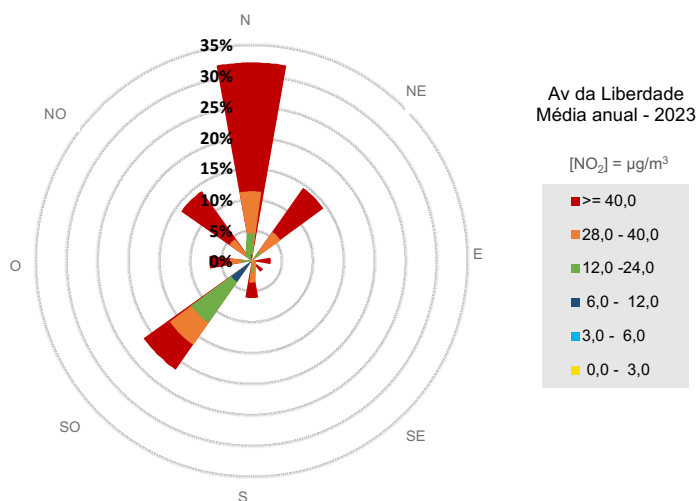


Figura 55 Rosa de poluição 2023 – Lisboa (Geofísico) / estação RMQA Av. Liberdade

Tais resultados demonstram que existe uma série de fatores que dificultam a penetração do vento dominante na avenida. Argumenta-se, então, que muito pode ser atribuído à rugosidade da região ao norte da projeção da avenida (**Figura 56**), com a densificação e verticalização da malha urbana, conjugada à orientação do vale e da própria morfologia da avenida, que será apresentada no ponto a seguir.



Figura 56 Vista da região ao norte da avenida da Liberdade na direção do planalto (Google Earth).

5. MORFOLOGIA E QUALIDADE DO AR NA AVENIDA DA LIBERDADE

5.1. Morfologia local

A morfologia da avenida conforma-se evidentemente num cânion urbano (**Figura 57**), com 90 m de largura e 1100 m de comprimento (1270 m a incluir a praça dos Restauradores)³⁷.

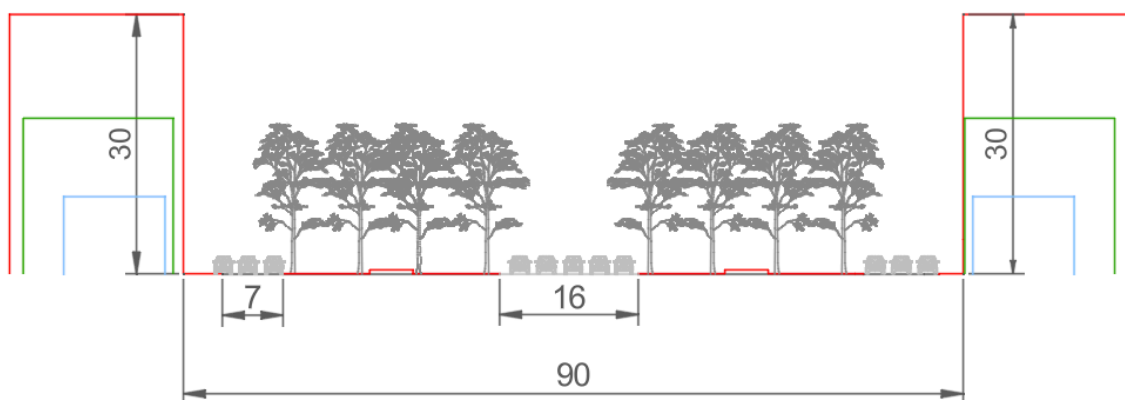


Figura 57 Representação gráfica aproximada da morfologia do cânion da avenida da Liberdade (desenho realizado a partir de dados estimados sobre mapa interativo CML)³⁸. As construções ao longo da avenida variam de altura, assim como, a espécie, a porosidade das copas e o número de árvores em cada linha.

A volumetria da edificação varia dos 2 aos 6 andares. Em alguns casos, os prédios têm mais de 10 andares, especialmente no primeiro troço, entre a rotunda do Marquês de Pombal e o cruzamento com a Rua Alexandre Herculano.

Ao longo de 5 quarteirões, o espaço para a circulação de veículos é central com um grupo de 5 faixas de rodagem³⁹, e também nas laterais, com um grupo de 3 faixas de rodagem⁴⁰. As faixas centrais não são usadas continuamente pois possuem recuos reservados a paragens de autocarro ao longo da avenida. As faixas laterais são reservadas ao tráfego local, com duas faixas de estacionamento. Existem 6 semáforos ao longo da faixa central (e 2 na praça dos Restauradores com influência sobre o tráfego na avenida).

As faixas centrais e as laterais estão separadas por passeios, que apresentam 4 linhas de árvores, repetidas ao longo de toda a avenida, sobretudo no lado nascente⁴¹, acompanhadas por canteiros com vegetação e outros elementos de menor dimensão⁴².

³⁷ Portaria n.º 385/2013, de 18 de junho - Diário da República, 2.ª série — N.º 115 — 18 de junho de 2013
<https://files.dre.pt/2s/2013/06/11500000/1936719368.pdf>

³⁸ Avenida da Liberdade - Cartografia base - identificador de objeto (Object ID): 3589
<https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?panel=gallery&suggestField=true&layers=7f379541c4074bec9fb10780b1bddb3a>

³⁹ Sendo que duas, uma de cada lado, modificadas, para incluir pontos de paragem dos autocarros sem impedir o fluxo do tráfego.

⁴⁰ Uma faixa para circulação e duas, de cada lado, para estacionamento

⁴¹ As obras para a primeira linha do metrô de Lisboa, em meados do século XX, causaram uma renovação das plantações no lado poente, com menos uma linha de árvores. Ver Camara, (2021).

⁴² http://monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5172

No inventário⁴³ do arvoredo da avenida da Liberdade, destaca-se a forte presença das espécies *Platanus x hybrida* e de *Celtis australis* que no seu conjunto representam, atualmente, 95% dos exemplares arbóreos ao longo da avenida. Existem, ainda, exemplares de *Ulmus procera*, e *Phoenix canariensis* (palmeira) (Figura 58)⁴⁴. As espécies arbóreas que compõem o conjunto apresentam troncos altos na fase adulta.



Figura 58 Espécies arbóreas na área envolvente à estação da RMQA Av. da Liberdade (CML- Geodados)⁴⁵.

Estão presentes ainda bancos, quiosques, esplanadas, feirinhas de artesanato e de antiguidades, informes publicitários, os semáforos nos cruzamentos, e de forma mais dinâmica, estacionamentos nas vias laterais, paragens de autocarros, acesso ao metro, entre outros.

A razão de aspecto (H/W) da avenida é de 0,5 (< 1,0), ou seja, está caracterizada como um cânion raso, factor que favorece à circulação do ar, como visto no capítulo 2 (e.g. Fellini *et al.*, 2020, Gromke & Ruck, 2009),

Por outro lado, a rugosidade local, que inclui o volume vegetativo presente, reduz a velocidade do fluxo de ar, o que prejudica a ventilação, afetando, conseqüentemente, a qualidade do ar.

Quanto a contribuição das espécies arbóreas à química atmosférica local devido a emissões de COV naturais (COVB) (e.g Atkinson, 2003; Nowak, 2021), como visto no capítulo 1, na **Tabela 7**, observa-se que todas as 4 espécies arbóreas escolhidas são bem resistentes à poluição, sendo

⁴³ CML

⁴⁴ Como forma de salvaguardar esse património, de acordo com a Lei n.º 56/2012, de 8 de novembro, a Regulamentação Municipal do Arvoredo de Lisboa, veio “estabelecer normas disciplinadoras do planeamento, implantação, gestão e manutenção do património arbóreo do Concelho de Lisboa” para atuação padrão por todas freguesias, seja para implantação de arvoredo de arruamento, seja para substituição ou manutenção com avaliações fitossanitárias periódicas e podas conforme a norma.

⁴⁵ <https://geodados-cml.hub.arcgis.com/datasets/arvoredo/explore?location=38.721375%2C-9.147224%2C16.48>

que 3 delas são de baixa emissão de COVb (cerca de 52% da composição), com a exceção da *Platanus hybrida* (48% da composição) (Nowak, 2021, Kesselmeier & Staudt, 1999). Não existem dados quanto a esses efeitos no local.

Tabela 7 Fatores de Emissão de Compostos Orgânicos Voláteis Biogênicos (COV-B) para Espécies Arbóreas da Avenida da Liberdade, Lisboa (Nowak, 2021)⁴⁶.

Espécie	Nº	Principal COV emitido	Fator de Emissão (condições-padrão: 30°C, 1000 µmol m ⁻² s ⁻¹ PAR)	Nível relativo	Observações
<i>Platanus hybrida</i> ^x	399	Isopreno	15–25 µg m ⁻² h ⁻¹	Moderado-Alto	Emissão aumenta significativamente com calor e radiação intensa.
<i>Celtis australis</i>	391	Isopreno	<1 µg m ⁻² h ⁻¹	Muito baixo	Emissões quase desprezáveis; ideal para meio urbano.
<i>Ulmus procera</i>	14	Isopreno	<1–2 µg m ⁻² h ⁻¹	Baixo-	Contribuição discreta para emissão de COV-B.
<i>Phoenix canariensis</i>	28	-	<1 µg m ⁻² h ⁻¹	Muito baixo	Emissão irrelevante em termos atmosféricos.

Salmond *et al.* (2013), como apresentado no capítulo 2.2, observaram que a porosidade da canópis das copas das árvores implica na maior ou menor capacidade de dispersão vertical e na maior menor acumulação de poluentes entre a folhagem. (verão) e ou não (inverno) faz diferença na ventilação vertical, que depende da porosidade da canópis. Na avenida da Liberdade, pode-se observar uma grande variação entre a canópis de inverno e de verão (**Figura 59**). No inverno, a porosidade da canópis é maior, e possibilita melhor penetração da radiação solar favorecendo a ventilação vertical no entanto, esta, é de curta duração e de menor intensidade.

⁴⁶ As emissões reais das árvores variam conforme temperatura, radiação solar e stress hídrico. Churkina *et al.* (2017), puderam comprovar maior emissão durante ondas de calor, ou seja, o impacto na qualidade do ar é maior em dias quentes e com trânsito intenso.



Figura 59 À esquerda, uma *Celtis Australis*, espécie predominante em diversos bairros; e à direita, sequência de árvores da espécie *Platanus x hybrida*, que em primeiro plano, um exemplar a sobressair. (fotografado em dezembro de 2024, desde o centro da avenida, em frente à estação RMQA, à esquerda. O teatro São Jorge e o Hotel Tivoli estão à direita).

Por outro lado, no verão, os dias são mais longos, com forte radiação por mais tempo, porém a porosidade da canópis está bastante diminuída, dificultando a dispersão vertical (**Figura 60**).



Figura 60 Avenida da Liberdade fotografada em maio de 2025 (Lado oposto à RMQA Av. Liberdade).

5.2. Poluição atmosférica local

A RMQA - Avenida da Liberdade é uma estação urbana de tráfego, e está dotada de equipamento para medir NO_2 , CO e PM_{10} (**Tabela 8**). Não está preparada para fazer a medição de O_3 . Não possui, também, equipamentos para medir os parâmetros meteorológicos no cânion da rua, abaixo da canópis das árvores, como velocidade e direção do vento, entre outros.

Tabela 8 tipos de medições realizadas na estação RMQA Av. Liberdade.

Poluentes Medidos	Métodos de Medição	Data início
NO ₂ - Dióxido de Azoto	Quimiluminescência	01/01/1994
CO - Monóxido de carbono	Absorção de infravermelhos	01/01/1994
PM ₁₀ - Partículas < 10 um	Absorção de radiação β	01/02/1994

Está localizada no terceiro quarteirão da avenida, entre a rotunda da Praça Marques do Pombal e a Praça dos Restauradores, a aproximadamente 44 m de altitude (**Figura 61**), no lado oposto ao hotel Tivoli e ao Teatro São Jorge.

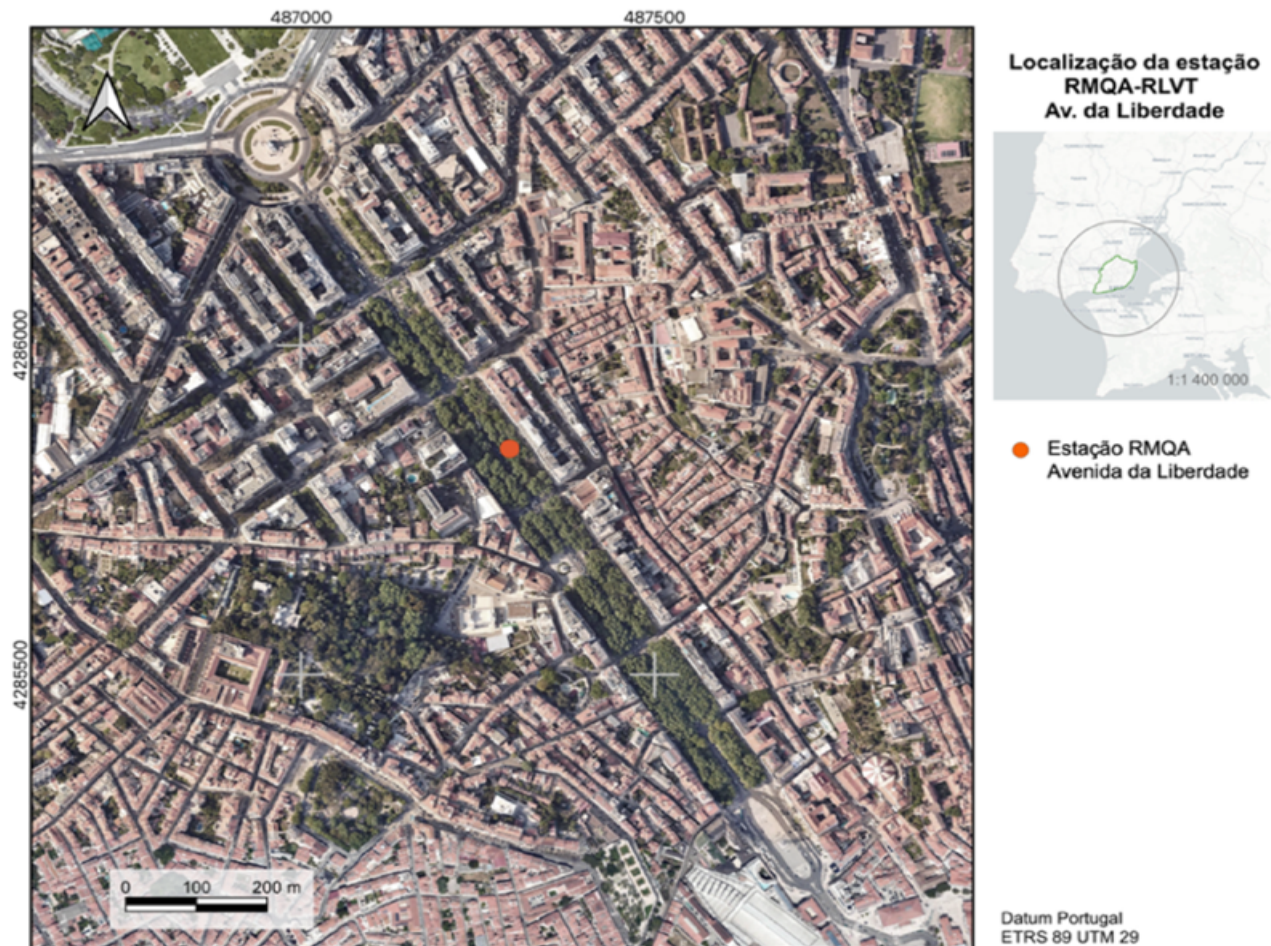


Figura 61 Localização da estação RMQA Avenida da Liberdade (Google Earth)

A estação encontra-se sob o arvoredor, próxima a um exemplar da palmeira da espécie *Phoenix Canariensis* (**Figura 62**), o que pode influenciar na dispersão de poluentes na proximidade da toma de amostragem.



Figura 62 A estação RMQA Av. Liberdade à esquerda, fotografada na primavera. À direita, sobre a estação, o teto de céu possível por entre a canópia formada pelas copas das árvores e da palmeira *Phoenix canariensis*.

5.2.1. Análise por comparação dos dados disponíveis -

Neste subcapítulo, para analisar a capacidade de dispersão local de poluentes são apresentadas uma série de comparações utilizando dados de concentração de NO₂, obtidos na plataforma QUALAR (<https://qualar.apambiente.pt>), (i) dados consolidados, disponíveis até 2023, e (ii) dados de 2024 e 2025 disponibilizados, mas não validados.

5.2.1.1. Médias mensais

Na **Figura 63**, com as concentrações médias mensais de NO₂ dos anos de 2023 a 2025, verifica-se que nos meses de férias escolares de verão, as concentrações de NO₂ são mais reduzidas que no resto ano, mas ainda próximas de 40µg/m³ em julho.

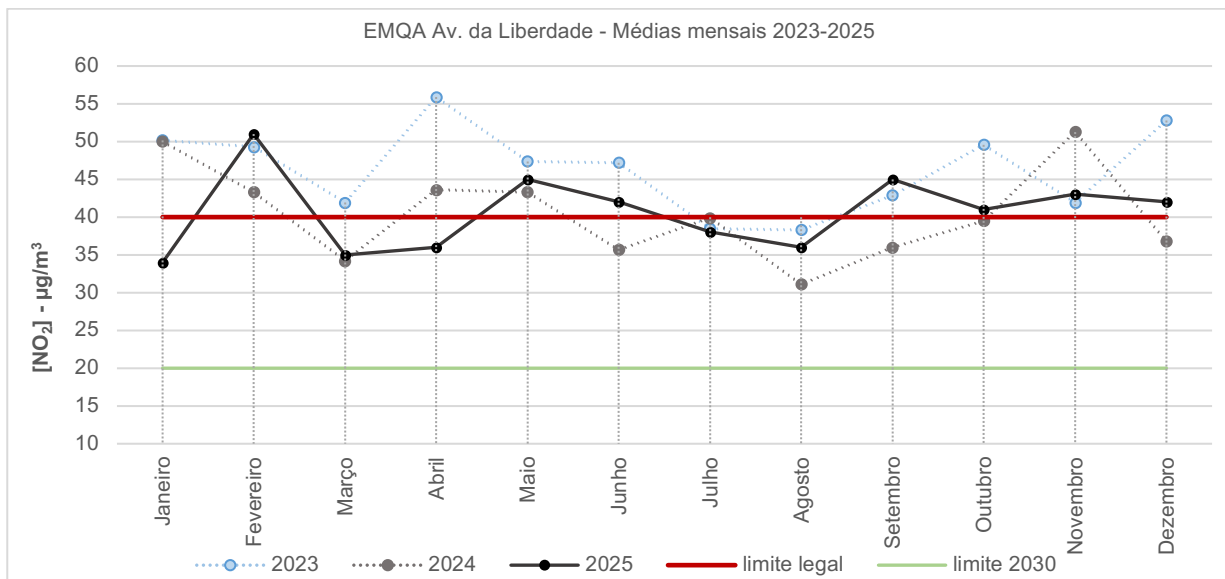


Figura 63 Concentrações mensais de NO₂, obtidas a partir dos dados das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Na **Figura 64**, pode-se comparar a diferença de intensidade da radiação solar entre o verão e o inverno na cidade.

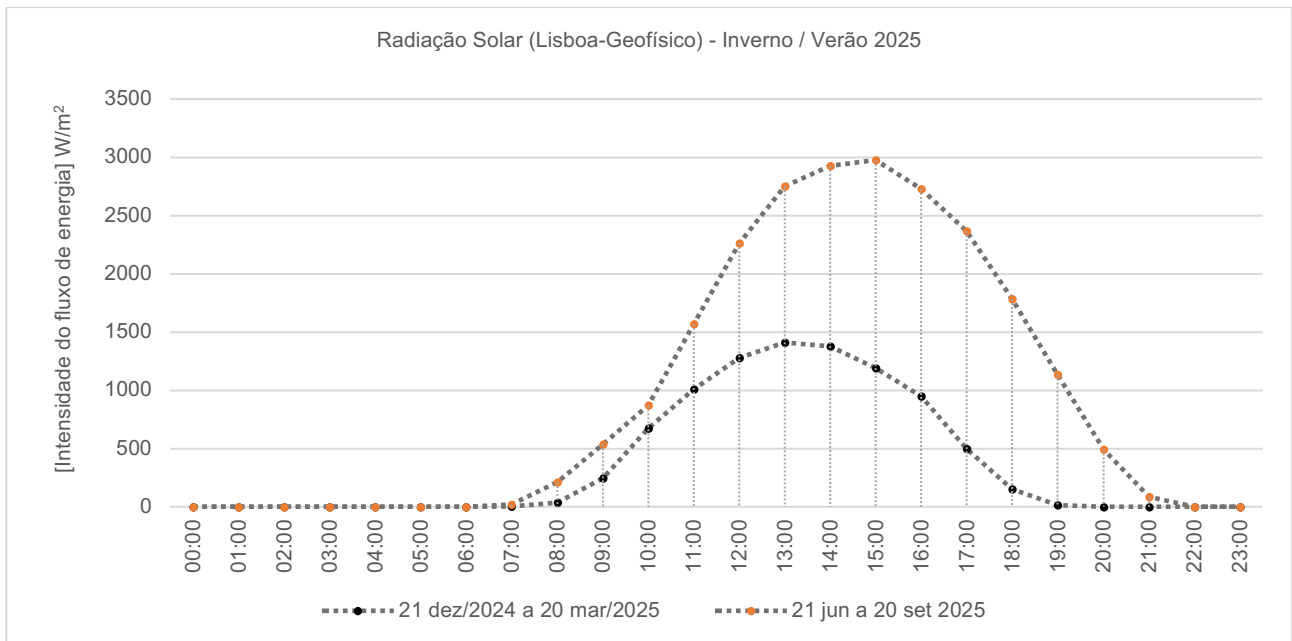


Figura 64 - Intensidade de radiação - Verão / Inverno - Lisboa (Geofísico)

5.2.1.2. Médias Anuais por hora e por dia da semana - 2023-2025

Na **Figura 65**, com as concentrações médias de NO₂, por hora do dia, dos anos 2023 e 2025 verificou-se que durante as noites, existiu uma melhora acentuada de 2023 para 2024, que se manteve em 2025. Houve alguma “limpeza” do ar ocorreu durante as madrugadas, porém, ainda insuficientes, na medida que as concentrações de NO₂ se mantiveram acima dos 25 µg/m³. À noite, embora com diminuição, mantiveram tendência à circulação de veículos até as últimas horas do dia.

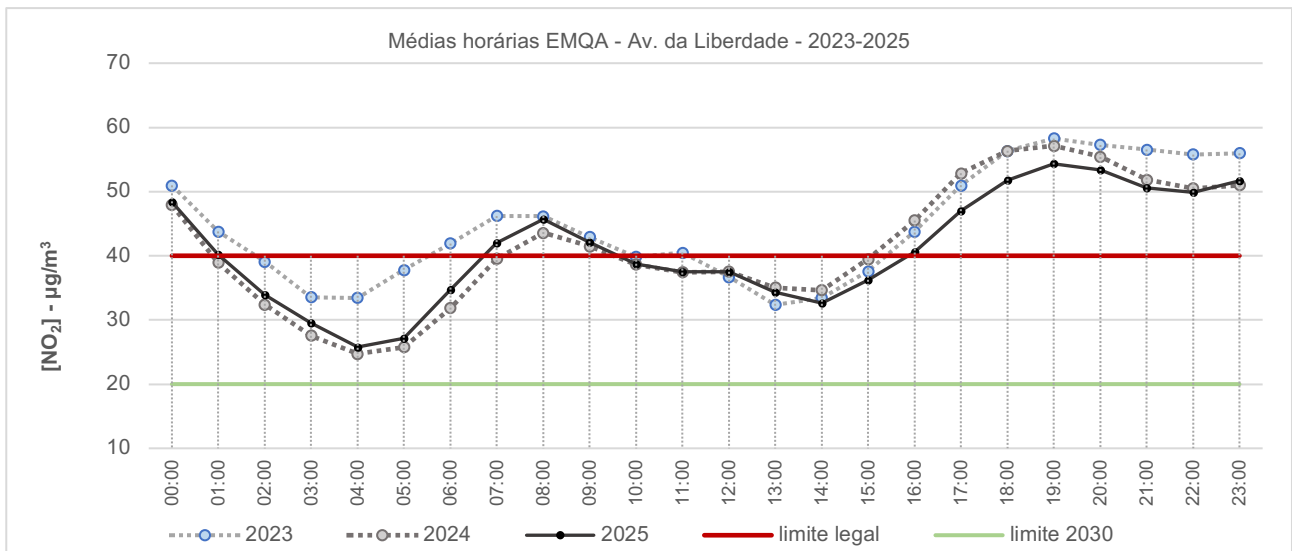


Figura 65 Perfil diário das concentrações de NO₂, obtidos a partir dos dados das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Na **Figura 66**, observa-se que tanto o sábado quanto o domingo apresentaram tendência de diminuição dos níveis de poluição, que pode ser relacionada à natural diminuição da circulação de veículos nos dias de descanso. Poderia se uma indicação de que a população poderia acostumar-se ao fechamento da via, nos fins-de-semana, para lazer.

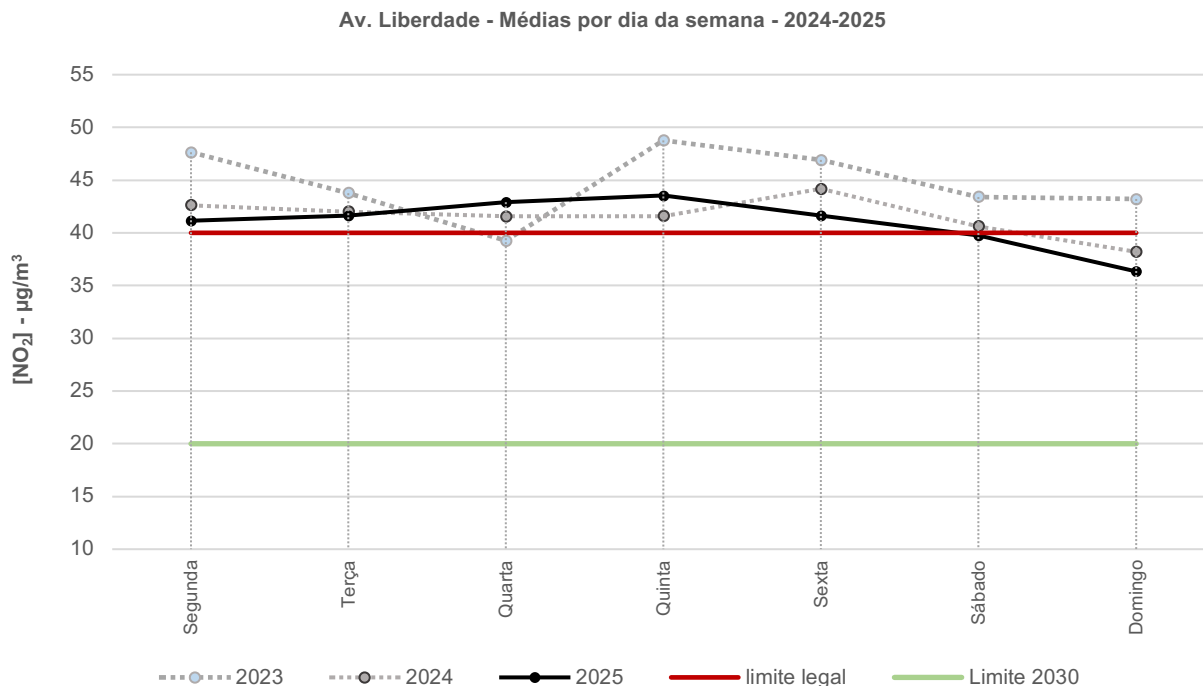


Figura 66 Perfil de concentrações diárias de NO₂, para o primeiro semestre 2024 (janeiro a julho), e primeiro semestre de 2025 obtido a partir das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

5.2.1.3. Vale e Planalto

Num estudo comparativo, a estação da EMQA-Entrecampos oferece uma contraposição de estudo à estação da EMQA - Avenida da Liberdade por estar localizada na área planáltica da cidade. **(Figura 67).**

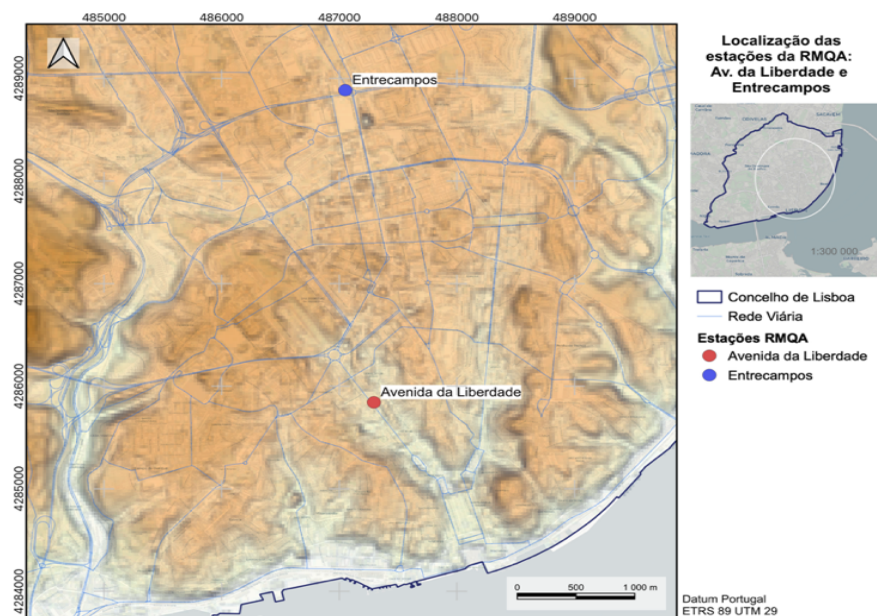


Figura 67 Localização das duas estações RMQA em questão, Entrecampos, ao norte na região planáltica, e Av. Liberdade, num dos vales na franja SSE da cidade.

A EMQA-Entrecampos localiza-se na confluência entre a Av. das Forças Armadas e Av. Campo Grande, em frente da rotunda de Entrecampos **(Figura 68)**. As configurações morfológicas urbanas, onde ambas as estações estão inseridas, apresentem algumas similaridades, mas maiores são as diferenças. A Avenida Campo Grande tem orientação relativamente similar à orientação da Avenida

da Liberdade, e apresenta um conjunto arbóreo abundante, consolidado desde o século XIX, porém, não pode ser descrita como um cânion clássico. Apresenta uma linha contínua de construções apenas em um dos lados (nascente), e no lado poente, a Biblioteca Nacional e o campus universitário, áreas de menor rugosidade.

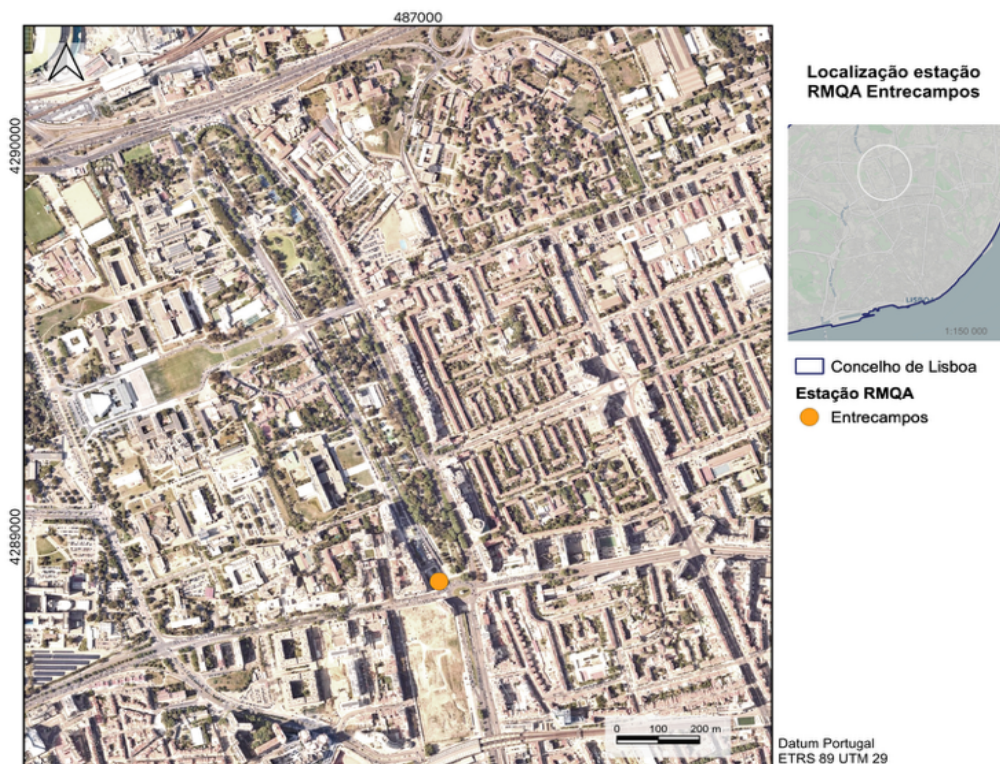


Figura 68 Visão aérea da Avenida do Campo Grande, com a extensa área arborizada, e a EMQA Entrecampos localizada junto à rotunda na confluência com a Avenida das Forças Armadas (Google Earth).

A EMQA-Entrecampos é uma estação urbana de tráfego, e tem a capacidade de fazer as medições de maior número de poluentes (**Tabela 9**), mas também, não possui equipamentos para medir parâmetros meteorológicos no local, como velocidade e direção do vento, temperatura, entre outros.

Tabela 9 Tipos de medições realizadas na estação de Entrecampos (Qualar).

Poluentes Medidos	Métodos de Medição	Data início
NO _x - Óxidos de Azoto	Quimiluminescência	01/01/1994
PM ₁₀ - Partículas < 10 µm	Absorção de radiação β	01/02/1994
O ₃ - Ozono		01/03/1992
PM _{2.5} - Partículas < 2.5 µm		01/03/2002
SO ₂ - Dióxido de Enxofre		01/03/1992
C ₆ H ₆ - Benzeno		01/03/2002
CO - Monóxido de carbono	Absorção de infravermelhos	01/01/1994

Está posicionada em frente a um grupo de edifícios alinhados de altimetria aproximada de 15 andares (cerca de 45m altura), que se estende apenas neste troço da avenida Campo Grande (**Figura 69**). Este, conjuntamente, à construção localizada no lado oposto da avenida das Forças Armadas formam obstáculos responsáveis por produzir diferenciais de pressão, que afetam o escoamento na área onde se localiza a EMQA Entrecampos.

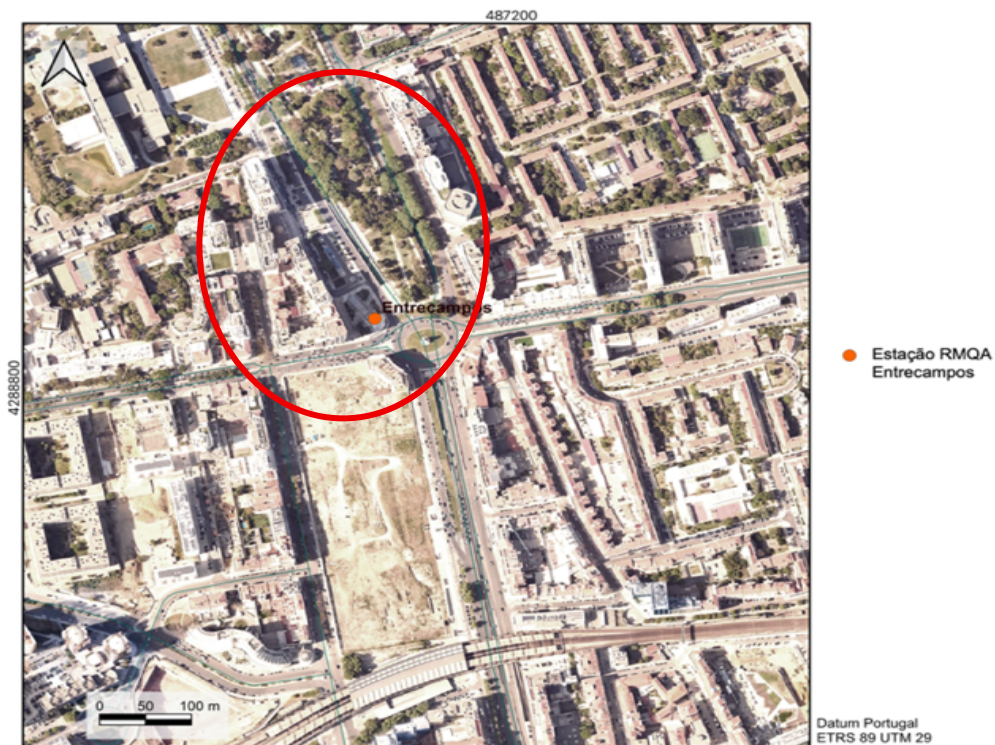


Figura 69 Localização da estação de Entrecampos, em frente aos edifícios alinhados, no primeiro troço da avenida Campo Grande, na confluência com a avenida das Forças Armadas. No mapa de localização (à direita, no alto), o círculo vermelho assinala a localização aproximada da estação de Entrecampos na cidade, enquanto o branco, a estação da Av. da Liberdade (Google Earth).

Na envolvente imediata da EMQA-Entrecampos, a vegetação urbana é diminuta (**Figura 70**).



Figura 70 Morfologia urbana na área da Estação RMQA-Entrecampos, que se encontra ao pé de construções de até 15 andares, sem árvores no envolvente próximo, presente somente no lado nascente da avenida Campo Grande (Google Earth).

Tanto a Avenida da Liberdade, quanto as avenidas em Entrecampos (Av. das Forças Armadas; Campo Grande; Av. da República), são importantes vias de ligação dos concelhos da Grande Lisboa e Península de Setúbal ao aeroporto. Segundo as campanhas de contagens de tráfego, realizadas

em 2022 (CML)⁴⁷, o tráfego médio diário nas rodovias na proximidade da EMQA de Entrecampos (**Anexo 5**) é superior ao tráfego médio diário na Avenida da Liberdade. O tráfego médio diário a circular na rotunda de Entrecampos é 1,3 vezes o tráfego médio diário a circular na Liberdade).

Por outro lado, a concentração de NO₂ em Entrecampos, em média, é cerca de 78% menor que na Avenida da Liberdade (**Figura 71**).

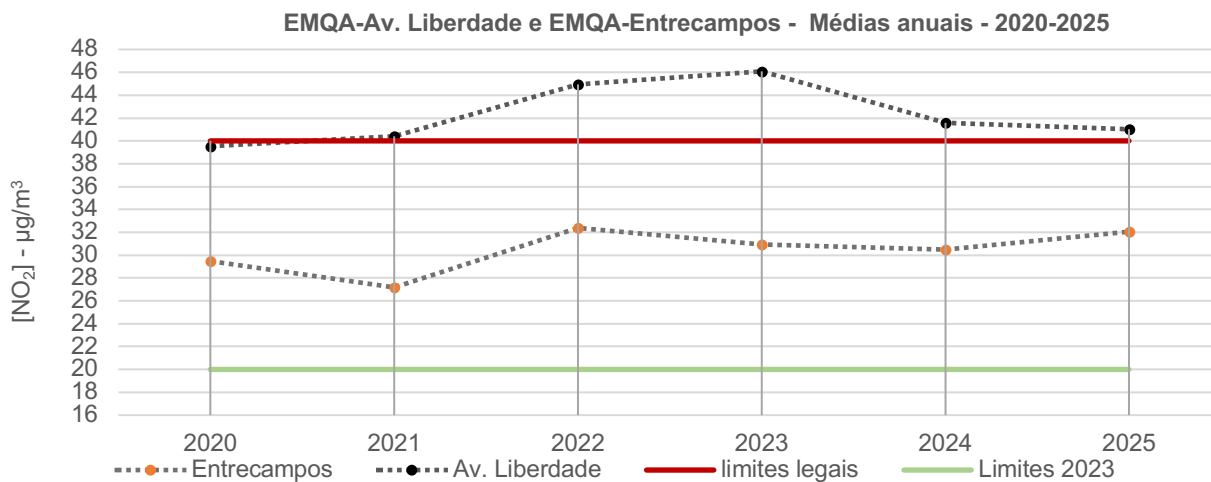


Figura 71 Concentrações médias anuais de NO₂ obtidas a partir das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade e na EMQA - Entrecampos (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Nos dias de descanso, a diferença entre os valores é maior (**Figura 72**), pela diminuição do tráfego pendular.

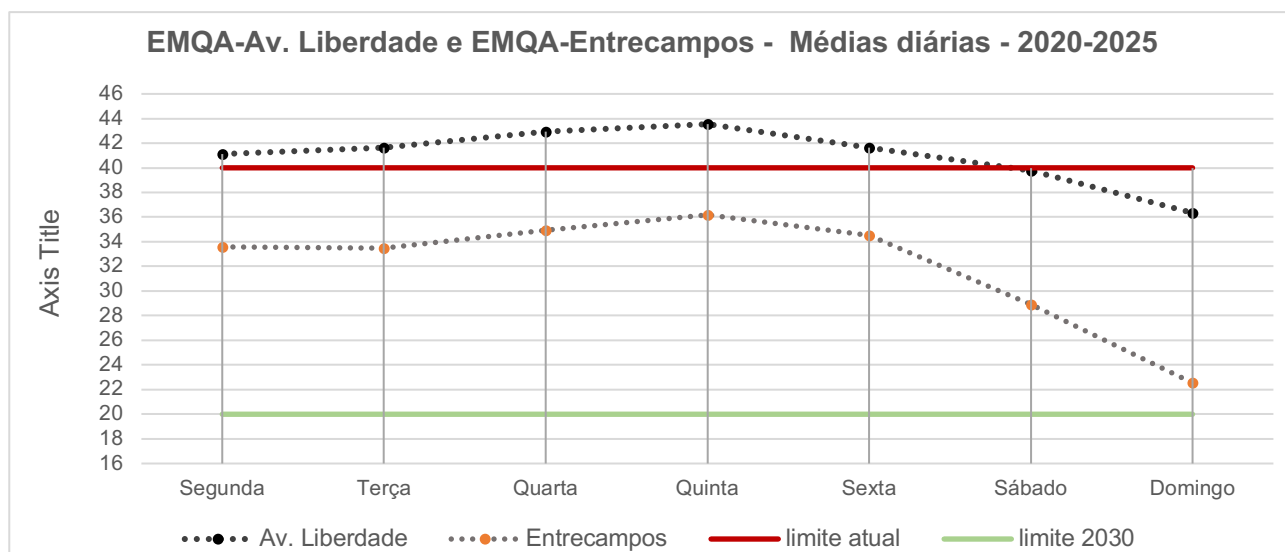


Figura 72 Concentrações médias diárias de NO₂ obtidas a partir das concentrações horárias medidas na EMQA - Av. da Liberdade e na EMQA - Entrecampos (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Nas rosas-de-poliuição sazonais para 2024 (**Figura 73**) os resultados mostraram que o vento Norte, predominante, penetra muito bem na Av. Campo Grande, enquanto menos eficiente na Av. da

⁴⁷ Mapa de Ruído da cidade de Lisboa
https://apambiente.pt/sites/default/files/_Ar_Ruido/Ruido/SituacaoNacional/MapasAglomeracoes/ag_pt_00_2_lisboa_rnt.pdf

Liberdade. Contrariamente, enquanto o vento Sudoeste é mais favorável para a região do vale da Av. Liberdade, apresenta maior dificuldade de dispersão dos poluentes na região de Entrecampos.

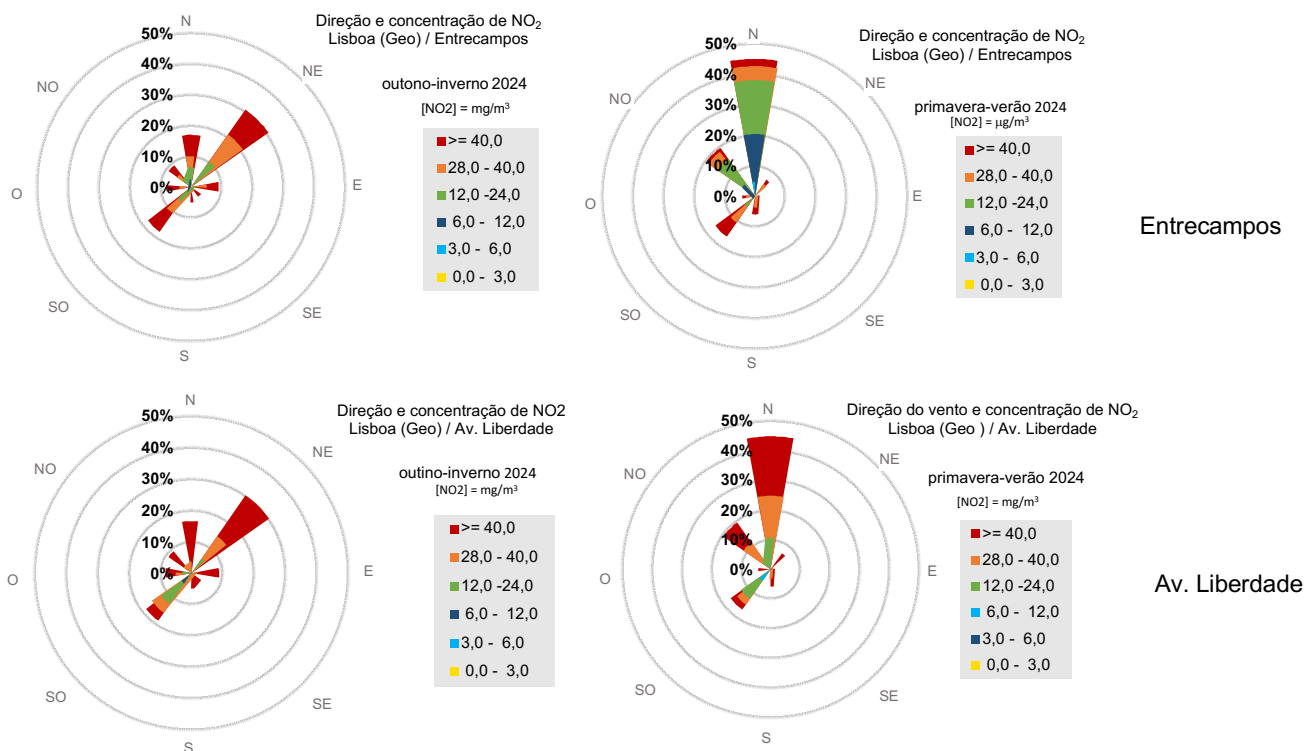


Figura 73 Mapas de poluição sazonais para as duas estações (Qualar / Lisboa-Geofísico⁴⁸)

A morfologia urbana local, conjuntamente à localização na área planáltica adjacente à área central, permite uma melhor capacidade de dispersão de poluentes em Entrecampos que no vale da Avenida da Liberdade, na área central da cidade.

5.2.1.4. Estabilidade térmica com onda de calor

No verão de 2025 ocorreram 3 ondas de calor⁴⁹. Para o período de 10 dias, de 25/junho (quarta-feira) a 4/julho (sexta-feira), observaram-se as seguintes condições meteorológicas:

- Dia 30/06, uma segunda-feira, a temperatura máxima atingiu os 39 °C.
- A temperatura mínima já alcançava os 22 °C na madrugada do dia 28/06, e passou dos 25 °C, na madrugada do dia 29 para o dia 30/07.
- A humidade relativa do ar chegou aos 23% ao longo do dia 30.
- Foram registados ventos de baixa intensidade no período de 28/6 a 01/7⁵⁰. No dia 30/06, alguns picos de velocidade demonstrava uma perspetiva de melhoria na ventilação (**Figura 74**).

⁴⁸ Para validação dessa figura, ver, no **Anexo 4** a rosa-dos-ventos das outras 3 estações localizadas na cidade de Lisboa. Dessas, Amoreira apresentou medições dispareas.

⁴⁹ Boletim Sazonal - Verão 2025 - IPMA

https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20251028/IWsDdcSmbLuhYflqubBi/cli_20250801_20250831_pcl_sz_co_pt.pdf

⁵⁰ Nos dias 28 a 30/junho, percebe-se o “apagamento” do vento Norte quando são percebidos ventos do quadrante sul de pouca intensidade (brisas térmicas estuarinas e marítimas).

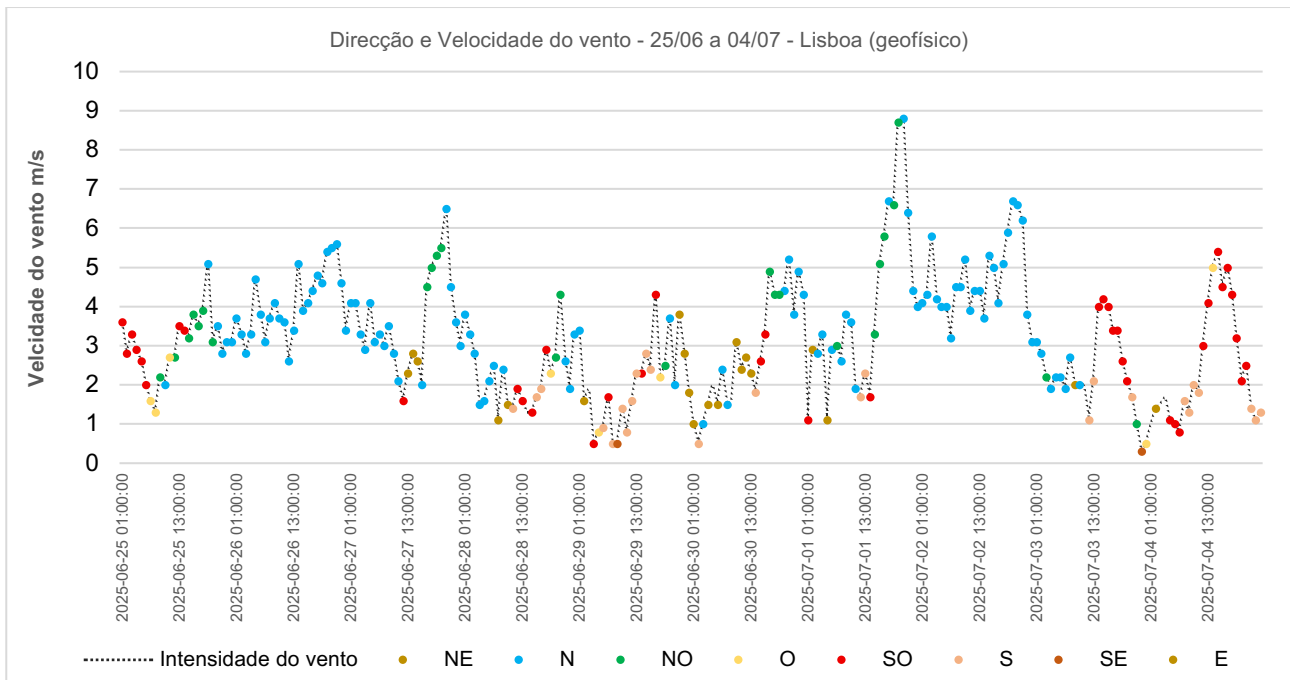


Figura 74 Variação de direção e intensidade do vento para o período, de 28 de junho e 1 de julho, 2025 (Lisboa Geofísico). Nesta situação⁵¹, entre os dias 29/junho e 01/julho, as concentrações de NO_a estiveram acima dos 40 µg/m³ na EMQA-Entrecampos. No dia 30/6, segunda-feira de manhã, as concentrações de NO₂ atingiram 105 µg/m³ (**Figura 75**).

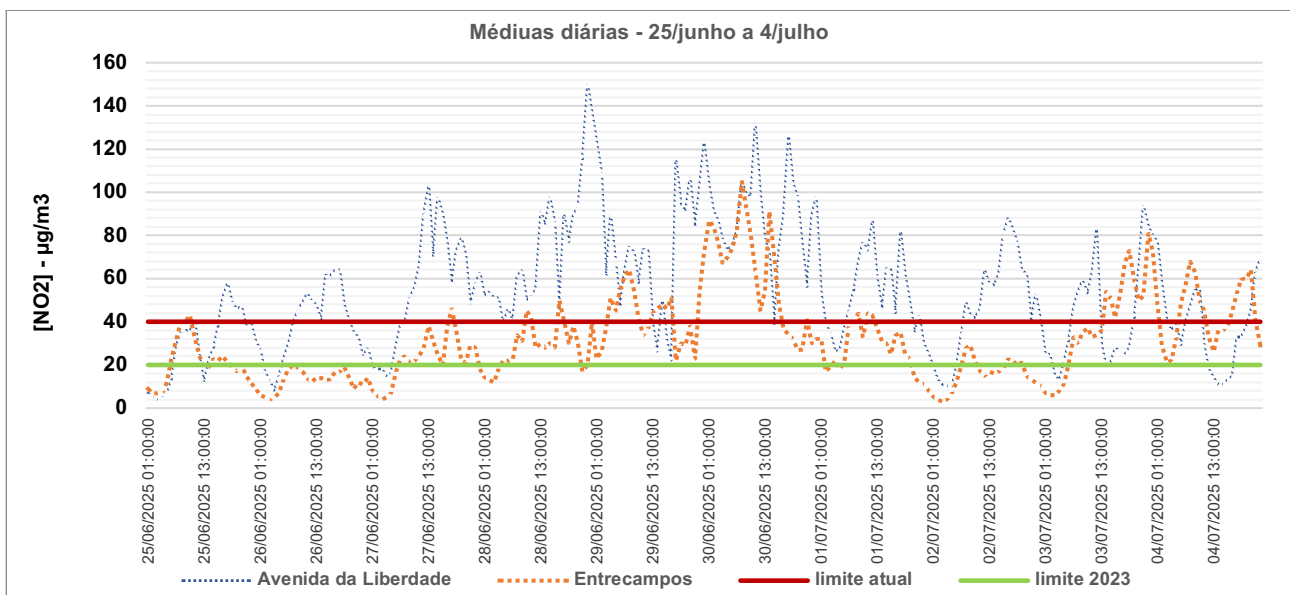


Figura 75 Concentração NO₂ no período de 25 de junho a 4 de julho de 2025, nas estações RMQA Av. Liberdade e Entrecampos (dados de base obtidos na plataforma <https://qualar.apambiente.pt>).

Na Av. Liberdade, as concentrações de NO₂ atingiram os 100 µg/m³ sexta-feira à noite (27/06), e no sábado à noite (28/6), 150 µg/m³. No dia 30/6, as concentrações atingiram os 132 µg/m³, e na madrugada do dia 01/7 concentrações de 98 µg/m³, mantendo, nos dias seguintes, picos de

⁵¹ Como visto no subcapítulo, 3.2.1, na região de Lisboa, valores críticos ocorrem, no verão, em situações de estabilidade atmosférica, precedidas por situações de calma nas 24 horas antecedentes.

poluição. Em ambas as estações houve uma redução na capacidade de “limpeza” noturna, sobretudo na Liberdade.

Mais dados meteorológicos locais seriam necessários para melhor avaliar a influência das duas morfologia urbanas na velocidade e direção do vento, assim como, temperaturas locais.

A EMQA de Entrecampos, localizada numa área de morfologia mais “aberta”, com menos obstáculos à ventilação do vento predominante, ainda assim, durante o período da onda de calor de junho/2025, apresentou altos índices de concentração de NO₂. Pode-se inferir que, conjuntamente à má qualidade do ar, a falta de sombreamento, expondo as superfícies de alcatrão e betão do envolvente à incidência direta do sol, aumentou o gradiente de temperatura ao nível do peão e contribuiu para ampliar a sensação de desconforto e o perigo à saúde dos mesmos.

Na Av. da Liberdade, embora o ambiente seja menos ventilado e insalubre nas horas de pico de tráfego ou de situações extremas, como já visto, o sombreamento abundante traz, ainda assim, melhor sensação de conforto aos peões.

Desta forma, é possível concluir que medidas apropriadas para a prevenção de danos à população quando expostos a fenómenos extremos, cuja frequência deverá acelerar, segundo projeções climáticas do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) inclui a intensificação do uso da vegetação, sobretudo, com planeamento e a redução da poluição, nomeadamente, a superação do tráfego de veículos à combustão. No curto prazo, o engajamento da população é imperativo seja para que evitem utilizar o transporte individual, seja para que apoiem o fechamento completo de vias aos veículos à combustão (ao menos, pelo tempo de duração de fenómeno climáticos extremos, sobretudo, nas ruas e avenidas com pouca capacidade de dispersão, como no caso da avenida da Liberdade).

CONCLUSÃO FINAL

A qualidade do ar depende da capacidade de dispersão atmosférica dos poluentes. Esta é influenciada por condições meteorológicas e, também, pelo gradiente térmico e pela rugosidade do solo, tanto natural como construído.

Nas cidades, o escoamento da massa de ar no interior da malha urbana depende dos elementos da morfologia urbana. Estes elementos, considerados no conjunto ou no pormenor — desde a geometria dos quarteirões, à orientação e tamanho das ruas, à altura e continuidade das fachadas, ao tipo de arborização — afetam o escoamento do ar, originando zonas de estagnação e de aceleração, com potenciais impactes no conforto e na segurança dos peões.

Se a densificação associada à verticalização das áreas centrais, mais valorizadas, por um lado, promove um melhor aproveitamento dos serviços públicos e retarda o avanço da artificialização de áreas rústicas, por outro lado, compromete a dispersão dos poluentes quer nestas áreas quer a jusante das mesmas, deteriorando a qualidade do ar e conseqüentemente a qualidade de vida dos habitantes.

A arborização, quando realizada sem planeamento, de forma contínua e densa, pode dificultar a dispersão vertical e horizontal dos poluentes emitidos junto ao solo (por exemplo pela circulação do tráfego nas rodovias) afetando a qualidade do ar ao nível do peão, mesmo em espaços urbanos amplos. Por outro lado, morfologias urbanas rasas, porém totalmente desprovidas de sombreamento, podem comprometer a salubridade local, intensificando o calor durante fenómenos climáticos extremos, como ondas de calor.

O desenho urbano, enquanto responsável pela configuração física das ruas, edifícios e espaços públicos, deve integrar os benefícios da vegetação com uma ventilação eficaz, no âmbito de um planeamento urbano orientado por objetivos e legislação coerentes, sustentado por políticas claras e instrumentos de gestão consistentes. Nesse contexto, é possível harmonizar os diferentes interesses políticos e económicos, assegurando simultaneamente a qualidade espacial, a qualidade do ar e a saúde da população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Europeia do Ambiente (AEA). (2025). *Relatório EEA n.º 10/2024* (Environmental statement 2023) European Environment Agency (EEA).
- Alcoforado, M. J. (1987). *Brisas estivais do Tejo e do Oceano na região de Lisboa*. *Finisterra*, 22(43), 135–152. *Finisterra*, vol. 22 nº 43
- Alcoforado, M.-J., Andrade, H., Lopes, A., & Vasconcelos, J. (2009). *Aplicação de diretrizes climáticas ao planeamento urbano [Application of climatic guidelines to urban planning]*. *Landscape and Urban Planning*, 90(1–2), 56–65.
- Amorim, J. H. de M. R. (2003). *Modelação do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos em áreas urbanas* [Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro]. Repositório Científico da Universidade de Aveiro.
- Amorim, J. H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, J., & Borrego, C. (2013). *Modelagem CFD do efeito aerodinâmico das árvores na dispersão da poluição do ar urbano [CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion]*. *Science of The Total Environment*, 461–462, 541–551.
- Atkinson, R., & Arey, J. (2003). *Degradação atmosférica de compostos orgânicos voláteis [Atmospheric degradation of volatile organic compounds]*. *Chemical Reviews*, 103(12), 4605–4638
- Baltazar, S. C. P. (2010). *Mapas bioclimáticos da cidade de Lisboa* [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da ULisboa.
- Berkowicz, R. (2000). *OSPM - A parameterised street pollution model*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 65(1), 323–331.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(2),
- Buccolieri, R., Salim, S. M., Leo, L. S., Di Sabatino, S., Chan, A., Ielpo, P., De Gennaro, G., & Gromke, C. (2011). *Analysis of local scale tree–atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction*. *Atmospheric Environment*, 45(9), 1702–1713.
- Câmara Municipal de Lisboa (CML) & Manuel Fernandes de Sá, Lda. (2009). *PUALZE: Plano de Urbanização da Avenida da Liberdade e Zona Envolvente – Proposta de plano (Vol. I – Relatório)*. Câmara Municipal de Lisboa.
- Câmara Municipal de Lisboa (CML) (2022). *Mapa Estratégico de Ruído da Cidade de Lisboa Ano de Referência 2022 - Memória Descritiva*. Câmara Municipal de Lisboa.
- Camara, T. B., (2021). *Espaço público de Lisboa. Plano, projeto e obra da primeira geração de arquitetos paisagistas (1950-1970)*. Câmara Municipal de Lisboa (CML).
- CCDR, (2017). *Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e do Vale do Tejo para as poluentes partículas PM₁₀ e NO₂ nas aglomerações da Área metropolitana de Lisboa*

Norte e Área Metropolitana de Lisboa Sul. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo.

CCDR-LVT, 2024 (2025). *Avaliação da qualidade do ar ambiente na região de Lisboa e Vale do Tejo em 2024*. Relatório. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo.

Churkina, G., Kuik, F., Bonn, B., Lauer, A., Grote, R., Tomiak, K., & Butler, T. M. (2017). *Efeito das emissões de COV da vegetação na qualidade do ar em Berlim durante uma onda de calor (Effect of VOC emissions from vegetation on air quality in Berlin during a heatwave)*. *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6120–6130.

Correia, Ezequiel. (2020). *Mapas Climáticos Urbanos: Índices de Geometria e Densidade Urbana Atual*. Relatório. Câmara Municipal de Lisboa.

Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., & Ruck, B. (2008). *Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data*. *Atmospheric Environment*, 42(37), 8640–8650.

Gromke, C., & Ruck, B. (2007). *Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field*. *Atmospheric Environment*, 41(16), 3287–3302.

Gromke, C., & Ruck, B. (2009). *On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons*. *Boundary-Layer Meteorology*, 131(1), 19–34.

Fellini, S., Marro, M. Del Ponte, A. V., Barulli, M., Soulhac, L., Ridolfi, L., Salizzoni, P. (2022). *High resolution wind-tunnel investigation about the effect of street trees on pollutant concentration and street canyon ventilation*. *Building and Environment*, Volume 226.

Huang, Y., Li, M., Ren, S., Wang, M., & Cui, P. (2019). *Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon*. *Building and Environment*, 165, 106385.

Jacob, D. (2000). *Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone*. *Atmospheric Environment*, 34(12–14), 2131–2159.

Jeanjean, A. P. R., Buccolieri, R., Eddy, J., Monks, P. S., & Leigh, R. J. (2017). *Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 41–53.

Kesselmeier, J., & Staudt, M. (1999). *Compostos orgânicos voláteis biogénicos (COV): uma visão geral sobre emissão, fisiologia e ecologia (Biogenic volatile organic compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology)*. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33(1), 23–88.

Kroll, J. H., & Seinfeld, J. H. (2008). *Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere*. *Atmospheric Environment*, 42(16), 3593–3624.

- Lopes, A., Saraiva, J., & Alcoforado, M. J. (2011). *Urban boundary layer wind speed reduction in summer due to urban growth and environmental consequences in Lisbon. Environmental Modelling & Software*, 26(2), 241–243.
- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). *Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 197–228.
- Ng, W. Y., & Chau, C. K. (2012). *Evaluating the role of vegetation on the ventilation performance in isolated deep street canyons. International Journal of Environment and Pollution*, 50(1/2/3/4), 98–110.
- Nowak, D. J. (2021). *Compreendendo o i-Tree: Sumário de programas e métodos 2021 (Understanding i-Tree: 2021 Summary of Programs and Methods)* [Apêndice 12: Taxas de emissão de compostos orgânicos voláteis (VOC)] (*Appendix 12: Volatile Organic Compounds (VOC) Emission Rates*). USDA Forest Service.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- OMS (2021) Organização Mundial da Saúde, *Diretrizes globais de qualidade do ar* (WHO Global Air Quality Guidelines)
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1993). *Physics of climate* (3rd print). American Institute of Physics.
- Salgueiro, T. B. (2002). *Desenvolvimento urbano de Lisboa*. CML.
- Salmond, J. A., Williams, D. E., Laing, G., Kingham, S., Dirks, K., Longley, I., & Henshaw, G. S. (2013). *The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. Science of The Total Environment*, 443, 287–298.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, Hoboken
- Soulhac, L., Mejean, P., & Perkins, R. J. (2001). *Modelling the transport and dispersion of pollutants in street canyons. International Journal of Environment and Pollution*, 16(1/2/3/4/5/6), 404–413.
- Tinney, E. N., Homeyer, C. R., Elizalde, L., Hurst, D. F., Thompson, A. M., Stauffer, R. M., Vömel, H., & Selkirk, H. B. (2022). *A modern approach to a stability-based definition of the tropopause. Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10), 6481–6501.
- Tiwary, A., & Colls, J. (2009). *Air pollution: Measurement, modelling and mitigation* (3rd ed.). CRC Press.
- TML (Transportes Metropolitanos de Lisboa), Pinheiro, M., Coimbra, S. (2024). *Relatório de Caracterização e Diagnóstico*. Plano metropolitano de mobilidade sustentável – PMMUS.
- Vos, P. E. J., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). *Melhorando a qualidade do ar local nas cidades: plantar árvores ou não? [Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?]. Environmental Pollution*, 183, 113–122.

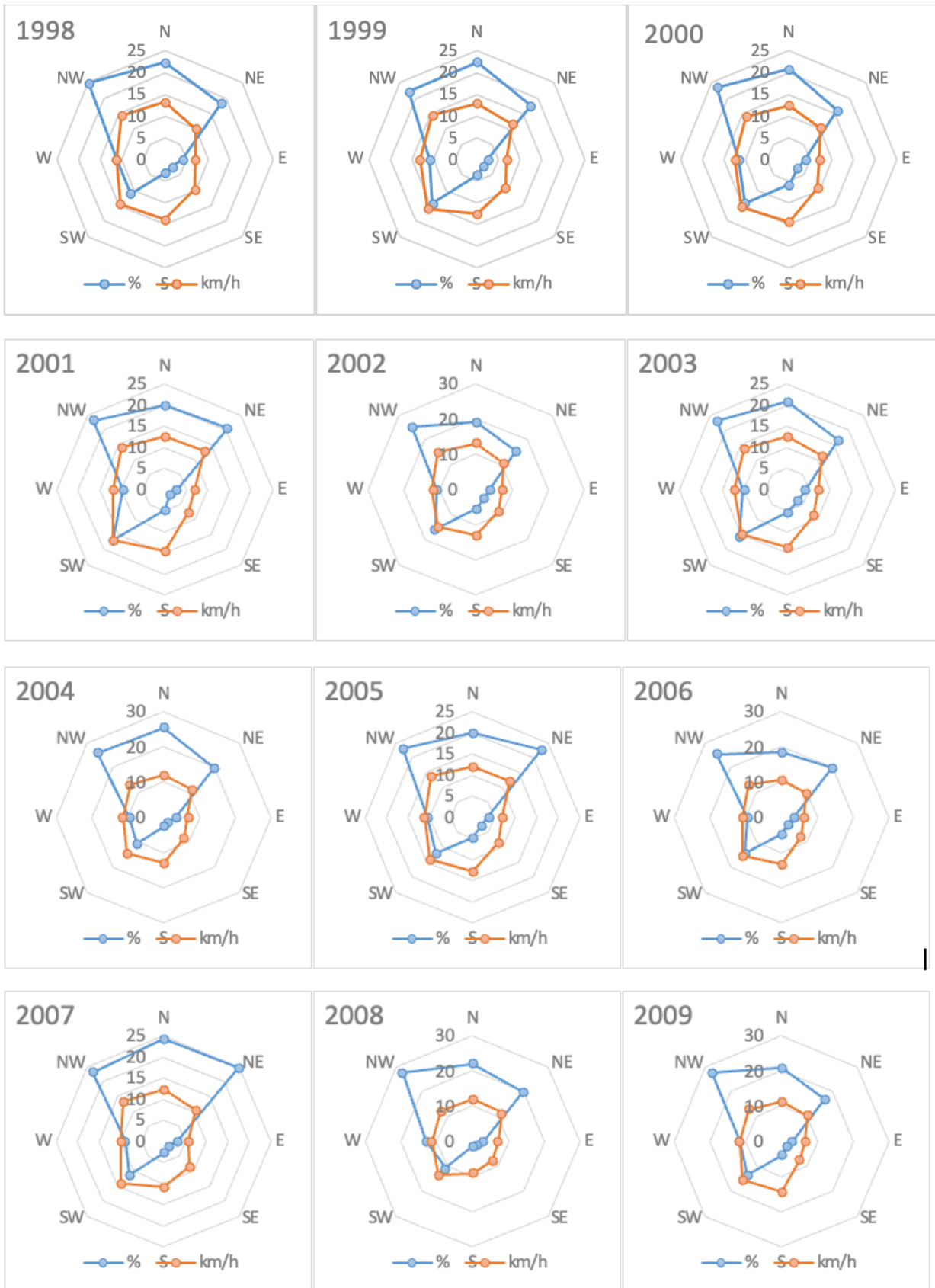
Anexo 2

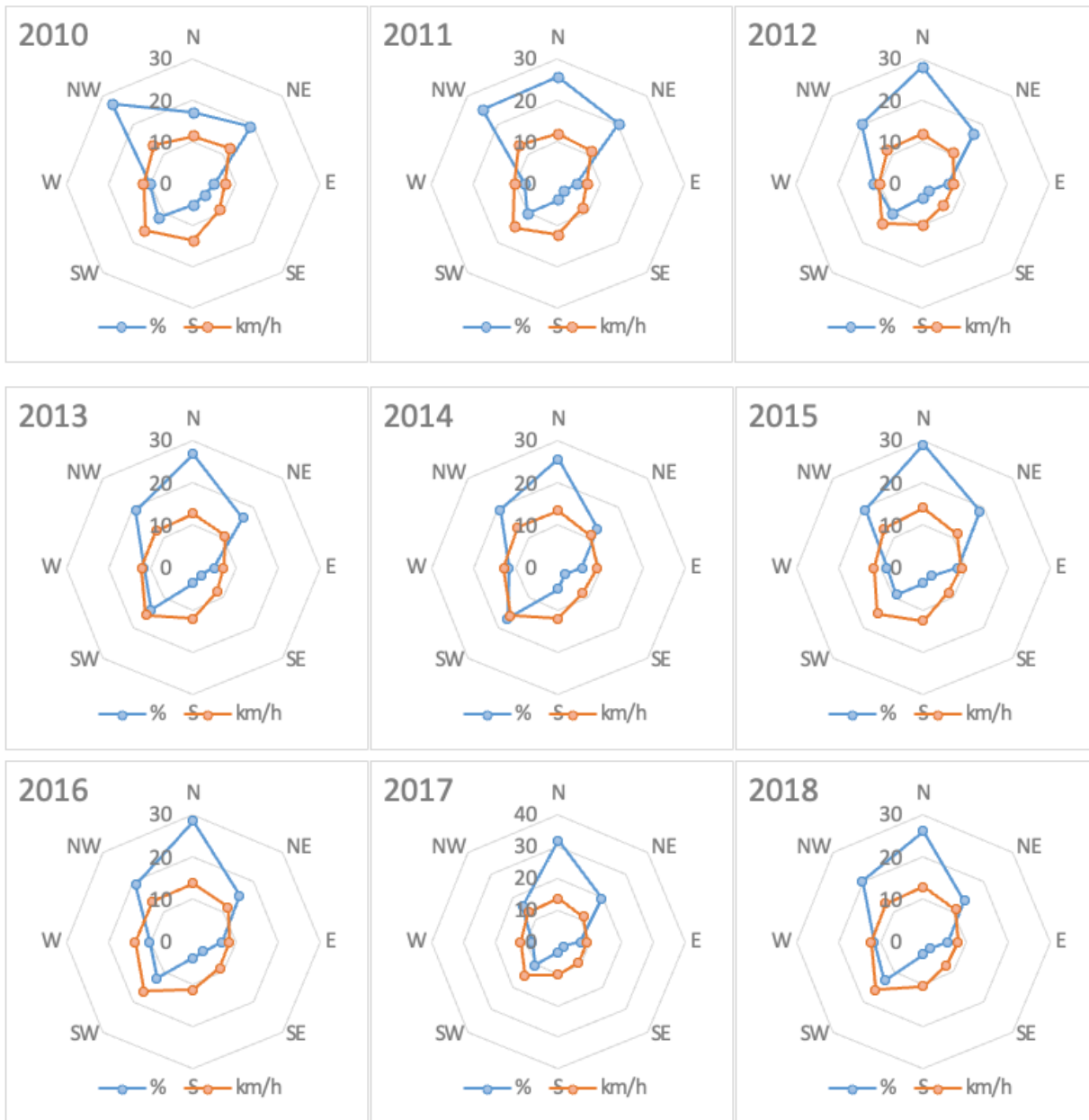
Dados de intensidade e frequência e respetivas Rosas dos Ventos, Lisboa (Gago Coutinho) 1998-2018

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual
Frequência (%) e respetiva velocidade média (km/h)													
NORTE (N)													
%	17.3	21.6	18.8	18.2	25.5	28.8	38.4	36.0	24.8	17.3	21.0	14.5	23.6
km/h	11.3	12.4	13.0	12.6	13.3	13.3	14.3	13.5	11.6	10.7	11.5	10.5	12.6
NORDESTE (NE)													
%	30.1	27.5	21.7	14.3	10.4	7.1	4.4	7.4	11.0	20.7	27.9	38.3	18.2
km/h	10.8	12.0	11.7	11.5	11.0	10.5	9.4	9.6	8.9	10.3	11.5	11.5	11.1
ESTE (E)													
%	5.2	4.6	5.6	4.3	3.5	2.8	1.7	2.6	4.4	6.2	6.0	7.4	4.5
km/h	7.0	7.6	8.9	8.9	8.0	7.6	7.5	7.2	6.9	7.1	7.0	7.8	7.6
SUDESTE (SE)													
%	2.6	2.6	3.3	2.8	2.0	1.4	0.9	1.3	2.5	3.4	3.2	3.7	2.5
km/h	8.3	8.8	9.1	9.2	7.9	8.3	7.5	7.2	7.3	7.7	8.2	9.8	8.4
SUL (S)													
%	4.3	3.5	5.4	3.9	3.6	2.1	1.2	1.6	4.2	7.8	5.0	4.8	4.0
km/h	12.3	12.6	13.7	13.2	11.9	11.2	10.2	9.5	11.1	13.8	12.1	14.6	12.7
SUDOESTE (SW)													
%	14.0	12.7	16.8	15.7	13.2	10.9	6.3	8.4	14.1	17.7	12.2	11.4	12.8
km/h	15.5	16.4	16.5	16.0	15.2	14.8	13.8	14.2	13.8	15.0	13.8	16.5	15.2
OESTE (W)													
%	12.2	10.9	11.1	14.4	11.6	10.3	7.6	7.8	10.9	10.1	9.9	8.3	10.4
km/h	12.2	13.1	12.8	12.5	11.8	11.6	11.3	11.1	10.6	10.5	10.3	12.5	11.8
NOROESTE (NW)													
%	12.4	15.5	16.2	25.4	29.4	36.0	39.0	34.0	26.7	14.9	13.0	9.6	22.8
km/h	11.3	11.9	12.6	13.8	13.9	14.4	14.9	14.4	12.7	11.1	10.7	10.7	13.4
Calma													
%	1.8	1.2	1.1	0.9	0.8	0.6	0.5	0.8	1.4	1.8	1.7	2.0	1.2

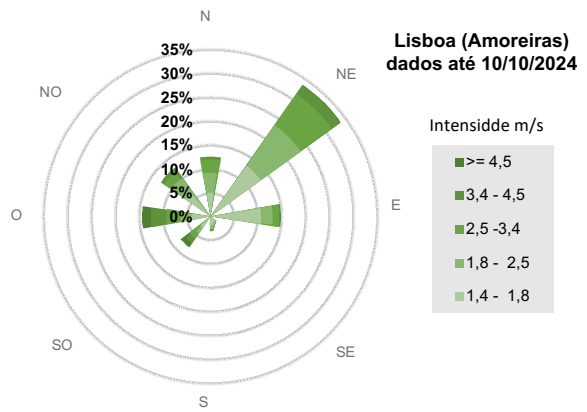
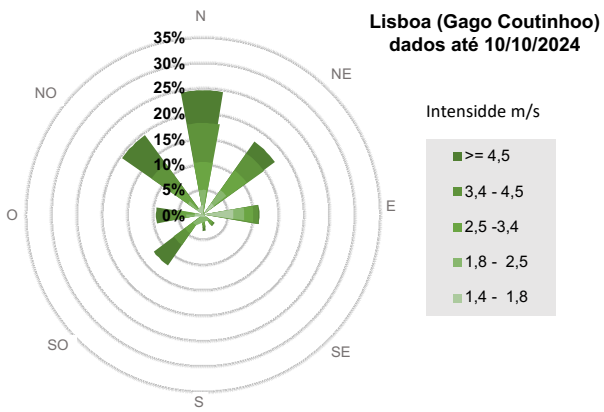
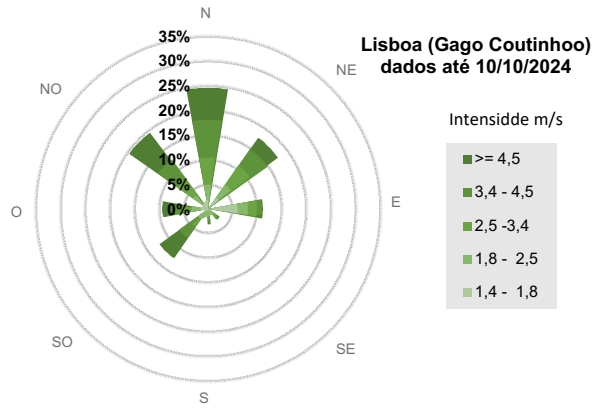
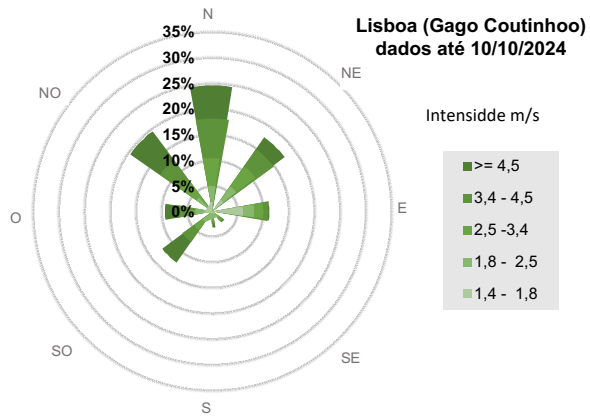
Anexo 3

Rosas do vento - médias anuais - Gago Coutinho) 1998-2018





Anexo 4



Anexo 5

Dados de tráfego nas rodovias na envolvente à EMQA de Entrecampos (dados de base obtidos na plataforma Mapa de Ruído da Cidade de Lisboa (CML, 2022))

RODOVIA	TMH Total			Média diária de veículos
	D	E	N	
Av. das Forças Armadas	1525	311	208	22422
Av. das Forças Armadas	1165	428	193	17973
Av. Campo Grande	2167	759	78	31072
Av. Campo Grande	1116	534	182	17566
Av. Campo Grande	3093	1181	198	45336
Av. da República	2392	528	113	33584
Av. da República	2426	1324	147	36686
Av. da República	1576	1039	196	25173
Av. da República	2167	759	78	31072
Av. da República	3093	1181	198	45336
Av. da República	1632	1028	247	26276
Rotunda Entrecampos	2586	816	234	37938

Dados de tráfego na Avenida da Liberdade (dados de base obtidos na plataforma Mapa de Ruído da Cidade de Lisboa (CML, 2022))

RODOVIA	TMH Total			Média diária de veículos
	D	E	N	
Av. da Liberdade	1784	1126	330	29210
Av. da Liberdade	1392	613	223	21719
Av. da Liberdade	1053	429	210	16656
Av. da Liberdade	1180	558	122	17990