

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Parâmetros Aerodinâmicos em Ambiente SIG

Marina Isabel Dias Madeira

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Fernando Marques da Silva (LNEC/FCUL)

Agradecimentos

Ao meu orientador, Engenheiro Fernando Vítor Marques da Silva do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela introdução nesta temática bem como pelos preciosos ensinamentos e conselhos que contribuíram para a valorização deste trabalho.

À professora Cristina Maria Sousa Catita da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), pelos ensinamentos na área de Sistema de Informação Geográfica, pela ajuda com a revisão na área e em adquirir as licenças para o uso do *software* ArcGis e por toda a disponibilidade em ajudar no que toca à área SIG.

Ao Engenheiro Duarte Granado do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) por toda a disponibilidade e ajuda no tratamento de dados e uso do *software*.

Ao Professor Doutor António Lopes do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT), por ter disponibilizado os dados e mapas referentes ao estudo de rugosidade aerodinâmica para o concelho de Lisboa: “Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa”.

Aos meus colegas e amigos da FCUL, por todo o apoio, conselhos e ajuda durante o trabalho.

À minha família e amigos, por todo o apoio, ajuda e compreensão que fizeram com que tudo isto fosse possível.

A todos vocês que de alguma forma me apoiaram e ajudaram, facilitando o desenvolvimento deste longo trabalho.

E a ti avó que apesar de já não estares connosco, sempre me apoiaste e me deste forças para continuar e nunca desistir.

Resumo

A forma como o escoamento atmosférico se desenvolve ao longo do percurso da Camada Limite é o grande foco deste trabalho, onde o ambiente urbano é sem dúvida a zona mais crítica devido à heterogeneidade da superfície e à interface entre o ser humano e a atmosfera. Houve um progresso considerável na compreensão e modelação do ambiente urbano em vários aspetos, sendo que a velocidade do vento pode variar devido a vários aspetos tais como a rugosidade e temperatura do solo. Existem vários pontos importantes a considerar, como por exemplo, a construção e segurança de edifícios, o conforto dos pedestres e energia renovável. Espera-se que a população urbana do mundo aumente em cerca de 66% até 2050 (Kent, et al., 2017) e, à medida que as cidades crescem para fora e, mais importante para cima, populações maiores ficam mais expostas ao vento. Portanto, o conhecimento aprimorado dos efeitos do fluxo urbano é vital para o desenvolvimento das cidades.

O presente trabalho tem como principal objetivo obter a caracterização da rugosidade aerodinâmica do solo, recorrendo a modelos morfométricos apropriados e partindo da informação em ambiente SIG – cartas de ocupação do solo disponível através da Direção-Geral do Território – com o apoio do *Google Earth* que nos permite fazer uma interpretação mais atual da rugosidade aerodinâmica do solo e a recolha dos dados morfométricos, permitindo assim posteriormente estimar perfis verticais de velocidade do vento.

Após a análise de dados das COS, foram escolhidas duas zonas distintas dentro da Área Metropolitana de Lisboa, para a implementação do modelo criado, o concelho de Lisboa e o concelho de Alcochete. Com os dados fornecidos pelas cartas, foram criados mapas com oito megaclasses aerodinâmicas, uma vez que a informação dada originalmente era muito detalhada e inapropriada do ponto de vista aerodinâmico. Uma vez classificadas as diferentes áreas aerodinâmicas, recorre-se aos valores tabelados de Wieringa (1993), de modo a atribuir os valores dos parâmetros aerodinâmicos de rugosidade em cada zona distinta dos mapas finais de cada concelho, exceto em áreas urbana/suburbana. Nas áreas urbanas é necessário efetuar o cálculo de z_0 e d recorrendo ao método de Kanda (2013) para $\lambda_p < 0,45$ e ao método de Macdonald (1998) para $\lambda_p > 0,45$. Sendo o perfil do vento logarítmico e uma vez adquiridos todos os valores de z_0 e d , estão reunidas todas as condições para o cálculo da velocidade do vento vertical em qualquer ponto.

Através da escolha do concelho de Lisboa é perceptível que a informação contida nos dados fornecidos pelas COS é insuficiente, uma vez que através desses mapas apenas existiria uma área representativa da urbanização. Do ponto de vista aerodinâmico isso não é credível, uma vez que dentro de uma área urbana podem existir várias zonas suficientemente grandes, com características de densidade e altura dos elementos bastante diferentes. Isso influenciaria no desenvolvimento do escoamento atmosférico. Assim sendo, e com a ajuda da ferramenta do *Google Earth*, foi possível identificar sete áreas distintas dentro da grande área urbana do concelho.

Para além de uma área maioritariamente urbana, foi escolhido o concelho de Alcochete, sendo uma zona maioritariamente agrícola e com uma orografia praticamente oposta à de Lisboa. Através do estudo deste concelho foi fácil perceber que apesar de existirem algumas localidades urbanas/suburbanas, estas estão muito dispersas, com alturas relativamente pequenas e/ou representadas em pequenas áreas, não influenciando em nada o escoamento. Zonas com árvores de pequeno porte, armazéns e estufas foram encontradas, mas mais uma vez com as mesmas características das localidades urbanas, podendo assim englobar tudo numa só zona e considerando no total apenas 4 áreas distintas para a classificação

aerodinâmica e desenvolvimento do escoamento no concelho (Rio tejo, Agricultura e outros, Área florestal e Alcochete).

Palavras-Chave: CLA; Rugosidade; SIG

Abstract

The way the atmospheric flow develops along the boundary layer is the main focus of this work, where the urban environment is undoubtedly the most critical zone due to the heterogeneity of the surface and the interface between the human being and the atmosphere. Considerable progress has been made in understanding and shaping the urban environment in several respects, and wind speeds may vary due to various aspects such as roughness and soil temperature. There are several important points to consider, such as building construction and safety, pedestrian comfort and renewable energy. The world's urban population is expected to increase by about 66% by 2050 (Kent, et al., 2017) and as cities grow outwards and, more importantly, larger populations are exposed to wind. Therefore, improved knowledge of the effects of urban flow is vital to the development of cities.

The main objective of the present work is to characterize the terrain aerodynamic roughness, using appropriate morphometric models and starting from information in GIS environment - land occupation charts available through the Directorate General of the Territory - with the support of Google Earth allowing to make an updated interpretation of the aerodynamic roughness of the ground and the collection of morphometric data, thus allowing to later estimate vertical wind speed profiles.

After analyzing COS data, two distinct zones were chosen within the Lisbon Metropolitan Area for the implementation of the model created, the municipality of Lisbon and the municipality of Alcochete. With the data provided by the charts, maps with eight aerodynamic megaclasses were created, since the information originally given was very detailed and aerodynamically inappropriate. Once the different aerodynamic areas are classified, the tabulated values of Wieringa (1993) are used to assign the values of the roughness parameters in each distinct zone of the final maps of each county, except in urban/suburban areas. In urban areas, it is necessary to calculate z_0 and d using Kanda's (2013) method for $\lambda_p < 0.45$ and Macdonald's (1998) for $\lambda_p > 0.45$. Being the logarithmic wind profile and once all the values of z_0 and d are evaluated, the vertical wind velocity profiles can be established.

By choosing the municipality of Lisbon it is clear that the information contained in the data provided by the COS is insufficient since through these maps there would be only one area representative of urbanization. From the aerodynamic point of view, this is not acceptable since within an urban area there may be several sufficiently large zones with very different density and height characteristics of the elements. This would influence the development of atmospheric runoff. Thus, and with the help of the Google Earth tool, it was possible to identify seven distinct areas within the large urban area of the county.

In addition to a mostly urban area, the municipality of Alcochete was chosen, being a mostly agricultural area and with an almost opposite orography to Lisbon. Through the study of this municipality it was easy to realize that although there are some urban/suburban locations, they are very scattered, with relatively small heights and/or represented in small areas, having no influence on the overall flow. Areas with small trees, warehouses and greenhouses have been found, but once again with the same characteristics of urban locations, thus being able to encompass everything in one zone and considering in total only 4 distinct areas for aerodynamic classification and flow development in the county (Tejo River, Agriculture, and others, Forest area and Alcochete).

Keywords: ABL; Roughness; GIS

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas.....	x
Siglas e Acrónimos.....	xi
Simbologia e Notações.....	xi
Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Camada Limite Atmosférica.....	3
2.1. Rugosidade do terreno.....	5
2.2. Perfis de velocidade do vento.....	7
Capítulo 3 – Ocupação e uso do solo	9
3.1. Cartografia temática	9
3.2. Software ArcGis.....	10
3.3. Modelos de caracterização de rugosidade aerodinâmica.....	11
3.3.1. Métodos morfométricos para o cálculo de z_0 e d	13
3.3.2. Os modelos morfométricos apropriados para o cálculo de z_0 e d	17
Capítulo 4 – Metodologia.....	21
4.1. Pesquisa e interpretação da cartografia	21
4.2. Escolha e tratamento das zonas de estudo.....	22
Capítulo 5 – Resultados e discussão.....	25
5.1. Concelho de Lisboa.....	25
5.2. Concelho de Alcochete.....	31
Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	34
Referências Bibliográficas	36
Anexo A	39

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Troposfera dividida em duas partes: Camada Limite Atmosférica (a cinzento) e Atmosfera Livre (acima da CLA) [(Moreira, 2012); Adaptado de Stull, 1998]	3
Figura 2.2 – a) Perfil de velocidade média espacialmente média perto de uma área urbana. Adaptado de (Bottema & Mestayer, 1998); b) Esquema do fluxo através e sobre uma área urbana. Adaptado de (Britter & Hanna, 2003)	4
Figura 2.3 – Efeito da rugosidade do solo sobre o perfil de velocidade do vento (Faria, 2014).....	7
Figura 3.1 – Faixa de densidade de elementos de rugosidade urbana (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011).....	12
Figura 3.2 – Dimensões de superfície usadas na análise morfométrica. O elemento retratado tem as dimensões médias características, espaçamento e área total do lote, A_t da matriz urbana. A_f é a área frontal dos obstáculos e A_p é a área em planta dos obstáculos.	13
Figura 3.3 – Ilustração do cálculo do equilíbrio de arrasto para matrizes uniformes e o abrigo mútuo dos edifícios circundantes. As áreas azuis indicam, aproximadamente, a região abrigada total devido ao abrigo combinado de todos os edifícios e as áreas vermelhas indicam a área frontal desprotegida de um único edifício na matriz, A_f^* . a) vista lateral; b) vista de cima para baixo; c) um único edifício da matriz. Nota: RSL é a subcamada de rugosidade e ISL é a subcamada inercial (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011).....	16
Figura 3.4 – Formas e dimensões dos “volumes protegidos eficazes” idealizados em torno de elementos isolados de rugosidade: a) de lado e b) de cima (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011).....	16
Figura 4.1 – Mapa do nível NUT III para Portugal continental (NUTS de Portugal, 2019).....	22
Figura 4.2 – Mapa de ocupação e uso do solo para a Área Metropolitana de Lisboa, com as 225 classes originais.....	23
Figura 4.3 – Mapa de ocupação e uso do solo com as oito megaclasses aerodinâmicas para a Área Metropolitana de Lisboa. As delimitações a preto são as áreas de estudo, o concelho de Lisboa à esquerda e o concelho de Alcochete à direita. Amarelo – Agricultura; Laranja – Mato; Azul – Corpos de água; Castanho – Espaços descobertos; Cor-de-rosa – Tecido suburbano; Vermelho – Tecido urbano; Verde claro – Árvores de pequeno porte; Verde escuro – Árvores de grande porte.....	24
Figura 5.1 – Mapa de ocupação e uso do solo para o concelho de Lisboa: a) mapa inicial (ainda das 225 classes); b) mapa com as oito megaclasses aerodinâmicas [Nota: para a interpretação do mapa b) as descrições das cores é igual à da Figura 4.3]	25
Figura 5.2 – Mapa de rugosidade (z_0) para o concelho de Lisboa originário do estudo “Mapas Climáticos para o Ordenamento” (Alcoforado, Lopes, Andrade, & Vasconcelos, 2005); (Correia, Lopes, & Marques, 2015) e (Lisboa: Mapas Climáticos para o Ordenamento, 2019).....	26
Figura 5.3 – Mapa de rugosidade aerodinâmica para o concelho de Lisboa após cruzamento de dados com o mapa da Figura 5.1 b) e Figura 5.2 (Zona 1 – vermelho, $z_{0,1} = 0,62 m$; Zona 2 – laranja, $z_{0,2} = 0,44 m$; Zona 3 – amarelo, $z_{0,3} = 0,72 m$; Zona 4 – verde claro, $z_{0,4} = 0,17 m$; Zona 5 – verde escuro, $z_{0,5} = 0,78 m$; Zona 6 – azul, $z_{0,6} = 0,15 m$; Zona 7 – roxo, $z_{0,7} = 0,30 m$; Zona 8 – cor-de-rosa, $z_{0,8} = 0,63 m$)	27

Figura 5.4 - Mapa final da rugosidade aerodinâmica equivalente para a concelho de Lisboa. Lx01 – cor-de-rosa; Lx02 – Amarelo; Lx03 – cinzento; Lx04 – Azul escuro; Lx05 – Laranja; Lx06 – Preto; Lx07 – Vermelho; Lx08 – Verde claro; Lx09 – Verde Escuro; Lx10 – Castanho; Lx11 – Azul claro.....	28
Figura 5.5 – Representação gráfica dos valores de d e z_0 para as diversas áreas de rugosidade aerodinâmica, onde os pontos a preto foram calculados através do método Kanda e a vermelho através do método Macdonald.....	29
Figura 5.6 – Perfil de velocidade vertical para diferentes zonas do concelho de Lisboa	30
Figura 5.7 – Representação dos perfis de velocidade vertical para todas as áreas do concelho de Lisboa. RSA – Regulamento de Segurança e Ações, Dec-Lei 235/83.	30
Figura 5.8 – Mapa de ocupação e uso do solo para o concelho de Alcochete: a) mapa inicial (ainda das 225 classes); b) mapa com as oito megaclasses aerodinâmicas [Nota: para a interpretação do mapa b) as descrições das cores é igual à da Figura 4.3].....	31
Figura 5.9 – Mapa de rugosidade aerodinâmica para o concelho de Alcochete [Nota: para a interpretação do mapa, as descrições das cores é igual à da Figura 4.3 b)]	31
Figura 5.10 – Mapa final da rugosidade aerodinâmica equivalente para a concelho de Alcochete. Alc01 – azul; Alc02 – Vermelho; Alc03 – Amarelo; Alc04 – Verde escuro.....	32
Figura 5.11 - Representação dos perfis de velocidade vertical para as áreas do concelho de Alcochete.	33

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Comprimento de rugosidade de tipos de superfícies homogêneas (z_0), (Choi, 2009); (Wieringa, 1993)	6
Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d para as diversas zonas de rugosidade aerodinâmica descritas na Figura 5.4, para o concelho de Lisboa	28
Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d para as diversas zonas de rugosidade aerodinâmica descritas na Figura 5.10, para o concelho de Alcochete	33
Tabela A.1 – Modelos morfométricos adequados para o cálculo dos parâmetros aerodinâmicos	39
Tabela A.2 – Classes criadas e respetivas descrições correspondentes. De notar que existem descrições que existem em mais do que uma classe uma vez que vai depender da sua envolvente para saber em que classe agrupar.	41

Siglas e Acrónimos

AEA	Agência Europeia do Ambiente
AL	Atmosfera Livre
AML	Área Metropolitana de Lisboa
CAOP	Carta Administrativa Oficial de Portugal
CL	Camada Limite
CLA	Camada Limite Atmosfera
CLC	Corine Land Cover
COS	Cartografia/Cartas de Ocupação e uso do Solo
CORINE	CO-ordination of INformation on the Environment
DGT	Direção-Geral do Território
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETRS	European Terrestrial Reference System
IFN	Inventário Florestal Nacional
MCG	Modelos de Circulação Global
MM	Modelos de Mesoescalas
MPC	Modelos de Predição de Climas
NUT	Nomenclatura das Unidades Territoriais
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UMC	Unidade Mínima Cartográfica

Simbologia e Notações

α	Constante empírica (método Macdonald) ($\alpha = 4,43$)
δ	Espessura/profundidade da camada limite (m)
κ	Constante de Van Karman ($\kappa = 0,41$)
λ_f	Densidade da área frontal dos obstáculos
λ_f^*	Densidade da área frontal não protegida dos obstáculos
λ_p	Densidade da área em planta dos obstáculos
ρ	Massa específica do ar ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$)
σ_h	Desvio padrão das alturas dos edifícios (m)
τ_0	Tensão de corte à superfície da Terra

ψ_{RSL}	Termo de correção da subcamada de rugosidade ($\psi_{RSL} \approx 0,193$)
A_f	Área frontal dos obstáculos (m^2)
A_f^*	Área frontal não protegida dos elementos (m^2)
A_p	Área em planta dos obstáculos (m^2)
A_t	Área total do lote da matriz (m^2)
b	Largura do edifício (m)
c	Constante modelo Wakelength ($c = 0,7$)
C_D	Coefficiente de arrasto dos obstáculos ($C_D = 1,2$)
C_{dh}	Coefficiente de arrasto de obstáculo isolado
C_S	Coefficiente de arrasto da superfície do solo entre obstáculos ($C_S = 0,003$)
d	Deslocamento do plano zero/altura de deslocamento (m)
D_x	Comprimento da matriz (m)
D_y	Largura da matriz (m)
e	Constante modelo Wakelength ($e = 2,7182$)
h	Altura do edifício (m)
h_{max}	Altura máxima dos edifícios (m)
h_r	Altura média de construção (m)
l	Profundidade do edifício (m)
L_c	Comprimento do arrasto da cobertura (m)
L_R	Comprimento de recolamento de tardo (m)
L_W	Extensão da zona protegida (m)
L_x	Comprimento do elemento de rugosidade (m)
L_y	Largura do elemento de rugosidade (m)
u	Velocidade (m/s)
u_*	Velocidade de atrito (m/s)
U_h	Velocidade do vento à cota da cobertura (m/s)
$u(z)$	Velocidade vertical (m/s)
W_x	Comprimento do espaçamento entre elementos de rugosidade (m)
W_y	Largura do espaçamento entre elementos de rugosidade (m)

z	Altura vertical (m)
z_0	Comprimento equivalente de rugosidade (m)
$z_{0(mac)}$	Comprimento equivalente de rugosidade de Macdonald (m)
Z_{dpl}	Altura de deslocamento

Capítulo 1 – Introdução

A Camada Limite é a parte da atmosfera diretamente influenciada pela heterogeneidade da superfície da Terra, onde as suas características de rugosidade estão quase sempre em constante mudança, ou seja, existe uma elevada variação de rugosidade aerodinâmica ao longo da superfície, resultando num fluxo de ar parcialmente ajustado às características das superfícies a montante. As mudanças de rugosidade podem ser graduais ou bruscas, desempenhando um papel relevante nas características do fluxo do vento e, portanto, é uma variável que não pode ser negligenciada na modelação de fluxo e avaliação de recursos.

A Engenharia do vento, consiste no estudo das interações entre o vento na Camada Limite Atmosférica e o Homem e as suas obras na superfície da Terra, cobrindo uma gama alargada de temas tais como as ações do vento sobre as estruturas, a energia eólica (ativa ou passiva), a qualidade do ar ambiente ou o conforto/segurança pedonal. Do ponto de vista da segurança estrutural interessa considerar os ventos fortes e extremos (tornados, ciclones, etc.), mas para as aplicações energéticas – produção e ventilação natural, dispersão de poluentes e ações sobre as pessoas – são os mais moderados que devem ser considerados.

Entender a distribuição espacial da velocidade média do vento a longo prazo é essencial para a tomada de decisões, como por exemplo, no que diz respeito à localização de turbinas eólicas. No entanto, muitas vezes há falta de medições para permitir um mapeamento preciso da velocidade do vento. Apesar da longa evolução do mapeamento e do desenvolvimento de métodos para avaliar o vento como um recurso, juntamente com o aumento das capacidades computacionais, não existe um método único geral para a criação de mapas de vento.

A forma como o escoamento atmosférico se desenvolve no seu percurso na Camada Limite Atmosférica, isto é, o vento que realmente fornece energia, dispersa poluentes e atua sobre as pessoas e estruturas, depende da orografia e da rugosidade, ou seja, do tipo de ocupação do solo. Há assim, todo o interesse em estimar de forma apropriada a evolução do vento com a variação das características do terreno, mas conformes com a realidade.

A cartografia de ocupação/uso do solo tem um papel fundamental no ordenamento do território e na monitorização ambiental, e a sua aplicação tem vindo a ser alargada ao planeamento ambiental, político, económico e social. Este tipo de produto cartográfico retrata um momento temporal específico e constitui uma ferramenta imprescindível no panorama atual para entidades públicas e privadas dos mais diversos setores. Com o recurso a este tipo de cartografia, pode avaliar-se a extensão, distribuição e relação espacial de classes de ocupação/uso do solo, identificar locais próprios para certas atividades e planear o presente e o futuro de uma forma fundamentada.

Nos anos 80, as informações disponíveis do uso do solo eram obtidas a partir de estatísticas (de uso do solo) e mapas topográficos, sendo esta uma informação bastante incompleta, desatualizada e encontrava-se disponível apenas para áreas restritas (municípios aos quais pertence essa informação ou arredores). Após algum tempo e até ao final dos anos 90, devido à falta de dados da cobertura/uso do solo adequadas, utilizavam-se imagens de satélite em parceria com cartas topográficas e estatísticas de uso do solo, acabando por melhorar o método de classificação tornando-o assim mais preciso.

Hoje em dia com os dados orográficos públicos e disponíveis em formato digital, os dados georreferenciados de cobertura do solo têm-se mostrado disponíveis para locais em todo o mundo. Com este novo método de classificação e recolha de informação, houve uma melhoria considerável da

informação disponível, resultando assim num aumento acentuado da precisão da classificação e número de classes de uso do solo. Como grande exemplo deste progresso, existe o programa da Comissão Europeia - Corine Land Cover (CLC), onde se tem vindo a produzir a cartografia de uso da terra, na forma de descrições detalhadas da sua ocupação e características, com uma definição de 25 ha, para todos os países europeus, estando disponíveis para grande parte deles.

Os estudos sobre a qualidade do ar urbano focam essencialmente o fluxo do vento, sobre e através da cidade, como distribuidor de poluição. O fluxo do vento das cidades em particular e os níveis de turbulência locais afetam diretamente a mobilidade e conforto dos pedestres. É então necessário compreender o fluxo do vento através e acima da área urbana e/ou a dispersão de materiais nesse fluxo (Hanna & Britter, 2002), existindo observações de campo e de laboratório que são interpretadas em termos de vários processos físicos, que uma vez conhecidos, são frequentemente combinados e reformados em modelos matemáticos que podem formar uma hierarquia de complexidade, onde cada modelo tem o seu próprio regime de aplicabilidade e precisão.

O presente trabalho pretende obter uma caracterização da rugosidade aerodinâmica do solo recorrendo a modelos morfométricos (geométricos) apropriados e partindo da informação em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) – Cartas de Ocupação e uso do Solo (COS) – permitindo assim estimar perfis de velocidade do vento. Estes modelos, particularmente em ambientes urbanos, dependem das dimensões médias dos elementos que os constituem (edifícios) tal como a densidade de ocupação do solo.

A dissertação está dividida em seis capítulos, começando por uma introdução onde é apresentada a temática e enquadramento do tema, realçando a sua importância nos dias de hoje, passando para o segundo capítulo, onde é explicada a Camada Limite Atmosférica (CLA), a rugosidade do terreno e apresentado os vários perfis de velocidade do vento. Passando ao terceiro capítulo aborda-se de um modo geral a ocupação e uso do solo, apresentando as cartografias temáticas existentes e que se podem adaptar a este caso de estudo, tal como o *software* ArcGis utilizado para o tratamento de dados e por último são demonstrados os vários modelos de caracterização de rugosidade aerodinâmica para efetuar os cálculos dos parâmetros aerodinâmicos. Os três últimos capítulos consistem na demonstração da metodologia criada ao longo do trabalho; apresentação dos principais resultados obtidos ao longo da criação da metodologia tal como a discussão e análise dos resultados; e finalmente uma conclusão contendo os resultados mais importantes, a relação com os objetivos propostos e apresentadas algumas recomendações e sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2 – Camada Limite Atmosférica

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é a camada de ar da Troposfera mais próxima da superfície terrestre que sofre diretamente os efeitos do solo. As alterações na superfície do terreno, tais como a rugosidade e temperatura afetam diretamente o comportamento da CLA, sendo que as topografias de interesse para os diversos estudos desta camada situam-se geralmente em regiões rurais, onde existem colinas e vales, havendo sempre outras zonas que se podem destacar, caso se verificar uma significativa variação da topografia. Erva, água, árvores, rochas, edificações, entre outros, condicionam a rugosidade da superfície onde exercem efeitos consideráveis no escoamento, dando assim uma ideia da complexidade deste fenómeno.

A CLA pode também ser definida como sendo uma camada fina com espessura, δ , entre $200 < \delta < 1000 \text{ m}$, que varia bastante em função do tempo e do espaço, devendo-se maioritariamente à variação de temperatura durante o dia, uma vez que em dias mais quentes as trocas turbulentas de energia, massa e quantidade de movimento são mais intensas. Acima da CLA, isto é, o restante da Troposfera é chamado de Atmosfera Livre (AL). A Figura 2.1 mostra esquematicamente a estrutura da Troposfera.

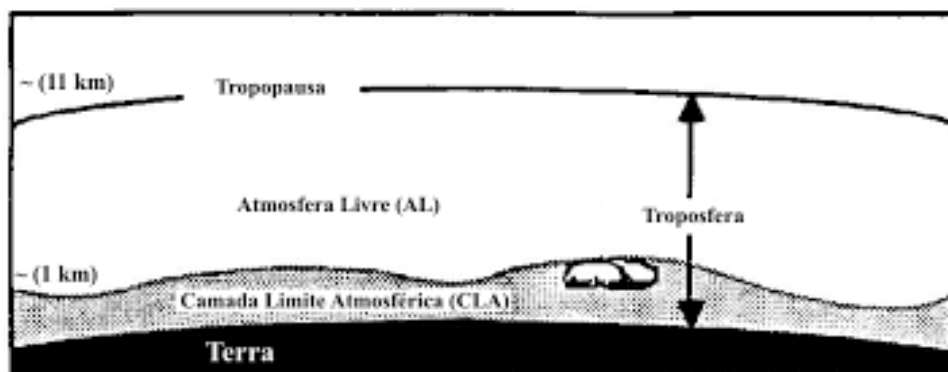


Figura 2.1 – Troposfera dividida em duas partes: Camada Limite Atmosférica (a cinzento) e Atmosfera Livre (acima da CLA) [(Moreira, 2012); Adaptado de Stull, 1998]

Através da Figura 2.2 a) adaptada de Bottema (1997), é possível verificar-se a evolução do perfil do vento ao longo de uma área urbana (perfil logarítmico). Já a Figura 2.2 b) adaptada de Grimmond & Oke (2002), descreve uma secção transversal de uma área urbana típica, onde é possível verificar o que acontece ao fluxo através e acima dessa área. A camada limite urbana é tradicionalmente subdividida em camadas distintas (Fernando, 2010), que são determinadas pelas características da superfície urbana e pelas condições da mesoescala (Barlow, 2014). Os elementos de rugosidade da superfície estão localizados dentro da camada de cobertura urbana (Roth, 2000; Oke, 2007), que experimenta um fluxo altamente variável como consequência da proximidade dos elementos de rugosidade. A camada de cobertura urbana encontra-se dentro da subcamada de rugosidade. A subcamada de rugosidade tem tipicamente entre 2 – 5 vezes a altura média dos elementos de rugosidade (h_r) (Roth, 2000; Barlow, 2014), sendo que o fluxo ainda está a ajustar-se aos efeitos dos obstáculos e a velocidade horizontal é heterogénea. Por último temos a subcamada inercial, onde a camada limite se adapta ao efeito integrado da superfície urbana subjacente e o fluxo é horizontalmente homogéneo (Barlow, 2014), sendo que o vento varia somente com a altura e é tratada por fórmulas de camada limite atmosférica padrão.

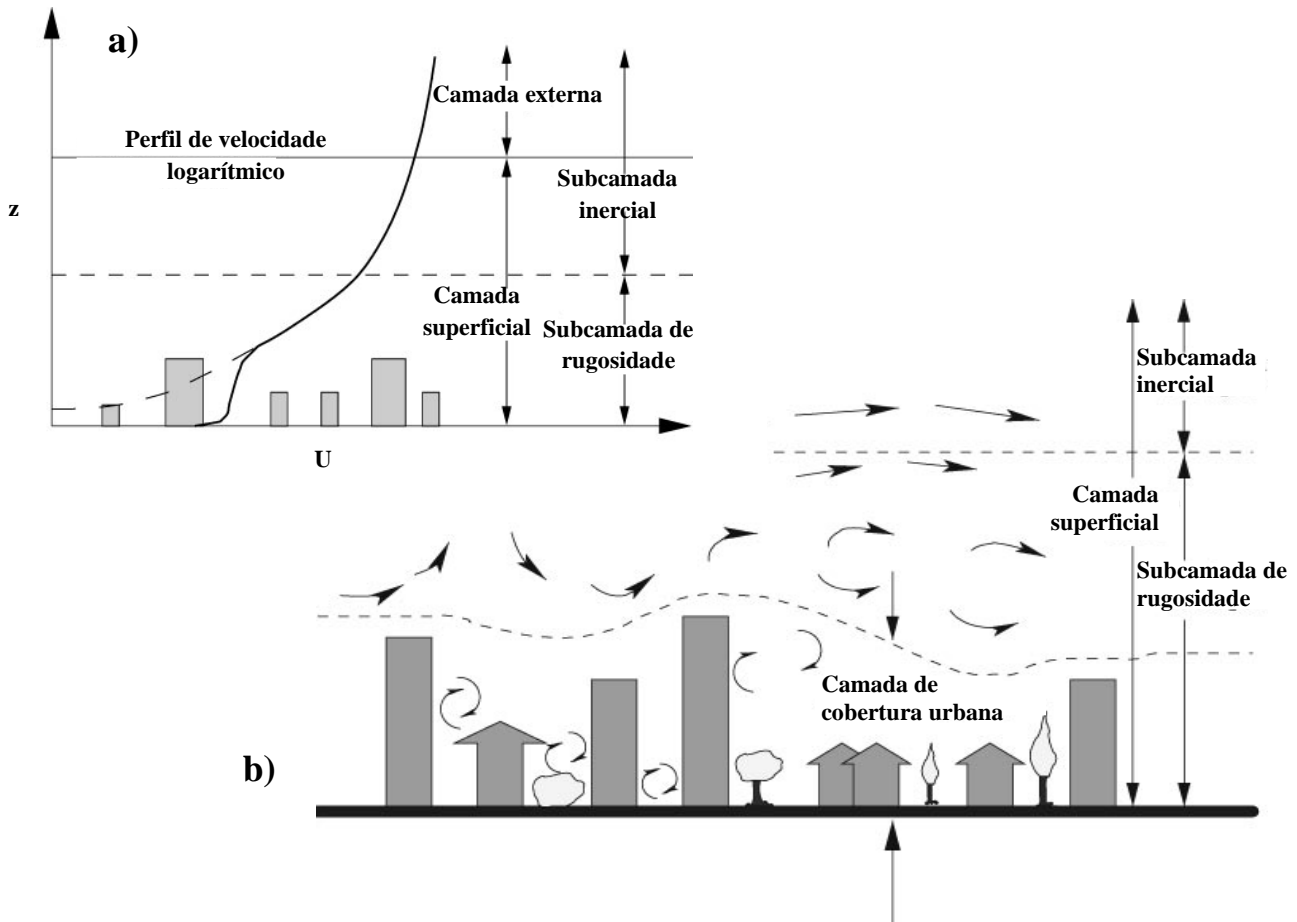


Figura 2.2 – a) Perfil de velocidade média espacialmente média perto de uma área urbana. Adaptado de (Bottema & Mestayer, 1998); b) Esquema do fluxo através e sobre uma área urbana. Adaptado de (Britter & Hanna, 2003)

O estudo do escoamento sobre uma topografia real dentro da CLA sempre interessou a meteorologistas, engenheiros, ambientalistas, entre outros, por diversos motivos e aplicações, como por exemplo, dispersão de poluentes, posicionamento de turbinas eólicas e efeitos destrutivos em estruturas devido à ação do vento. Os fenômenos de escoamento atmosféricos relacionados com turbinas eólicas e linhas de transmissão aéreas verificam-se mais em regiões de terreno sem obstáculos, onde o perfil de vento é completamente desenvolvido e bem compreendido. Como essas regiões são menos frequentes, os projetistas têm de considerar regiões de orografia mais complexa. No que respeita à disponibilidade da energia a influência de colinas pode ser benéfica com o aumento de velocidade do escoamento no topo de colina, ou prejudicial devido à esteira turbulenta a jusante.

De forma a facilitar a modelação numérica dos escoamentos, geralmente são divididos por escalas. Cada escala é descrita em termos de um domínio computacional onde são aplicados modelos matemáticos distintos (Moreira, 2012).

- a) Modelos de Circulação Global, MCG – domínios entre 200 e 500 km
- b) Modelos de Predição de Climas, MPC – domínio entre 50 e 100 km, utilizados para resolver estruturas de frentes climáticas
- c) Modelos de Mesoescalas, MM – domínios típicos com 2 km de altura, onde se enquadra a CLA.

Estes modelos utilizam as mesmas equações gerais, onde as diferenças fundamentais são entre os modelos que consistem nas simplificações das equações. Por exemplo, os MM usualmente desprezam os efeitos da rotação da Terra no escoamento e são os que vão ser aplicados na presente dissertação.

2.1. Rugosidade do terreno

A rugosidade de um terreno é um efeito coletivo da superfície e dos elementos aí dispostos, conduzindo a um retardamento global da velocidade do vento próximo ao solo (Petersen et al., 1998). Uma vez que existem vários tipos de terreno da superfície terrestre, há várias categorias do terreno que são especificadas em diferentes códigos de carga de vento.

O comprimento equivalente da rugosidade z_0 , caracteriza a rugosidade de um terreno e é uma medida da tensão de atrito (ou seja, arrastamento), não sendo um comprimento físico. Pode ser considerado como uma escala de comprimento representando a rugosidade de superfície. Para uma cota baixa (acima do solo ou da camada superficial), a rugosidade de um terreno afeta a intensidade da turbulência, bem como o perfil vertical de velocidade do vento. O deslocamento do plano zero d , é definido como sendo a altura acima do solo onde a velocidade é teoricamente zero e a partir da qual se desenvolve o perfil de velocidade.

Uma simplificação encontrada para caracterizar a maioria dos escoamentos é considerar a rugosidade como sendo uniforme, a menos que se verifique uma variação significativa que, ao acontecer no percurso do vento, promove o desenvolvimento de uma nova Camada Limite (CL). Há vários modelos que avaliam a influência da mudança de rugosidade espacial estimando o comprimento de adaptação onde o escoamento se reajusta à nova situação de rugosidade e as características da nova CL.

A relação de Lettau (1969), Equação (2.1), tem sido usada há quase três décadas por meteorologistas e engenheiros para estimar a rugosidade superficial a partir da geometria de matrizes regulares de elementos de rugosidade. No entanto, esta relação é limitada a baixas densidades de obstáculos, não levando em consideração a diminuição não-linear de z_0 em elevadas densidades de rugosidade, nem considera as diferenças de arrastamento causadas por diferentes formas de obstáculos.

$$z_0 = 0,5 \times h_r \times \frac{A_f}{A_t} \quad (2.1)$$

onde h_r é a altura média de construção (dos elementos de rugosidade), A_f é a área frontal dos elementos e A_t a área total do lote da matriz.

O modelo de rugosidade do terreno foi desenvolvido para avaliar a influência da rugosidade real em escoamentos atmosféricos. Como é sabido, a variação da altura da rugosidade do terreno influencia diretamente no desenvolvimento do perfil de velocidade, onde para situações de elementos mais rugosos há maior retardamento do escoamento próximo do solo e aumento da intensidade turbulenta. Por outro lado, diferentes materiais emitem e absorvem calor de formas distintas, contribuindo também, na variação do perfil de velocidade.

A estimativa da rugosidade superficial constitui um passo inicial das atividades de Engenharia do Vento, onde, no geral o terreno é classificado entre três a cinco categorias. Mas qual será o número ideal de categorias do terreno? Para isso, temos de ter em conta os seguintes pontos:

1. Deve haver tipos suficientes de forma a que o erro induzido ao selecionar erradamente a categoria adjacente seja reduzido.
2. Cada tipo deve ser claramente identificável para que o erro ao selecionar a categoria seja mínimo.

Assim sendo e segundo estes critérios, é importante que a classificação da rugosidade do terreno seja feita de maneira a que cada categoria seja claramente especificada e identificável.

Durante muitos anos a medida de z_0 foi assunto de pesquisa, havendo vários estudos acerca da rugosidade do terreno, onde vários métodos para encontrar valores apropriados de rugosidade foram propostos por Davenport (1960), Deaves (1981), Cazinhe (1985), Schmid & Oke (1990) e Wieringa (1992). A classificação dada por Wieringa (1993) (Tabela 2.1) trata apenas de um melhoramento da classificação proposta por Davenport, onde os valores de z_0 foram verificados e ajustados. Apesar da extensa revisão de rugosidade de Wieringa, verificou-se que há uma falta considerável de dados confiáveis de rugosidade urbana, sendo que esta falta está relacionada, em parte, à procura homogênea necessária para uma avaliação confiável dos parâmetros de rugosidade a partir de perfis de vento ou turbulência.

Tabela 2.1 – Comprimento de rugosidade de tipos de superfícies homogêneas (z_0), (Choi, 2009); (Wieringa, 1993)

Tipo de superfície	z_0 [m]
Mar aberto ou lago, areia solta e neve	0,0002
Betão e asfalto, deserto plano, plano de maré	0,0002 – 0,0005
Campo de neve plana, campo sem relevo com vegetação insignificativa	0,0001 – 0,0007
Campo de gelo áspero	0,001 – 0,012
Solo pousio, pântano	0,001 – 0,004
Erva curta, musgo e áreas de pista dos aeroportos	0,008 – 0,03
Erva longa, urze, pastagens sem quebra-ventos	0,02 – 0,06
Culturas agrícolas maduras baixas, local moderadamente aberto com obstáculos ocasionais, fileiras de árvores isoladas	0,04 – 0,09
Culturas maduras altas, paisagem “jovem” recentemente desenvolvida com cultivos ou culturas de alturas variadas e obstáculos dispersos	0,12 – 0,18
Mata nativa, pomares, floresta jovem e densamente plantada, paisagem “velha” cultivada com muitos grupos de obstáculos grandes	0,35 – 0,45
Pinhal maduro, paisagem muito coberta com grandes obstáculos de tamanho semelhante, cidades ou aldeias homogêneas	0,8 – 1,6
Floresta tropical, florestas irregulares com muitas clareiras, paisagem totalmente coberta com grandes obstáculos, centro de grandes cidades	1,7 – 2,3
Edifícios baixos densos (subúrbios)	0,4 – 0,7
Cidade grande construída regularmente	0,7 – 1,5

As abordagens baseadas em referência requerem comparação entre a imagem do local e as estimativas de altura e/ou densidade de primeira ordem para as tabelas de referência, como a apresentada acima, mas para cidades, considerou-se em alternativa, modelar a rugosidade urbana em função da dimensão e

arranjo dos edifícios, uma vez que a maioria delas são relativamente pequenas (e não permite distinguir as diferentes partes da cidade, tais como o centro antigo, subúrbios, etc.) no que toca ao uso de teorias que requerem que a camada limite total esteja em equilíbrio (o que se verifica para pelo menos 20 km de procura basicamente homogênea). As cidades ou espaços urbanos/suburbanos são as superfícies mais rugosas que existem, como é evidente a partir da verificação de qualquer tabela de valores de deslocamento do plano zero (ou altura de deslocamento) d ou comprimento equivalente de rugosidade z_0 (por exemplo, Wieringa, 1993), Tabela 2.1. assim, o conhecimento preciso das características aerodinâmicas das cidades é vital para descrever, modelar e prever o comportamento dos ventos urbanos e a turbulência em todas as escalas.

2.2. Perfis de velocidade do vento

Os perfis de velocidade representam a condição de contorno para o escoamento na CLA. Podendo ser descritos por uma Lei logarítmica ou, em alternativa, por uma Lei de potência, não sendo nenhuma das duas válida para toda a região da CL. O perfil logarítmico é mais exato e adequado para regiões mais baixas, enquanto que a lei de potência é melhor para quando a informação disponível não for suficiente ou quando usada como primeira aproximação. Para o presente trabalho, a camada superficial é a mais importante, sendo adotado o perfil logarítmico de velocidade, onde a velocidade do vento no solo praticamente zero e a uma dada altura passa a ser quase uma constante, como mostra a Figura 2.3.

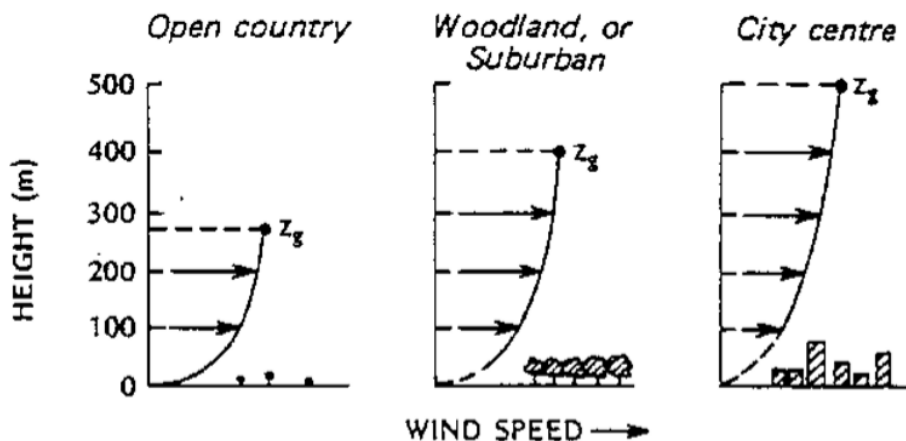


Figura 2.3 – Efeito da rugosidade do solo sobre o perfil de velocidade do vento (Faria, 2014)

A lei logarítmica foi desenvolvida no começo do séc. XX por Prandtl (1932), sendo aplicada na subcamada inercial e representada pela Equação (2.2), indicando a variação da velocidade com a altura vertical z , que é dada em função da velocidade de atrito u_* , da constante de Von Karman, κ ($= 0,41$) (Högström, 1996), do comprimento equivalente de rugosidade z_0 e da altura de deslocamento d . Contudo, o perfil real de velocidade na vertical depende também da estratificação da temperatura e pressão na atmosfera.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2.2)$$

Sendo a velocidade de atrito, dada por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.3)$$

onde τ_0 é a tensão de corte à superfície da Terra e ρ é a massa volúmica do ar ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$).

Sobre a cobertura urbana uma superfície muito rugosa, o perfil de velocidade média acima da camada de rugosidade superficial, tem uma forma logarítmica, o que não se verifica abaixo desse nível. Esta aparente inconsistência deve-se à dificuldade de especificar u_* , z_0 e d a partir de perfis de velocidade determinadas experimentalmente, problema esse que acaba por ser mais aparente com medições de campo.

Capítulo 3 – Ocupação e uso do solo

O modelo de ocupação e uso do solo é desenvolvido para avaliar a influência da rugosidade real do terreno no escoamento atmosférico. É também importante distinguir uso do solo e ocupação do solo, considerando que o uso se refere à atividade humana de um certo tipo para uma determinada área e a ocupação se refere à construção ou vegetação que ocupa a superfície.

A avaliação correta da cobertura do solo e do comprimento característico da rugosidade de um local para fins de avaliação dependem de esforços de inspecionar minuciosamente a paisagem do local e dos arredores e normalmente depende de visitas específicas ao local, uma vez que as informações em formato digital e em papel são um pouco imprecisas. Mesmo havendo essas informações disponíveis, aspetos como a densidade de árvores ou casas, tipos de edifícios, entre muitos outros, são raramente compreendidos. A variação da rugosidade do terreno influencia diretamente no desenvolvimento do perfil de velocidade, uma vez que o aumento da rugosidade diminui a quantidade de movimento do escoamento próximo do solo.

3.1. Cartografia temática

Atualmente, com a informação digital pública, as descrições da ocupação da superfície têm vindo a encontrar-se disponíveis em vários locais de todo o mundo e com detalhes e precisão relevantes. O programa da Comissão Europeia CLC é talvez o primeiro e melhor exemplo deste progresso.

O projeto CORINE (CO-ordination of INformation on the Environment) Land Cover foi produzido para a Direção-Geral do Território (DGT) em articulação com a Agência Europeia do Ambiente (AEA), entre o ano de 1985 e de 1990. Tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de informação sobre o estado do ambiente a nível europeu, produzindo mapas de ocupação/uso do solo para países da União Europeia relativos ao ano de 1990, informação essa que com o decorrer do tempo vai sendo atualizada (atualizações essas já feitas para 2000, 2006 e 2012, com base nas alterações do solo observadas através de imagens de satélite e fotografias aéreas). A cartografia produzida é sob a forma de descrições detalhadas da sua ocupação e características, estando disponíveis em formato digital para cerca de 33 países, segundo dados de 2007 (Silva, Ribeiro, & Guedes, 2007) e espera-se que expanda a sua cobertura geográfica. De acordo com as características particulares do terreno, este projeto tem cerca de 44 classes que foram agrupadas em 14 classes de rugosidade. O agrupamento das classes nem sempre foi óbvio, sendo preciso levar em conta que o principal objetivo do projeto CLC é classificar o uso da Terra e a paisagem e não a rugosidade da superfície, no que respeita ao seu efeito sobre o vento.

As Cartas de Ocupação e uso do Solo (COS) da DGT é uma cartografia que representa unidades de ocupação/uso do solo homogêneas, constituída por um sistema hierárquico de classes, com cinco níveis (tendo mapas para os anos de 1995, 2007 e 2010). O nível mais detalhado desta nomenclatura é constituído por 225 classes, para um conjunto simplificado de nove classes designadas como megaclasses: Territórios artificializados, Agricultura, Pastagens, Sistemas agroflorestais, Floresta, Matos, Espaços descobertos ou com vegetação esparsa, Zonas húmidas e Corpos de água. De notar que estas megaclasses foram criadas segundo o tipo de uso e ocupação do solo e não segundo a rugosidade do terreno.

No que toca aos limites da COS na fronteira com Espanha são os da versão de 2010 da Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) e do CLC são os da versão de 2012 e na fronteira marítima são definidos por fotointerpretação. No entanto, para o uso da COS em modelos de fluxo do vento, é necessário que cada classificação ou cobertura da terra seja classificada por um comprimento de rugosidade equivalente. Para o caso do CLC recorreram ao Atlas Europeu do Vento (Troen & Peterson, 1989) e por comparação das zonas, foi atribuído um intervalo de rugosidade equivalentes para cada classe.

Pela primeira vez na existência das duas cartografias, a produção da COS 2010 e do CLC 2012 foi feita em simultâneo, permitindo estabelecer uma harmonização dos dados comparáveis dos dois produtos. Assim sendo, a nomenclatura do nível 3 da COS é compatível com a nomenclatura das 44 classes do CLC, que constitui um produto de referência em ocupação/uso do solo, na Europa e em Portugal. Para além das duas nomenclaturas apresentadas acima, ainda temos o processo estatístico do Inventário Florestal Nacional (IFN), onde comparado com as estatísticas da COS e do CLC é necessário ter maior cuidado, pois os objetivos dos dois programas, as especificações técnicas, a base metodológica, a nomenclatura e os conceitos utilizados são substancialmente diferentes.

Entende-se por unidade de ocupação/uso do solo qualquer área de terreno superior ou igual à unidade mínima cartográfica (UMC), com distância entre linhas superior ou igual a 20 m para a COS e de 100 m para o CLC e cuja percentagem de uma determinada classe de ocupação/uso do solo seja superior ou igual a 75% da totalidade da área delimitada, sendo a UMC da COS de 1 ha, do CLC de 25 ha e do IFN de 0,5 ha, o que explica que não é possível fazer uma comparação direta entre as três cartografias.

Em síntese, os produtos CLC, COS e IFN assentam em metodologias e conceitos estabelecidos em função dos objetivos diferentes, tal como técnicas diferentes, que levam a resultados também diferentes. Não há, evidentemente, um produto melhor do que representam, com pressupostos diferentes, formas de interpretação, tomar a decisão de quando deve usar um ou outro, interessando sempre conhecer os detalhes das especificações técnicas, das bases metodológicas e dos conceitos utilizados e aos objetivos para os quais se pretende utilizar a informação. (Caetano & Marcelino, 2017); (Caetano, Igreja, Marcelino, & Costa, 2017) e (Caetano, et al., 2010)

3.2. Software ArcGis

O software *ArcGis* é um sistema de informação geográfica utilizado para trabalhar com os mapas de ocupação do solo e informações geográficas. Inclui vários *softwares* para o desktop do Windows:

- ***ArcReader***, que permite visualizar e consultar mapas criados com os outros produtos do *ArcGis*
- ***ArcGis para desktop***, que está licenciado sob três níveis de funcionalidades:
- ***Desktop básico*** (anteriormente conhecido como *ArcView*), que permite visualizar dados espaciais, criar mapas em camadas e realizar análise de base.
- ***Desktop standard*** (anteriormente conhecido como *ArcEditor*), que além da funcionalidade de *ArcView*, inclui ferramentas mais avançadas para manipulação de arquivos de forma e geodatabase.
- ***Advanced desktop*** (anteriormente conhecido como *ArcInfo*), que inclui capacidades de manipulação de dados, edição e análise.

Este *software* é um produto da empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute) e pode ser usado para a criação e utilização de mapas, compilação dos dados geográficos, análise das informações mapeadas, gestão de informação geográfica numa base de dados, entre outros.

Para a realização desta dissertação recorreu-se ao *ArcGis Advanced Desktop* e maioritariamente às ferramentas do *ArcMap*.

3.3. Modelos de caracterização de rugosidade aerodinâmica

São apresentados modelos matemáticos e o domínio físico a ter em conta de modo a resolver as respetivas condições de contorno de cada modelo, sendo explicados apenas os mais indicados para o trabalho em questão.

Existem muitos fatores geométricos que podem influenciar os parâmetros aerodinâmicos das superfícies urbanas e, portanto, os perfis verticais do vento encontrados acima dessa superfície. Utilizando modelação quase-empírica, estimamos a dependência do comprimento equivalente de rugosidade e do deslocamento do plano zero para superfícies urbanas idealizadas, nas duas características geométricas mais significativas: densidade dos elementos na área de superfície e variabilidade da altura média dos edifícios, h_r .

Há duas classes de abordagem para o conhecimento das características aerodinâmicas:

1. **Métodos morfométricos** (ou geométricos) que usam algoritmos que relacionam parâmetros aerodinâmicos a medidas de morfometria de superfície.
2. **Métodos micrometeorológicos** (ou anemométricos) que utilizam observações de campo de vento ou turbulência para resolver parâmetros aerodinâmicos incluídos em relações teóricas derivadas do perfil logarítmico do vento.

Os métodos morfométricos têm a vantagem de os valores poderem ser determinados sem a necessidade de torres meteorológicas e outros instrumentos de medição. Além disso, se um banco de dados espacialmente contínuo da distribuição de elementos de rugosidade estiver disponível, os valores de velocidade do vento podem ser calculados para qualquer direção em torno do local de interesse. No entanto, têm a desvantagem de que a maioria é baseada em relações empíricas derivadas do trabalho no túnel de vento que dizem respeito a fluxos idealizados sobre matrizes simplificadas de elementos de rugosidade. Nessas simulações o fluxo é muitas vezes constante na direção, geralmente normal à face dos elementos e as matrizes são frequentemente espaçadas de forma regular. Essas condições diferem da realidade, onde a direção do vento está sempre a mudar e, mesmo que os padrões de ruas sejam relativamente regulares, o tamanho e a forma dos elementos individuais de rugosidade não são regulares.

Os métodos micrometeorológicos têm a vantagem de as características da superfície não precisarem ser especificadas. As maiores desvantagens são as despesas e dificuldades envolvidas na obtenção e operação de um campo (especialmente a instalação de uma torre numa cidade) e o facto de que, embora em princípio possam ser obtidos resultados para qualquer direção de vento, na prática condições apropriadas podem não ocorrer para todas as direções do vento (Grimmond & Oke, 1999).

A análise morfológica forneceu, com um grau adequado de precisão para condições de escala completa, parâmetros relevantes necessários para interpretar os resultados. A parametrização para z_0 e d é possível através do uso de várias abordagens, sendo os métodos de uso da terra usados na maioria dos modelos de dispersão aplicados. Esses métodos são baseados nas tabelas de z_0 versus tipos ocupação/uso do solo (por exemplo, Stull, 1997), tal como já foi referido na secção 2.1, havendo alguns problemas no que toca às áreas urbanas, uma vez que são muito mais complexas, não podendo ser usados valores tabelados e sendo necessário e mais preciso efetuar-se cálculos dos parâmetros aerodinâmicos.

É possível obter uma visão sobre a relação entre os parâmetros aerodinâmicos de superfície e a densidade dos edifícios cobrindo a superfície considerando os três regimes de fluxo descritos após o trabalho no túnel do vento de Hussain & Lee (1980) e considerando matrizes de altura uniforme, como podemos observar na Figura 3.1:

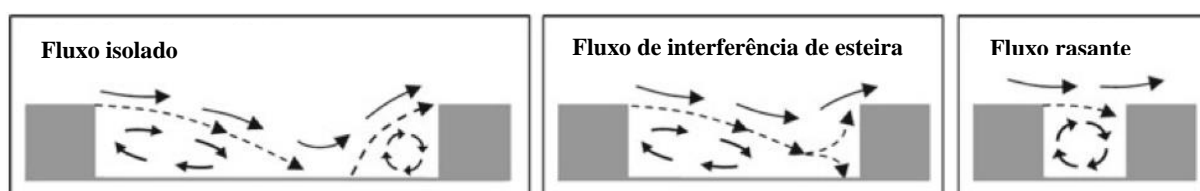


Figura 3.1 – Faixa de densidade de elementos de rugosidade urbana (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011)

1. **Fluxo isolado** – baixa densidade, ocupando uma área superior ou igual a 30% e inferior a 50% ($0,3 \leq \lambda_p < 0,5$, onde λ_p é explicado depois da Figura 3.2), no qual os elementos normalmente são mais baixos, estão distantes uns dos outros e atuam como geradores de esteira individuais, ou seja, os obstáculos em volta dos edifícios individuais têm interferência insignificante nos edifícios a jusante (h_r : 5 – 8 m; d : 2 – 4 m; z_0 : 0.3 – 0.8);
2. **Fluxo de interferência de esteira** – média densidade, os elementos geralmente têm entre dois a quatro andares, os elementos são de várias alturas, ocupam mais de 50% da área de superfície ($0,5 \leq \lambda_p < 0,8$) e o espaçamento é próximo o suficiente para que os acordes se reforcem mutuamente (h_r : 7 – 14 m; d : 3.5 – 8 m; z_0 : 0.7 – 1.5);
3. **Fluxo rasante** – alta densidade, ocupando uma área de cobertura igual ou superior a 80% ($\lambda_p \geq 0,8$), em que a densidade dos elementos é tão grande que o fluxo principal salta sobre o topo dos mesmos (h_r : 11 – 20 m; d : 7 – 15 m; z_0 : 0.8 – 1.5). (Grimmond & Oke, 1999); (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011)

Tendo em conta toda a informação sobre os modelos de caracterização de rugosidade aerodinâmica, uma estimativa mais precisa de z_0 e d é desejável, podendo ser feita usando informações sobre tamanhos e espaçamentos de edifícios. A lista de métodos é consideravelmente extensa, diferindo em termos dos atributos dos elementos de rugosidade e/ou das funções de ponderação utilizadas e explicadas a seguir.

Delineamos os métodos morfométricos referindo algumas das suas semelhanças e diferenças, e realizamos uma análise de sensibilidade de cada um deles. As dimensões usadas para caracterizar a geometria da superfície nos diferentes métodos são definidas na Figura 3.2.

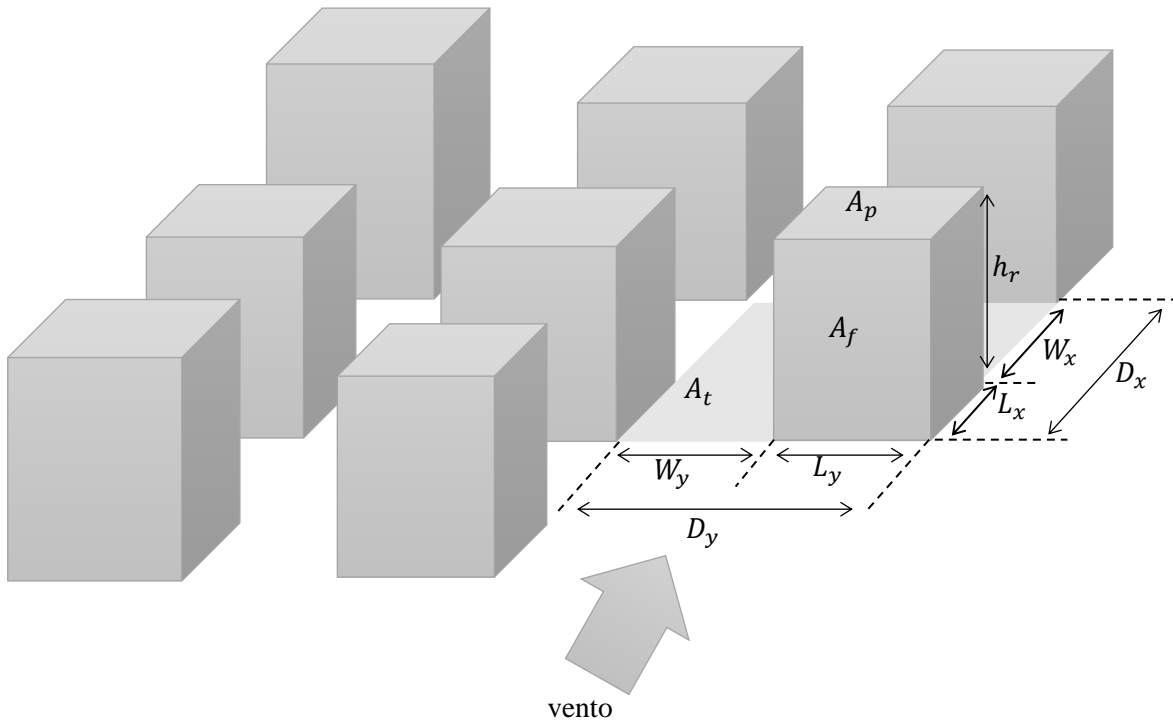


Figura 3.2 – Dimensões de superfície usadas na análise morfométrica. O elemento retratado tem as dimensões médias características, espaçamento e área total do lote, A_t da matriz urbana. A_f é a área frontal dos obstáculos e A_p é a área em planta dos obstáculos.

Usando as dimensões indicadas na figura acima, definem-se as seguintes proporções não dimensionais para caracterizar a morfometria: a densidade da área frontal dos obstáculos (razão da área frontal dos edifícios em relação à área total do piso), $\lambda_f = A_f/A_t$ e a densidade da área em planta dos obstáculos (razão da área plana ocupada pelos edifícios em relação à área total do piso), $\lambda_p = A_p/A_t$. Jackson (1981) mostrou que um limite inferior para d é a altura de uma superfície que seria obtida pelo achatamento de todas as rugosidades numa superfície lisa, de modo que, para um conjunto de obstáculos com área de secção transversal uniforme, $d/h_r > \lambda_p$.

A dependência de d e z_0 no tamanho, forma, densidade e distribuição de elementos de superfície foi estudada usando túneis de vento, processos analíticos, modelação numérica e observação de campo. Há assim, alguma evidência para a abordagem pragmática de determinar os parâmetros aerodinâmicos para várias áreas de uma cidade ou para toda a cidade, dependendo da área total da mesma e da sua variação de rugosidade. A lista dos métodos morfométricos considerados está longe de ser exaustiva, incluindo aqueles comumente usados e apresentados a seguir.

3.3.1. Métodos morfométricos para o cálculo de z_0 e d

Existem vários métodos morfométricos – relação entre parâmetros aerodinâmicos e morfologia da superfície – e cada método tem as suas próprias suposições e faixa de aplicabilidade, onde os mais recentes incorporam características geométricas cada vez mais complexas. Os métodos morfométricos selecionados para a avaliação atendem aos seguintes critérios:

1. d e z_0 estão incluídos nas equações;
2. O método é aplicável a uma ampla gama de densidades e ambientes urbanos;
3. Os dados geométricos necessários são facilmente obtidos em ambientes urbanos complexos

Seis métodos para determinar o comprimento equivalente de rugosidade (z_0) e o deslocamento do plano zero (d) são apresentados aqui (ver respectivas equações na Tabela A.1, em anexo), tendo sido comparados com estudos efetuados em locais reais (por exemplo, (Kent, et al., 2017)), de modo a verificar a veracidade e proximidade dos valores reais de cada um deles. A perspectiva de um perfil de velocidade do vento na camada limite de equilíbrio, usando apenas alguns parâmetros é atraente, especialmente acima de uma superfície urbana muito rugosa com fluxo complexo em várias escalas de comprimento e tempo (Britter & Hanna, 2003).

Embora a magnitude de d e z_0 esteja fundamentalmente relacionada à morfologia da superfície, a atribuição de valores apropriados permanece desafiadora. Isso é particularmente verdadeiro nos centros das cidades, com variabilidade acentuada nas alturas e densidades dos elementos de rugosidade, criando uma morfologia superficial única e complexa. Prédios altos individuais geralmente erguem-se acima dos prédios centrais, enquanto que nos subúrbios, é mais comum a altura e a densidade de elementos de rugosidades mais homogêneas.

A ideia subjacente ao modelo de cobertura urbana é representar os elementos de rugosidade dentro da área urbana como um meio poroso que é permeável para o fluxo de ar. O foco está no vento representativo de uma área espacial, onde o objetivo é calcular a velocidade do vento com média espacial. Agora, cada elemento de rugosidade exerce uma força resistiva, ou arrasto, no fluxo de ar local, cujo efeito no vento medido espacialmente é representado aqui como uma força média representativa da cobertura urbana.

Originalmente desenvolvido para superfícies vegetadas, o método Raupach (1991, 1994) (Equações (A.1) a (A.4)) fornece resultados razoáveis em ambientes urbanos. As equações para o cálculo de z_0 e d são função de: velocidade do vento à cota da cobertura U_h - e que não está normalmente disponível; o termo de correção da subcamada de rugosidade ψ_{RSL} , responsável pela correção do perfil logarítmico do vento com valor de 0,193; a constante de Von Karman $\kappa = 0,41$; o coeficiente de arrasto da superfície do solo entre os obstáculos C_S , ou seja, da superfície do substrato na ausência de elementos de rugosidade, com valor de $C_S = 0,003$; e o coeficiente de arrasto de obstáculo isolado C_{dh} (calculado através da Equação (A.8)). Estritamente falando, o modelo de Raupach é válido para baixas densidades ($0,1 < \lambda_f < 0,2$), sendo assim um método não muito apropriado para o cálculo dos parâmetros aerodinâmicos.

Na realidade u_*/U_h estabiliza e atinge um máximo em $\lambda_f = \lambda_{f,pico}$ e para valores ainda maiores ($\lambda_f > \lambda_{f,crit}$; $\lambda_{f,crit} \approx 2 \times \lambda_{f,pico}$) o modelo original ainda não tem solução matemática. Estas foram as razões para maximizar o valor de u_*/U_h de modo a que a sua equação possa ser usada para todas as densidades. Assim Raupach limitou λ_f de modo a não poder ir além de $\lambda_{f,pico}$. No entanto, isso sobrestima u_*/U_h para todos $\lambda_f > 0,25 \times \lambda_{f,pico}$. Em vez disso u_*/U_h deve ser limitado ao valor máximo do modelo de referência, passando a ter a na sua equação $\lambda'_f = \lambda_{f,max} \approx 0,5 \times \lambda_{f,pico} \approx 0,25 \times \lambda_{f,crit}$. As constantes relacionadas com o modelo Wakelength são $e = 2,7182$ e $c = 0,7$.

O método Bottema, desenvolvido especificamente para áreas urbanas, defende que todo o arrasto experimentado pelo fluxo seja devido a elementos de rugosidade. Bottema (1995b), aqui designado como Bottema I (Equações (A.5)e (A.6)), apresenta um método simplificado e explicitamente destinado ao uso em áreas urbanas para situações em que o fluxo não é perpendicular aos edifícios e requer

informação sobre altura e área de elementos de rugosidade. Numa abordagem mais complexa, Bottema (1995c, 1997) denominada como Bottema II (Equações (A.7) a (A.17)) apresenta, para um ambiente urbano expressões que incorporam medidas extra dos elementos, Figura 3.2: L_x e L_y que corresponde ao comprimento e largura do elemento de rugosidade, W_x e W_y que corresponde ao comprimento e largura do espaçamento entre elementos de rugosidade e D_x e D_y que é a soma de L e W , correspondente ao comprimento e largura da matriz (de notar que estas referências são em relação à direção do vento). Também é apresentada uma altura de deslocamento (no plano abrigado) calculada com base na densidade e no padrão do arranjo do edifício (alinhado ou desfasado) Z_{dpl} , o coeficiente de arrasto de obstáculo isolado C_{dh} . Bottema recomenda o uso das equações para arranjos desfasados de construção quando o fluxo é oblíquo aos elementos de rugosidade.

O método Macdonald et al. (1998) (Equações (A.18) e (A.19)) apresentam uma outra abordagem que parte de princípios fundamentais e algumas suposições simples – a interferência das esteiras com os obstáculos é negligenciável e o perfil de velocidade que chega a cada obstáculo é logarítmico. Em termos de solução não-linear mais exata, inclui a altura de deslocamento que embora o seu comportamento seja relativamente simples, é difícil de determinar com precisão a partir de experiências. O coeficiente de arrasto dos obstáculos C_D é independente da densidade superficial, obtendo-se assim resultados satisfatórios para um valor de $C_D = 1,2$. A constante empírica obtida a partir da avaliação de dados do túnel do vento α , controla o aumento de d/h_r com λ_p tendo um valor de $\alpha = 4,43$ para matrizes desfasadas (valor mais apropriado para as áreas urbanas).

Hanna & Britter (2001) (Equações (A.20) a (A.23)) assumiram um valor de $z_0/h_r = 0,15$ como um limite do agrupamento de obstáculos próximos, onde as fórmulas apresentadas são baseadas em λ_f , uma vez que se acredita que o parâmetro é o melhor indicador de z_0 e d , porque o efeito de obstáculo está mais relacionado com a área frontal do que a área em planta. No entanto, como λ_f pode exceder o valor de 1,0 para obstáculos muito compactos, que são muito mais altos que largos, restringiram λ_f a ser menor ou igual a esse valor.

Coceal (2003) (Equações (A.24) a (A.27)) apresenta um modelo de cobertura urbana que também é utilizado para investigar o ajuste em coberturas não homogêneas. É acrescentado então um parâmetro que caracteriza o comprimento do arrasto da cobertura L_c e $\log(z_0/h_r)$ que depende dos parâmetros da cobertura.

O modelo Millward-Hopkins et al. (2011) (Equações (A.28) a (A.32)) já incorpora a variabilidade da altura dos elementos de rugosidade, descrevendo o arrasto viscoso associado à área frontal não protegida dos elementos A_f^* (com o parâmetro adimensional da densidade da área frontal não protegida dos elementos λ_f^*), ilustrada na Figura 3.3, que é assumida para exceder pressão sobre fluxo e, claramente diminui à medida que a densidade da superfície aumenta.

O “volume protegido efetivo” destina-se a incluir as regiões de fluxo separadas no tardo e nas laterais do edifício. Na realidade, os padrões de fluxo em torno de edifícios isolados são altamente complexos e tornam-se ainda mais quando um edifício é colocado dentro de uma matriz. Para matrizes uniformes, é então simples estimar o abrigo de um único elemento de superfície e, assim, obter uma estimativa de A_f^* , Figura 3.3. Recorde-se que os elementos de superfície considerados são blocos de arestas afiadas, quadrados, normais ao fluxo, que são geralmente usados em situações de túneis de vento de áreas urbanas idealizadas.

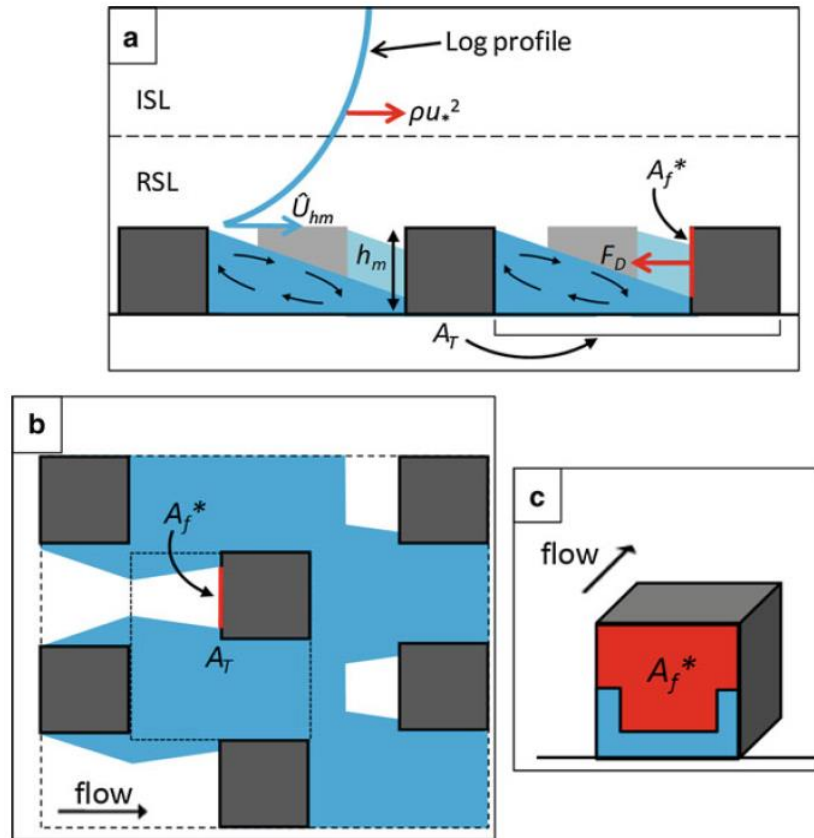


Figura 3.3 – Ilustração do cálculo do equilíbrio de arrasto para matrizes uniformes e o abrigo mútuo dos edifícios circundantes. As áreas azuis indicam, aproximadamente, a região abrigada total devido ao abrigo combinado de todos os edifícios e as áreas vermelhas indicam a área frontal desprotegida de um único edifício na matriz, A_f^* . **a)** vista lateral; **b)** vista de cima para baixo; **c)** um único edifício da matriz. Nota: RSL é a subcamada de rugosidade e ISL é a subcamada inercial (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011)

Através da Figura 3.4 podemos observar o volume idealizado usado para descrever a zona protegida devido a esse padrão de fluxo, onde há dois parâmetros que governam a sua forma, ou seja, o comprimento de recolamento de tardo L_R e a extensão da zona protegida L_W . Onde L_R é o parâmetro mais importante, para o qual existem relações estabelecidas para o descrever em função da altura, largura e profundidade do edifício (h , b e l , respetivamente).

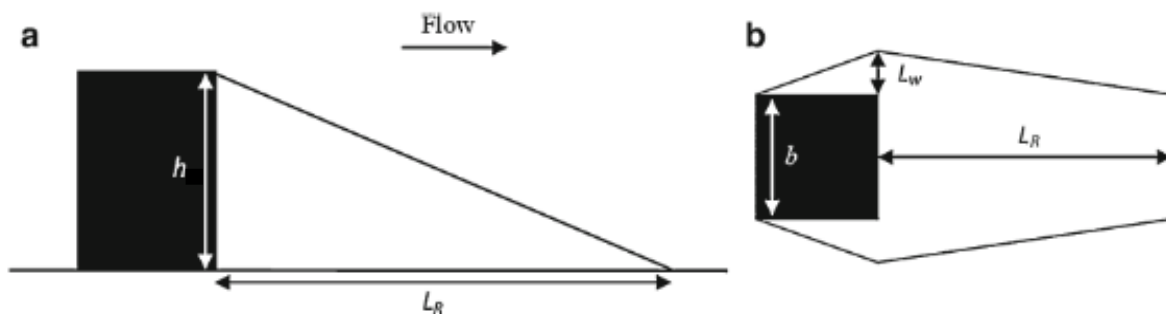


Figura 3.4 – Formas e dimensões dos “volumes protegidos eficazes” idealizados em torno de elementos isolados de rugosidade: **a)** de lado e **b)** de cima (Millward-Hopkins, Tomlin, Ma, Ingham, & Pourkashanian, 2011)

No entanto, o foco principal aqui é de quantificar a influência da heterogeneidade da altura nos parâmetros aerodinâmicos. O segundo parâmetro que rege a forma do volume do abrigo idealizado é o L_W , que descreve a extensão lateral da zona protegida. Tal como L_R , este parâmetro pode ser relacionado com as dimensões do edifício, no entanto, não tem um critério tão claro como o do L_R , e não existe uma relação padrão para o calcular. As limitações decorrentes do desenvolvimento das equações do d foram obtidas pelos métodos tradicionais de melhor ajuste. Para baixas densidades, a concordância entre os dados experimentais de 20% abaixo das previsões do modelo atual.

Quando a heterogeneidade da altura dos elementos de rugosidade é introduzida, os resultados dos métodos são idênticos ao caso homogêneo, porque h_r é o único atributo de altura utilizado. Os métodos morfométricos explicados aqui não têm em conta a variação nas alturas dos elementos de rugosidade, fazendo com que em alguns casos, a altura de deslocamento seja superior à altura média dos mesmos. Apenas o método de Millward-Hopkins tem em conta a variação de altura dos edifícios, mas os valores não se aproximam muito da realidade. Assim sendo, é necessário encontrar uma maneira de se calcularem os parâmetros aerodinâmicos de forma a ter em conta essa variação de alturas.

3.3.2. Os modelos morfométricos apropriados para o cálculo de z_0 e d

Com o passar dos anos e com a evolução na informação sobre métodos morfométricos e parâmetros aerodinâmicos, através da parametrização aerodinâmica convencional para superfícies urbanas, chegou-se a uma conclusão dos métodos mais apropriados para o cálculo de z_0 e d , de modo a que os valores sejam concordantes com a realidade. As parametrizações foram derivadas principalmente de experiências, onde se assumiram matrizes relativamente simples de edifícios de altura uniforme e os parâmetros geométricos relevantes utilizados (λ_p , λ_f e h_r) foram mínimos, o que não acontece nas superfícies urbanas reais, que estão longe de terem configurações tão simples. Mesmo matrizes simples de edifícios, com alturas variáveis, podem fornecer um arrasto muito maior do que aqueles com altura homogênea, como mostram experiências em túneis de vento, experiências ao ar livre e simulações numéricas.

A altura de deslocamento de superfícies urbanas com altura variável, pode atingir valores maiores que a altura média dos edifícios, sugerindo assim, que a simples extensão de modelos convencionais é inadequada e que outros parâmetros geométricos relevantes devem ser incluídos nas parametrizações. Primeiro, Kanda et al. (2013) resolveu testar o desempenho das equações de Macdonald (1998) no atual banco de dados urbanos real e examinar se uma simples extensão das fórmulas clássicas seria possível. De acordo com Macdonald et al. (1998), as expressões correspondem às Equações (A.18) e (A.19) que com os devidos valores correspondentes às constantes, tem-se que:

$$d = h_r \times [1 + 4,43^{-\lambda_p} \times (\lambda_p - 1)] \quad (3.1)$$

$$z_{0(mac)} = h_r \times \left(1 - \frac{d}{h_r}\right) \times \exp \left[- \left\{ 3,75 \times \left(1 - \frac{d}{h_r}\right) \times \lambda_f \right\}^{-0,5} \right] \quad (3.2)$$

Embora vários parâmetros morfométricos tenham sido estudados e examinados, os cinco parâmetros que se seguem foram considerados os mais relevantes para as novas parametrizações: a altura média de construção h_r , a altura máxima dos edifícios h_{max} , o desvio padrão das alturas dos edifícios σ_h , o índice de área em planta ou densidade da área em planta dos obstáculos λ_p e o índice de área frontal ou densidade da área frontal dos obstáculos λ_f .

Para além desses parâmetros serem teoricamente independentes, foram encontradas correlações significativas entre eles. Desenvolve-se então o método Kanda (2013), que incorpora diretamente a variabilidade da altura dos elementos de rugosidade. Considerando áreas com valores de $\lambda_p < 0,2$, podem ser todas classificadas como uso “não urbano” nas simulações de mesoescala convencionais. Os valores de λ_f podem ser aproximados empiricamente por uma função quadrática de λ_p até ao valor de $\lambda_p = 0,45$:

$$\lambda_f = 1,42 \times \lambda_p^2 + 0,4 \times \lambda_p \quad (0,45 > \lambda_p > 0,05) \quad (3.3)$$

Através da equação acima, podemos observar que λ_f é sempre $< 2\lambda_p$, sendo o seu limite superior de $\lambda_p = 0,45$ (valor resultante de regulamentos de construção). A estreita correlação de σ_h com h_r é dada por:

$$\sigma_h = 1,05 \times h_r - 3,7 \quad (3.4)$$

Para o limite zero de σ_h temos um valor de aproximadamente 3,5 para h_r , que não é nada mais que o correspondente à altura de uma casa de um andar. Embora a h_{max} possa ser correlacionado com σ_h como:

$$h_{max} = 12,51 \times \sigma_h^{0,77} \quad (3.5)$$

Os relacionamentos expressos nas Equações (3.3) a (3.5) são relações empíricas aplicáveis em cidades japonesas com regulamentos e planeamento de construção semelhantes (Kanda, Inagaki, Miyamoto, Gryscha, & Raasch, 2013). Das cinco variáveis geométricas para outras cidades do mundo, apenas λ_p pode ser facilmente concebido a partir de mapas gerais da cidade, enquanto que as restantes são mais difíceis de adquirir devido à exigência de informações de altura. Quando o conjunto completo de cinco variáveis não está disponível para uma cidade, formulações empíricas podem ser usadas como uma primeira tentativa.

Surge então a ideia de ser feita uma nova parametrização da altura do deslocamento para superfícies urbanas reais:

$$d = h_{max} \times [c_0 \times X^2 + (a_0 \times \lambda_p^{b_0} - c_0) \times X]$$

onde a_0 , b_0 e c_0 são parâmetros constantes regredidos, com valores de 1,29, 0,36 e $-0,17$, respetivamente, sendo:

$$d = h_{max} \times [-0,17 \times X^2 + (1,29 \times \lambda_p^{0,36} + 0,17) \times X] \quad (3.6)$$

e:

$$X = \frac{\sigma_h + h_r}{h_{max}} \quad 0 \leq X \leq 1,0 \quad (3.7)$$

O método de Kanda argumenta que o limite superior de d é h_{max} , uma escala de comprimento apropriada para a normalização de d , sendo assim um parâmetro de escala adequado que h_r . O parâmetro chave X (altura representativa do edifício acima da altura média do mesmo, em relação à altura máxima do edifício) foi encontrado tanto física quanto empiricamente, composto por três variáveis geométricas, apresentado um bom desempenho nos resultados obtidos. Quando este parâmetro toma o valor máximo, significa que o conjunto de edifícios tem uma altura homogénea, o mesmo não se verifica quando toma o seu valor mínimo, pois indica a existência de um edifício mais alto, sendo considerado como uma torre isolada excepcionalmente alta em comparação aos edifícios em seu redor e tem um valor insignificante na secção transversal.

Tal como para a altura de deslocamento, uma nova parametrização desta vez para o comprimento equivalente de rugosidade foi feita para superfícies urbanas reais na fora de uma equação de Macdonald modificada:

$$z_0 = z_{0(mac)} \times (b_1 \times Y^2 + c_1 \times Y + a_1)$$

onde as constantes a_1 , b_1 e c_1 tomam valores de 0,71, 20,21 e $-0,77$ respetivamente, sendo:

$$z_0 = z_{0(mac)} \times (20,21 \times Y^2 - 0,77 \times Y + 0,71) \quad (3.8)$$

e:

$$Y = \frac{\lambda_p \times \sigma_h}{h_r} \quad 0 \leq Y \quad (3.9)$$

$z_{0(mac)}$ é o comprimento equivalente de rugosidade obtido das Equações (3.1) e (3.2). Para este caso z_0 é sempre menor que h_r , portanto h_r pode ser considerado o comprimento de escala apropriado para a rugosidade, ao contrário da parametrização de d que é determinada apenas a partir do perfil de fluxo de momento. Assumindo o valor de 0, o parâmetro Y fornece o comprimento de rugosidade para matrizes simples de cubos, ou seja, matrizes homogéneas. De notar que esta nova parametrização do comprimento de rugosidade, Equação (3.9) é independente da altura de deslocamento (Equação (3.6)).

Essa inconsistência na formulação é atribuída à sua derivação empírica. A equação original de Macdonald (Equação (3.2)) tem um fundo teórico e inclui a altura de deslocamento (Equação (3.1)).

Embora as propriedades de fluxo em massa de matrizes simples de edifícios e cidades reais sejam muito diferentes, as novas parametrizações aerodinâmicas propostas de z_0 e d usando combinações de apenas cinco parâmetros geométricos (h_r , h_{max} , σ_h , λ_f e λ_p) funcionaram bastante bem para morfologias urbanas reais, bem como para geometrias de modelos simplificados convencionais. Os parâmetros de rugosidade z_0 e d normalizados pela altura média do edifício para superfícies urbanas reais podem ser várias vezes maiores do que os previstos pelas equações convencionais de Macdonald, e as novas parametrizações foram amplamente melhoradas para reproduzir esses grandes parâmetros de rugosidade.

Chega-se então à conclusão que para valores de $\lambda_p > 0,45$, o método de Kanda (Equações (3.3) a (3.9)) subestima d para matrizes homogêneas, sendo assim aplicado apenas para de $\lambda_p < 0,45$ e para valores de $\lambda_p > 0,45$ o método a ser usado é o de Macdonald (Equações (3.1) e (3.2)). Isso economiza tempo e também garante valores mais adequados dos parâmetros aerodinâmicos e das dimensões da área de origem, uma vez que não é necessário efetuar muitos cálculos e recorrer a vários métodos para se chegar aos valores mais próximos possíveis da realidade de z_0 e d .

Capítulo 4 – Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia do desenvolvimento do modelo criado, contendo todas as etapas e considerações a ter em conta assim como a utilização do software. Devido à complexidade dos fenómenos envolvidos na simulação do escoamento atmosférico real, o desenvolvimento do modelo final foi dividido em três etapas. Inicialmente foi necessário fazer uma pesquisa e interpretação da cartografia temática existente para Portugal continental, onde foi escolhida a COS 2010 por ser a mais adequada ao caso de estudo, ter mais informações sobre o solo e ser mais fácil de se adaptar e trabalhar no software utilizado. De seguida escolheram-se os locais de estudo, que têm de ser as mais distintas possíveis de forma a verificar a evolução do perfil do vento com a variação da rugosidade, onde os mapas cartográficos dessas zonas foram devidamente tratados de forma a obter uma interpretação aerodinâmica mais adequada. E por último, calculam-se os parâmetros aerodinâmicos z_0 e d , criando assim o mapa de rugosidade aerodinâmica com capacidade de se calcular a velocidade do vento em qualquer ponto e altura do solo.

4.1. Pesquisa e interpretação da cartografia

A informação presente nas Cartas de Ocupação e uso do Solo (COS) é a mais adequada para o principal objetivo da presente dissertação, sendo uma carta temática com grande detalhe de ocupação/uso do solo no território de Portugal continental e com a utilização do sistema de referência ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), o que facilita a georreferenciação e manuseamento de toda a informação para a criação do mapa do vento através do software ArcGis. Através da página da Direção-Geral do Território (Direção-Geral do Território, 2019), é possível fazer a recolha de todas as COS para Portugal continental, relativamente ao ano de 2010, onde são apresentadas estatísticas de ocupação e uso do solo para quatro escalas espaciais, ou seja, continental, regional, sub-regional e municipal. Para este trabalho, a informação necessária disponível é por região NUT III (Nomenclatura das Unidades Territoriais), que corresponde ao território das entidades intermunicipais, ou seja, sub-regional, áreas essas representadas na Figura 4.1 (NUTS de Portugal, 2019).

A análise visual de imagens SIG consiste na identificação das áreas com a mesma classe de ocupação do solo e na sua delimitação com vista ao seu agrupamento em áreas maiores sendo uma fase importante de tratamento da cartografia do uso do solo recolhida.

As COS têm uma informação demasiado detalhada para a delimitação de áreas onde a rugosidade aerodinâmica se possa considerar como tendo um valor uniforme equivalente, como por exemplo, são definidas cerca de 12 categorias de pomares, que do ponto de vista aerodinâmico, podem reduzir-se apenas a uma única categoria. No total, como já foi referido anteriormente na secção 3.1, existem cerca de 225 classes, para um conjunto simplificado de nove grupos de classes, sendo assim necessário reagrupar todas as classes de acordo com as suas características de rugosidade aerodinâmica. Assim sendo, após a análise de toda a informação apresentada, criaram-se oito denominadas megaclasses aerodinâmicas (Tabela A.2, em anexo): Tecido urbano; Tecido suburbano; Agricultura; Espaços descobertos; Matos; Árvores de pequeno porte; Árvores de grande porte e Corpos de água.



Figura 4.1 – Mapa do nível NUT III para Portugal continental (NUTS de Portugal, 2019)

Recorrendo ao Software ArcMap, foi necessário criar mapas de ocupação e uso do solo, apenas com as oito megaclasses aerodinâmicas, começando por criar uma camada (*layer*) para cada uma delas, colocando em cada uma as descrições correspondentes. Após a criação das oito camadas é necessário colocar na tabela de atributo de cada uma delas o respetivo nome da megaclasses, de forma a que seja possível unir as camadas e criar assim uma COS, onde seja possível distinguir as megaclasses segundo a sua classificação.

4.2. Escolha e tratamento das zonas de estudo

Uma vez que é apenas necessário criar um modelo que se adapte a qualquer COS, não é adequado, no âmbito desta dissertação, fazer o estudo para Portugal Continental inteiro, escolhendo-se inicialmente a Área Metropolitana da Lisboa, AML, cujo mapa é representado na Figura 4.2, com as 225 classes de

COS. A escolha desta grande área deve-se ao facto de ser relativamente grande, onde se verifica uma grande discrepância nas várias áreas de rugosidade, o que acaba por ser uma zona interessante para estudo e desenvolvimento do modelo.

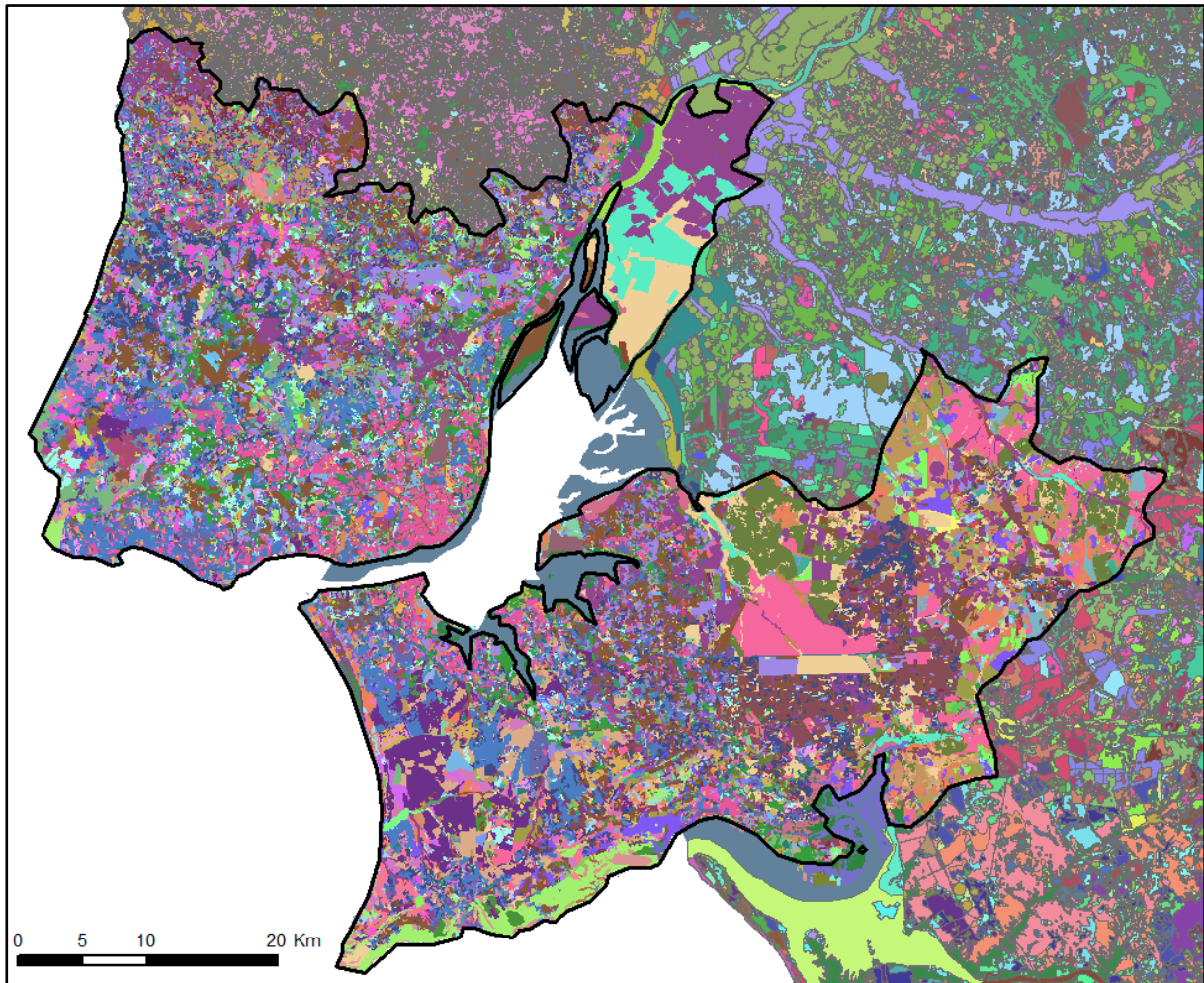


Figura 4.2 – Mapa de ocupação e uso do solo para a Área Metropolitana de Lisboa, com as 225 classes originais.

O passo seguinte consistiu na conversão do mapa da Figura 4.2 num equivalente com as classes agrupadas nas oito megaclasses aerodinâmicas, Figura 4.3, e dentro dessa área escolher duas zonas distintas como demonstrativas da metodologia proposta, opção tomada por ser a AML uma área extensa. Essas zonas abrangem os concelhos de Lisboa, maioritariamente urbano, e de Alcochete, essencialmente agrícola, com alguns apontamentos de floresta e tecido urbano/suburbano, portanto distintos no que toca às rugosidades aerodinâmicas.

Após a escolha das zonas, é necessário fazer-se uma nova interpretação dos mapas e condensar áreas sem significado do ponto de vista aerodinâmico. Uma vez que o agrupamento em áreas de maior dimensão, com uma rugosidade equivalente, se prende com o facto de o escoamento necessitar de um comprimento significativo (da ordem de grandeza de 2 km) de percurso para que se possa adaptar às novas condições de rugosidade. Ou, de outro modo, pequenas manchas de rugosidade diferente são efeitos locais e não condicionam as características globais do escoamento.

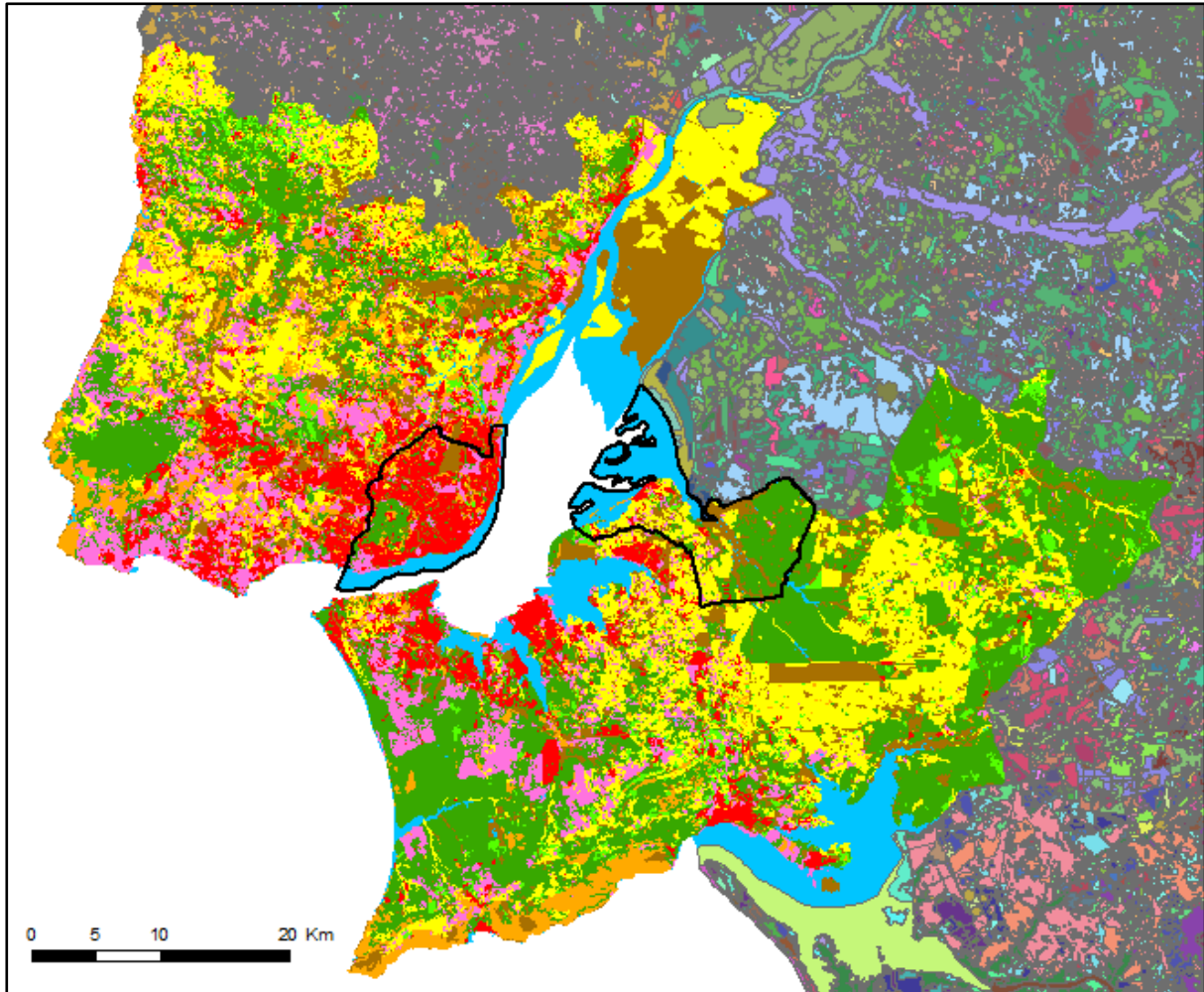


Figura 4.3 – Mapa de ocupação e uso do solo com as oito megaclasses aerodinâmicas para a Área Metropolitana de Lisboa. As delimitações a preto são as áreas de estudo, o concelho de Lisboa à esquerda e o concelho de Alcochete à direita. Amarelo – Agricultura; Laranja – Mato; Azul – Corpos de água; Castanho – Espaços descobertos; Cor-de-rosa – Tecido suburbano; Vermelho – Tecido urbano; Verde claro – Árvores de pequeno porte; Verde escuro – Árvores de grande porte.

É importante referir que é necessário sempre gerar novas colunas onde colocar todas as informações finais necessárias, tais como o nome da megaclasses aerodinâmica a que pertence cada área criada no mapa. De seguida passamos aos cálculos dos parâmetros aerodinâmicos, tendo sempre em conta que pode haver zonas cujos cálculos não são necessários, uma vez que existem valores tabelados.

Capítulo 5 – Resultados e discussão

Como podemos ver através do mapa da Figura 4.3, o concelho de Lisboa foi uma das zonas escolhidas devido a ser maioritariamente urbano e ideal para verificar-se a evolução do perfil de velocidade do vento com a variação da densidade de elementos de rugosidade. Já o concelho de Alcochete foi escolhido por ser uma zona perto do rio, interessante para perceber o comportamento do vento vindo de Noroeste e Oeste, uma vez que tem de “passar” por zonas com elevada rugosidade aerodinâmica (cidades) e pelo rio. A zona de Alcochete acaba por se distinguir de Lisboa, por ter áreas urbanas/suburbanas mais pequenas, dispersas e com edifícios relativamente mais baixos, sendo uma zona maioritariamente agrícola e florestal.

Uma vez escolhidas as zonas de estudo, é necessário fazer uma nova interpretação dos mapas e ter em conta vários pontos para além do tipo de rugosidade aerodinâmica, tais como área de um dado tipo de rugosidade ser suficientemente grande para que haja alguma influência no perfil do vento, ou seja, ver se existem áreas a serem englobadas (considerando-as como sendo igual à sua envolvente) e por último verificar se existe alguma informação ou estudo efetuado disponível para essas zonas com algumas informações sobre rugosidade e/ou parâmetros aerodinâmicos.

5.1. Concelho de Lisboa

A Figura 5.1 a) representa a COS original do concelho de Lisboa e a Figura 5.1 b) o mapa de distribuição das megaclasses aerodinâmicas.

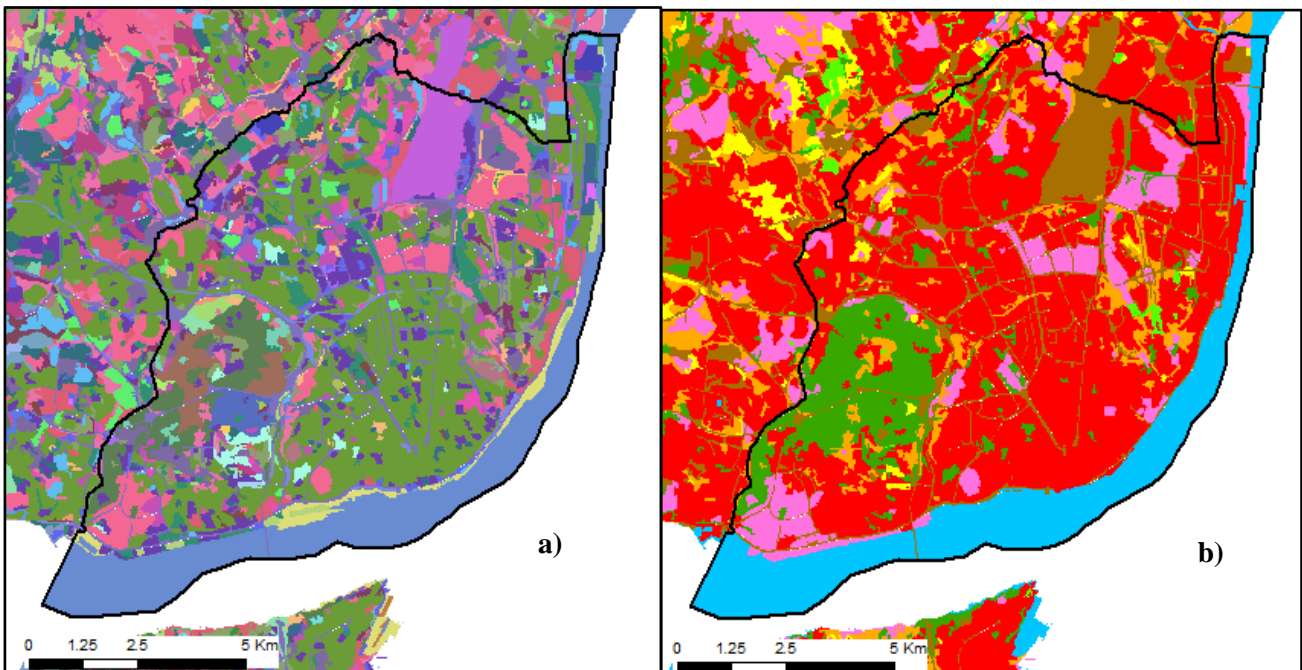


Figura 5.1 – Mapa de ocupação e uso do solo para o concelho de Lisboa: **a)** mapa inicial (ainda das 225 classes); **b)** mapa com as oito megaclasses aerodinâmicas [Nota: para a interpretação do mapa b) as descrições das cores é igual à da Figura 4.3]

Como se pode verificar, o mapa de rugosidade é demasiado detalhado (muitas áreas de dimensão reduzida para o desenvolvimento do escoamento), sendo preciso criar áreas de maiores dimensões com uma rugosidade equivalente.

Para o concelho de Lisboa o site (Lisboa: Mapas Climáticos para o Ordenamento, 2019), com origem no estudo “Mapas Climáticos para o Ordenamento” (Alcoforado, Lopes, Andrade, & Vasconcelos, 2005), dispõe de um mapa com valores dos comprimentos equivalentes de rugosidade (Figura 5.2), sendo possível a sua utilização no *software*, de forma a cruzar essa informação com a do mapa COS de Lisboa resultante do agrupamento das megaclasses aerodinâmicas (Figura 5.1 b)). No entanto, após análise do estudo verificou-se que o método morfométrico utilizado para o cálculo de z_0 (Lettau 1969, Equação (2.1)) é um método bastante antigo, sendo que o cálculo dos parâmetros aerodinâmicos pode ser realizado recorrendo a métodos mais recentes e concordantes com a realidade. Outro ponto a ter em conta neste estudo, é o facto de os valores equivalentes de rugosidade serem estipulados para áreas iguais ou inferiores a $10\,000\text{ m}^2$, o que pode vir a ser um ponto negativo, pois é uma área relativamente pequena do ponto de vista aerodinâmico.

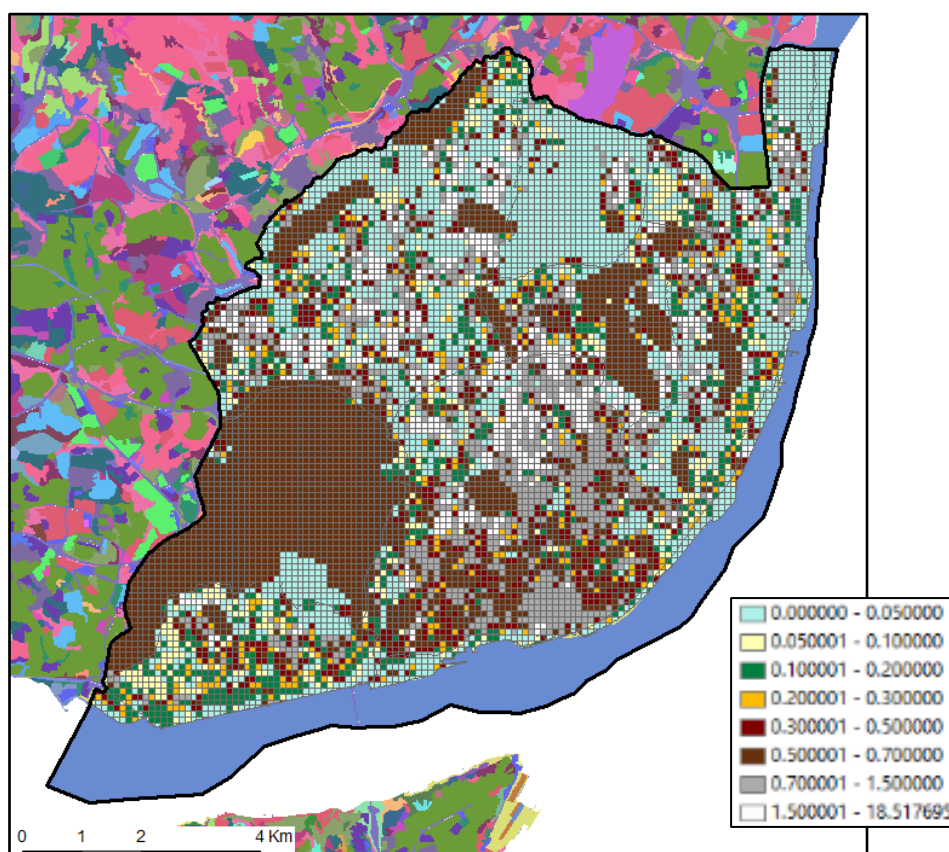


Figura 5.2 – Mapa de rugosidade (z_0) para o concelho de Lisboa originário do estudo “Mapas Climáticos para o Ordenamento” (Alcoforado, Lopes, Andrade, & Vasconcelos, 2005); (Correia, Lopes, & Marques, 2015) e (Lisboa: Mapas Climáticos para o Ordenamento, 2019)

O mapa da Figura 5.2 é referente a informações do ano 2005, enquanto que as COS utilizadas neste trabalho é referente a informações do ano 2010. Podendo aproveitar as informações dadas por ambos, e sobrepondo os dois mapas (Figura 5.1 b) e Figura 5.2), gera-se assim o mapa da Figura 5.3. Essa opção é a mais viável e prática devido ao facto de a informação dada pela COS não ser tão completa no que

toca à morfologia das áreas urbana/suburbanas e densidade de elementos presentes no concelho de Lisboa.

Assim, a Figura 5.2 dá-nos uma informação fulcral, onde é fácil ter uma noção sobre a diversidade da rugosidade na grande área urbana (que corresponde à parte a vermelho representada na Figura 5.1 b)), reforçando que a falta de dados nas COS é um ponto muito importante a ter em conta, que precisa ser melhorado essencialmente para grandes áreas urbanas.

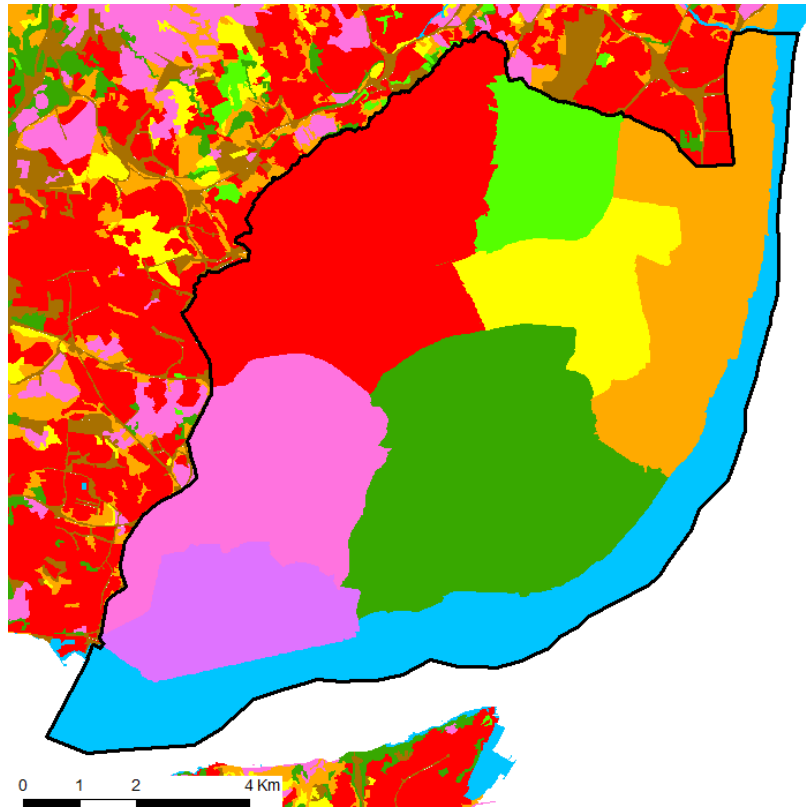


Figura 5.3 – Mapa de rugosidade aerodinâmica para o concelho de Lisboa após cruzamento de dados com o mapa da Figura 5.1 b) e Figura 5.2 (Zona 1 – vermelho, $z_{0,1} = 0,62 \text{ m}$; Zona 2 – laranja, $z_{0,2} = 0,44 \text{ m}$; Zona 3 – amarelo, $z_{0,3} = 0,72 \text{ m}$; Zona 4 – verde claro, $z_{0,4} = 0,17 \text{ m}$; Zona 5 – verde escuro, $z_{0,5} = 0,78 \text{ m}$; Zona 6 – azul, $z_{0,6} = 0,15 \text{ m}$; Zona 7 – roxo, $z_{0,7} = 0,30 \text{ m}$; Zona 8 – cor-de-rosa, $z_{0,8} = 0,63 \text{ m}$)

O mapa da Figura 5.3, foi elaborado através da interpretação dos mapas da Figura 5.1 b) e da Figura 5.2, assumindo como critério o intervalo de valores z_0 (representados na legenda de valores da Figura 5.2) predominante numa dada zona e do cruzamento de dados (tabelas de atributos) de ambos através de ferramentas do software utilizado. Apresenta as diferentes zonas de rugosidade aerodinâmica, sendo o Aeroporto de Lisboa e arredores representado pela zona 4, o Parque florestal de Monsanto pela zona 8 e a zona 6 é o rio Tejo, contendo um total de cinco áreas distintas de rugosidades urbanas. Os valores de z_0 foram calculados através dos dados do mapa da Figura 5.2, onde foi encontrado um valor médio para cada área representada na Figura 5.3.

Passando então à recolha dos dados morfométricos, com as informações obtidas por inspeção no *Google Earth* (dados correspondentes à atualidade), verificou-se que a diversidade da rugosidade urbana não é concordante com as áreas da Figura 5.3, criando-se assim um novo mapa, Figura 5.4, onde são apresentadas oito áreas com densidades diferentes para o escoamento urbano.

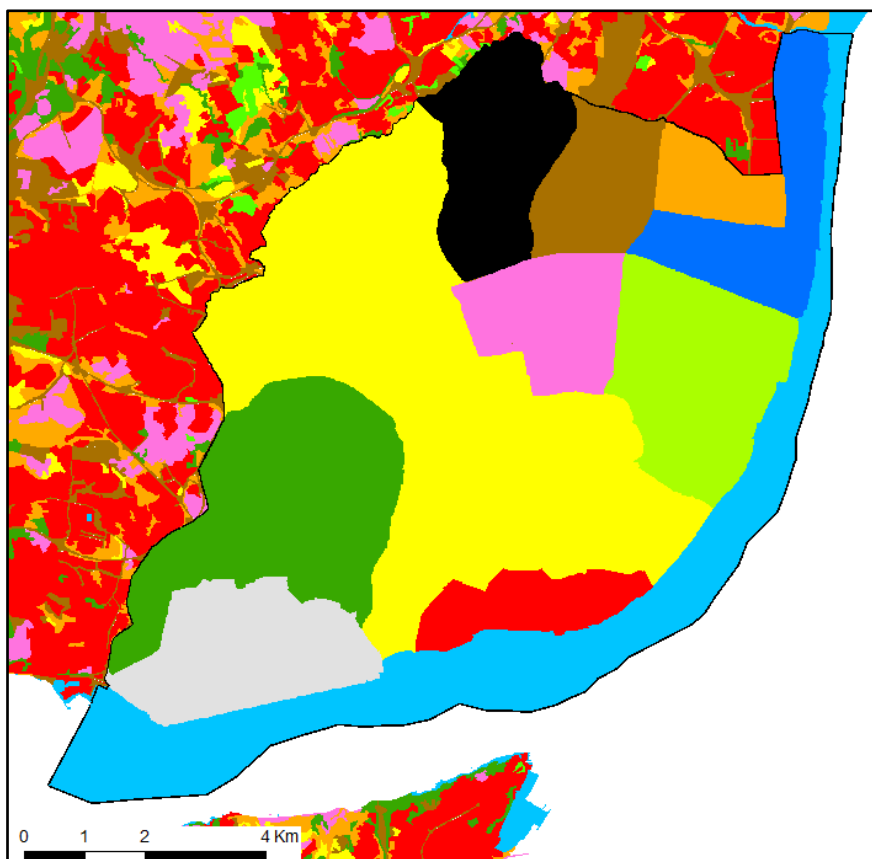


Figura 5.4 - Mapa final da rugosidade aerodinâmica equivalente para a concelho de Lisboa. Lx01 – cor-de-rosa; Lx02 – Amarelo; Lx03 – cinzento; Lx04 – Azul escuro; Lx05 – Laranja; Lx06 – Preto; Lx07 – Vermelho; Lx08 – Verde claro; Lx09 – Verde Escuro; Lx10 – Castanho; Lx11 – Azul claro

Para uma fácil identificação das áreas, foram atribuídos códigos e cores diferentes a cada uma delas, sendo referenciadas as zonas correspondentes a cada uma das áreas na Tabela 5.1. Nesta tabela são apresentados os valores dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d para todas as áreas da Figura 5.4 colocando os valores tabelados (Lx09 a Lx11) e os valores calculados para as áreas urbanas/suburbanas, não esquecendo que para $\lambda_p > 0,45$ o método a ser usado é o de Macdonald e para $\lambda_p < 0,45$ o método de Kanda.

Através da interpretação dos dados representados na Tabela 5.1 e dos gráficos da Figura 5.5, é possível verificar que a grande área urbana representada na Figura 5.1 b) nunca poderia ser representada apenas por um valor, uma vez que os dados para cada zona são diferentes e consequentemente os seus perfis de velocidade também o são.

Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d para as diversas zonas de rugosidade aerodinâmica descritas na Figura 5.4, para o concelho de Lisboa

Zona	z_0 (m)	d (m)	Descrição
Lx01	1,45	18,52	Alvalade e Areeiro
Lx02	1,21	14,99	Campo de Ourique, Estrela, Campolide, Penha de França, Arroios, Benfica, Lumiar, S. Bento, Amoreiras, C. Redondo, Colónias, Vale Escuro, Sapadores, Barbadinhos, Estefânea, Alameda, M. Deus e Calvanas

Lx03	0,66	13,34	Restelo e Ajuda
Lx04	1,47	30,06	Parque da Nações e Olivais Sul
Lx05	0,66	9,89	Encarnação e Olivais Norte
Lx06	4,38	27,80	Telheiras
Lx07	0,21	14,80	Lapa, S. Bento, Bairro Alto, Santos, Baixa
Lx08	0,20	3,00	Chelas
Lx09	1,60	5,00*	Parque Florestal de Monsanto
Lx10	0,03	0,00	Aeroporto Humberto Delgado
Lx11	0,0002	0,00	Rio Tejo

* admitindo que $d \approx 0,7h$ (h - altura média dos elementos de rugosidade)

De forma a perceber como todo o processo foi feito, é dado um exemplo do desenvolvimento do perfil vertical do vento na zona do Restelo e na zona da Ajuda, Figura 5.6.

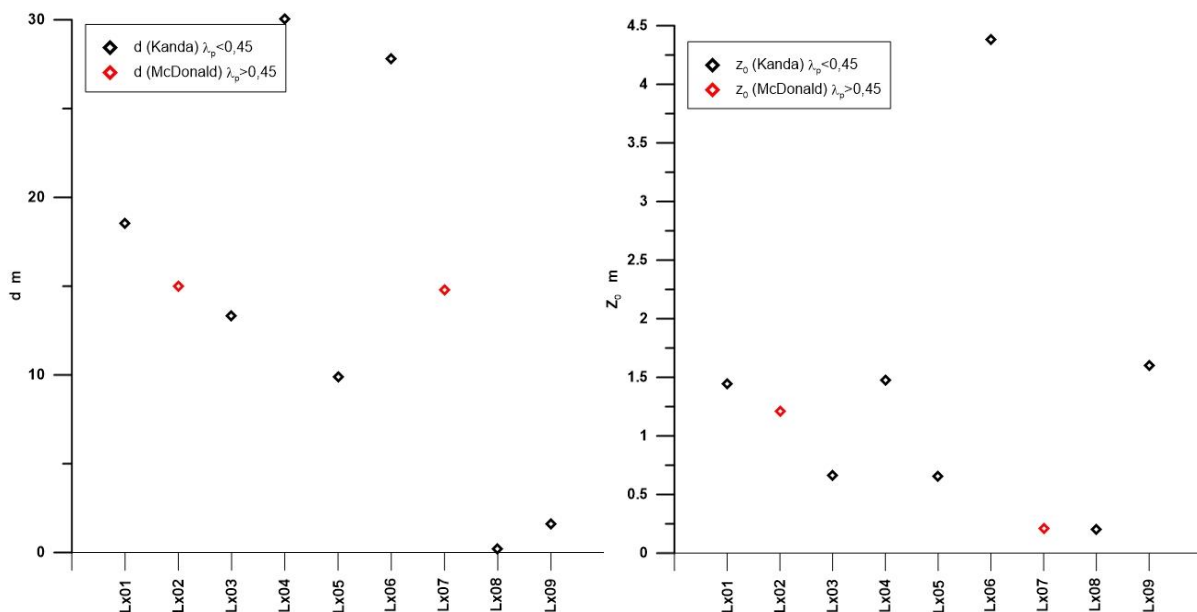


Figura 5.5 – Representação gráfica dos valores de d e z_0 para as diversas áreas de rugosidade aerodinâmica, onde os pontos a preto foram calculados através do método Kanda e a vermelho através do método Macdonald

Através da Figura 5.6, podemos verificar que apesar do perfil de distribuição dos elementos de rugosidade poderem ser um pouco diferente, para a zona do Restelo e da Ajuda, o perfil vertical do vento são praticamente iguais, diferenciando apenas no início do seu perfil. Sendo essa variação mínima e insignificante do ponto de vista aerodinâmico, é possível juntar-se numa só zona, sendo representadas apenas por um perfil de velocidade representado pelos parâmetros médios (perfil a vermelho na Figura 5.6). Tal como para este caso, também foi necessário efetuar o mesmo procedimento para outras zonas, criando assim um gráfico representativo de todos os perfis verticais do vento, para as áreas urbanas, Figura 5.7.

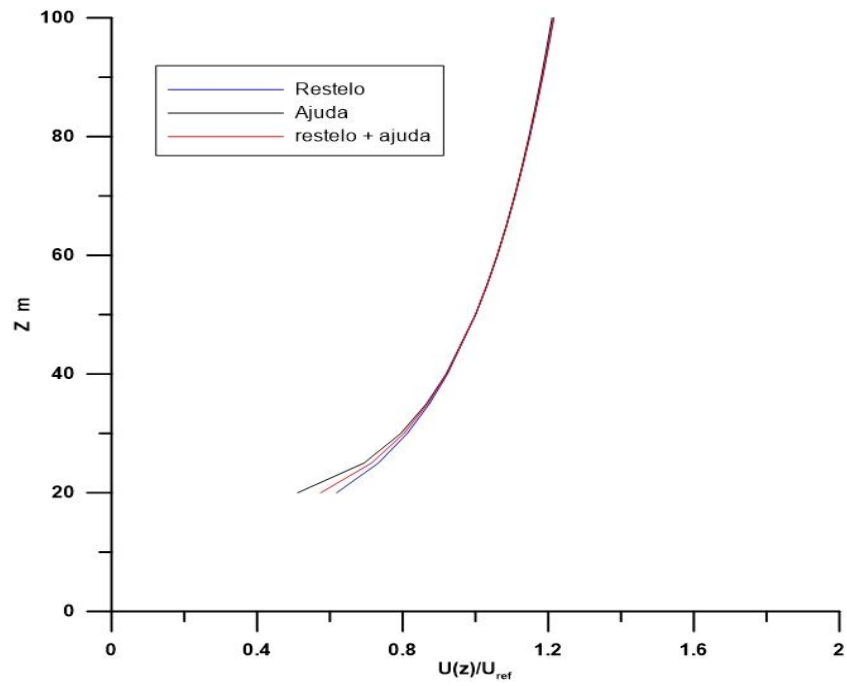


Figura 5.6 – Perfil de velocidade vertical para diferentes zonas do concelho de Lisboa

Para o cálculo dos perfis de velocidade vertical representados na Figura 5.7, foi assumido um valor de $u(50\text{ m}) = 10\text{ m/s}$, o que justifica o facto de todos os perfis se cruzarem em $z = 50\text{ m}$.

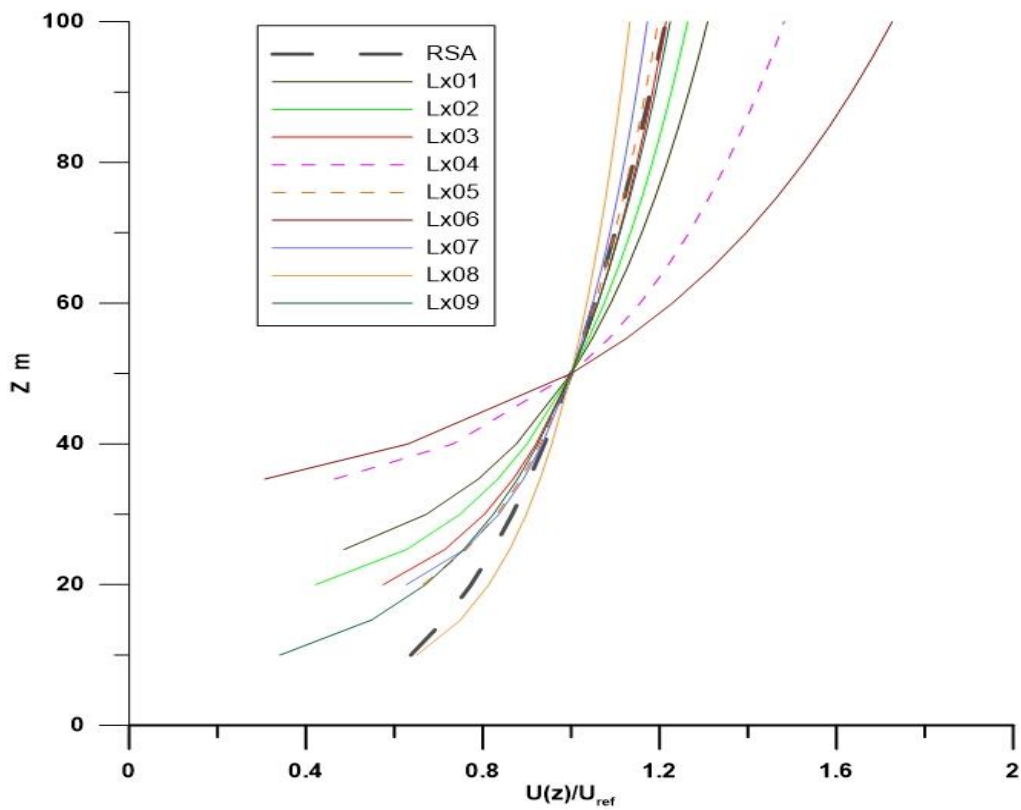


Figura 5.7 – Representação dos perfis de velocidade vertical para todas as áreas do concelho de Lisboa. RSA – Regulamento de Segurança e Ações, Dec-Lei 235/83.

5.2. Concelho de Alcochete

Passando agora para a segunda zona de estudo, temos o concelho de Alcochete cujas distribuições (COS original) e megaclasses aerodinâmicas se representam na Figura 5.8.

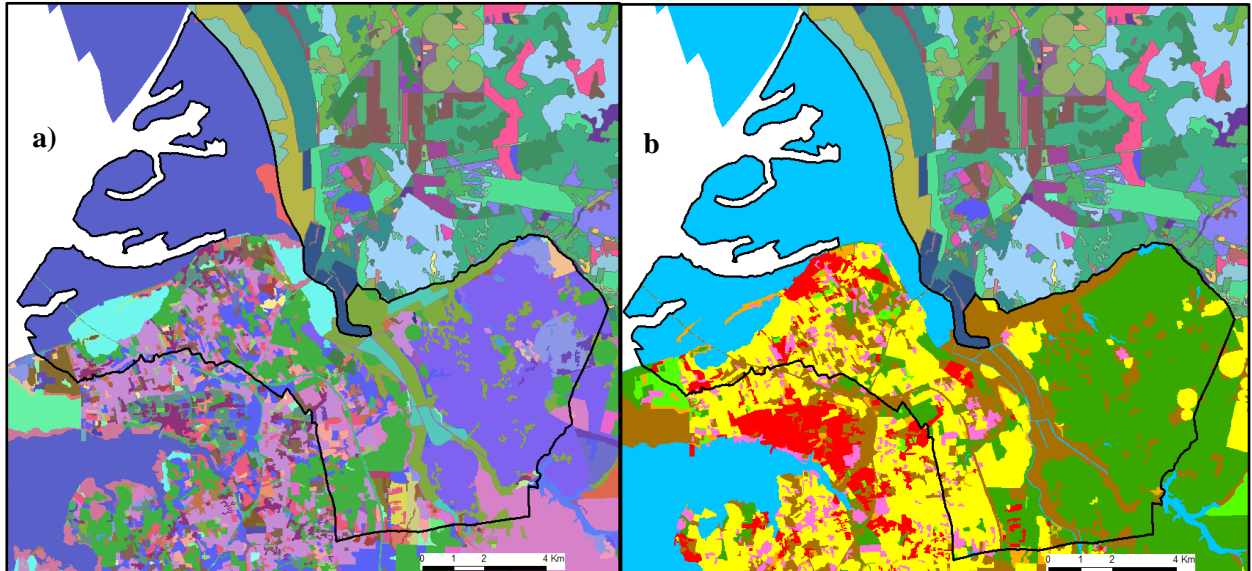


Figura 5.8 – Mapa de ocupação e uso do solo para o concelho de Alcochete: **a)** mapa inicial (ainda das 225 classes); **b)** mapa com as oito megaclasses aerodinâmicas [Nota: para a interpretação do mapa b) as descrições das cores é igual à da Figura 4.3]

Para o concelho de Alcochete não existe nenhum estudo, recorrendo apenas à interpretação da COS das megaclasses aerodinâmicas, Figura 5.8 b) com o apoio da *Google Earth* para a recolha de dados, não esquecendo que é necessário averiguar se existem áreas de uma dada classe de rugosidade que possam ser englobadas, classificando-as como sendo iguais à sua envolvente, resultando no mapa da Figura 5.9.

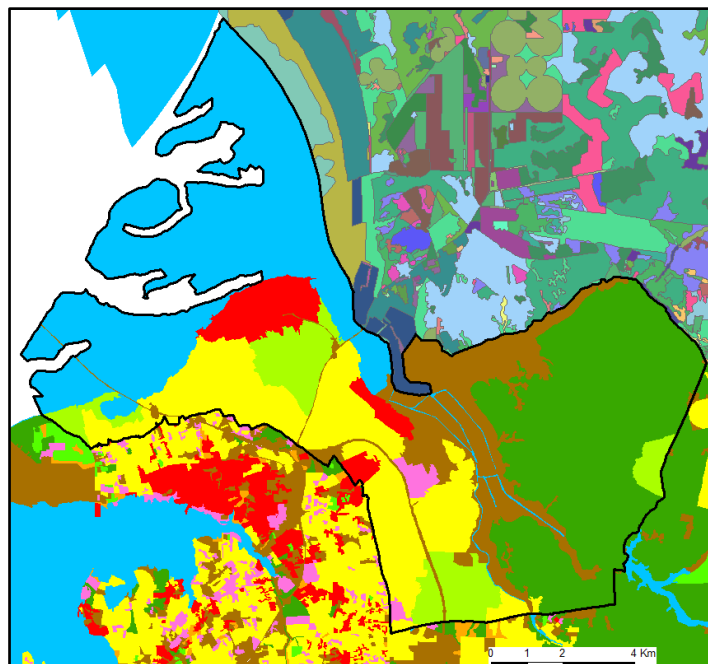


Figura 5.9 – Mapa de rugosidade aerodinâmica para o concelho de Alcochete [Nota: para a interpretação do mapa, as descrições das cores é igual à da Figura 4.3 b)]

À semelhança do que foi feito para o concelho de Lisboa, com o apoio do *Google Earth* foi estudado o terreno do concelho de Alcochete comparando também com a distribuição das áreas apresentadas acima. Verificou-se que a rugosidade aerodinâmica no local é bastante reduzida e idêntica, não influenciando muito o escoamento atmosférico no concelho podendo concluir-se que a área representativa da Agricultura, dos Espaços descobertos e das Árvores de pequeno porte podem ser classificadas como uma só, caracterizada por um perfil médio, sendo apenas o perfil do vento referente às Árvores de grande porte diferente e justificável de se distinguir dos restantes. Para além da rugosidade reduzida, existem zonas da Figura 5.9 com áreas bastante pequenas e que apesar de terem características de rugosidade diferentes, não influenciam o perfil de velocidade ao longo do escoamento, fazendo com que elas sejam consideradas iguais à sua envolvente, resultando assim no mapa da Figura 5.10.

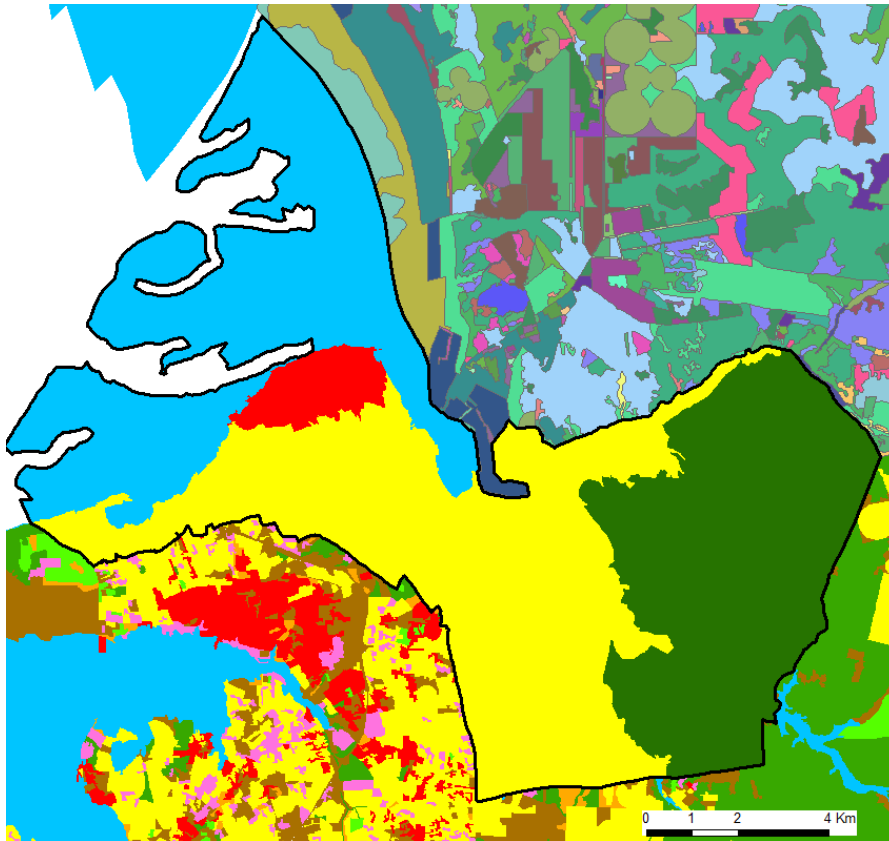


Figura 5.10 – Mapa final da rugosidade aerodinâmica equivalente para o concelho de Alcochete. Alc01 – azul; Alc02 – Vermelho; Alc03 – Amarelo; Alc04 – Verde escuro.

O mapa da Figura 5.10 representa uma distribuição de rugosidade aerodinâmica para o concelho de Alcochete consistente com a evolução dos perfis de velocidade. Em concordância do que foi feito para Lisboa, foram atribuídos códigos e cores diferentes a cada uma das zonas assinaladas na Figura 5.10, sendo explicada a sua constituição na Tabela 5.2. Nesta tabela são apresentados os valores dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d para todas as áreas da Figura 5.10, colocando os valores tabelados e os valores calculados para as áreas urbanas/suburbanas, através dos métodos Kanda e/ou Macdonald.

Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d para as diversas zonas de rugosidade aerodinâmica descritas na Figura 5.10, para o concelho de Alcochete

Zona	z_0 (m)	d (m)	Descrição
Alc01	0,0002	0,00	Rio Tejo
Alc02	1,50	3,00	Zona urbana de Alcochete
Alc03	0,18	0,00	Zonas agrícolas, com cultivos a/ou culturas de alturas variadas, obstáculos dispersos tais como casa, estufas, barracões, árvores
Alc04	0,40	5,00	Floresta jovem, com árvores de algum porte e densamente plantada

Por último é apresentado o gráfico final dos perfis verticais do vento para todas as áreas do concelho de Alcochete.

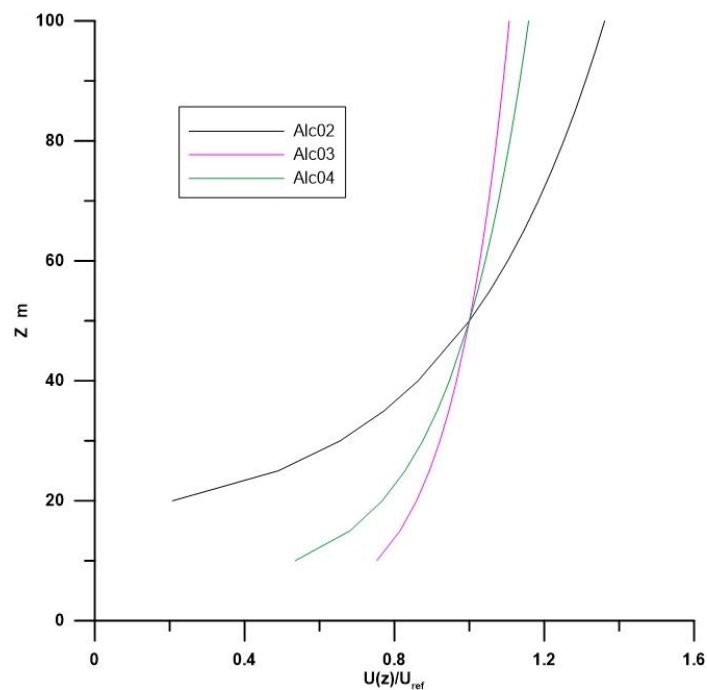


Figura 5.11 - Representação dos perfis de velocidade vertical para as áreas do concelho de Alcochete.

Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Na presente dissertação a rugosidade aerodinâmica, parâmetros aerodinâmicos e parâmetros morfométricos da superfície, mais precisamente das áreas urbanas e suburbanas, são pontos fulcrais para a perceção da evolução do escoamento ao longo da Camada Limite Atmosférica tal como para o desenvolvimento e criação de mapas de vento. Uma das grandes dificuldades apresentadas foi o facto das Cartas de Ocupação e uso do Solo não terem a informação necessária sobre a morfologia das grandes áreas de destaque (urbanas e suburbanas). Sendo necessário uma pesquisa mais alargada no que toca à possível existência de mapas com informações morfológicas da superfície que sejam adaptáveis às COS e fáceis de introduzir no software utilizado (ArcGis) para o tratamento dos mesmos. Não existindo essa informação e no formato pretendido, restou fazer uma pesquisa sobre trabalhos idênticos ao desta dissertação e preferencialmente para as mesmas zonas escolhidas para a criação do método. Tarefa essa que acabou por dar resultados apenas para o concelho de Lisboa. Na origem do estudo “Mapas Climáticos para o Ordenamento”, temos um mapa com os valores dos comprimentos equivalentes de rugosidade, o que seria muito benéfico para esta dissertação. No entanto, a informação dada pelo mapa é demasiado detalhada, uma vez que são dados de z_0 para áreas iguais ou inferiores a $10\,000\text{ m}^2$, que do ponto de vista geográfico é justificável, mas muito reduzido do ponto de vista aerodinâmico. Para além da informação detalhada, o método utilizado para o cálculo de z_0 é bastante antigo, sendo possível serem obtidos através de métodos mais avançados. Assim sendo, através da utilização do *Google Earth* foi possível verificar a diversidade da rugosidade urbana e fazer a recolha dos dados morfométricos necessários, criando um mapa mais consistente do ponto de vista aerodinâmico.

Relativamente à evolução do tratamento das COS, uma vez elas serem bastante detalhadas do ponto de vista aerodinâmico (225 descrições), foi necessário estudar as descrições apresentadas na informação original, entender como seria a forma mais indicada de agrupá-las em megaclasses aerodinâmicas e assim perceber verdadeiramente a variação de rugosidade nos mapas apresentados. Os mapas resultantes tornam-se assim mais indicados, contendo apenas oito megaclasses aerodinâmicas (Tecido urbano; Tecido suburbano; Agricultura; Espaços descobertos; Matos; Árvores de pequeno porte; Árvores de grande porte e Corpos de água) em vez de 225 classes. Para além de todo esse trabalho moroso, é necessário ter em conta um ponto muito importante sobre a adaptação do vento às novas condições de rugosidade, ou seja, o escoamento necessita de um comprimento significativo, que anda na ordem de grandeza de 2 km de percurso, para que se possa adaptar às novas condições. O que nos leva à conclusão de que pequenas áreas (do ponto de vista aerodinâmico) apenas podem sofrer alguns efeitos locais e não condicionam as características globais do escoamento, sendo essas pequenas áreas classificadas como iguais à sua envolvente.

Encontrado o método para a criação dos mapas finais de rugosidade as zonas de estudo (COS + *Google Earth*), resta-nos chegar aos valores dos parâmetros aerodinâmicos (z_0 e d) para as diferentes áreas urbanas e suburbanas, uma vez que as restantes áreas podem ser representadas por valores tabelados (Wieringa, Tabela 2.1). De forma a saber quais os métodos mais indicados para os cálculos, é necessário efetuar-se uma pesquisa dos vários modelos existentes, tendo em conta que podem ser anemométricos e morfométricos. Apesar dos métodos anemométricos nos darem valores mais próximos da realidade devido aos aparelhos de medição se encontrarem no local, os métodos morfométricos são os mais apropriados para o presente trabalho, havendo uma vasta lista de modelos existentes. É necessário ter em conta dois aspetos importantes: estudos que indiquem os métodos que se aproximam o máximo dos valores reais e os métodos criados mais recentemente, uma vez estarem mais aperfeiçoados e indicados para diversas áreas urbanas e suburbanas. Assim sendo chegou-se à conclusão da utilização de dois

métodos – Macdonald, 1998, para valores de $\lambda_p > 0,45$ e Kanda, 2013, para valores de $\lambda_p < 0,45$ – que comparados com estudos realizados recentemente (Kent, et al., 2017), são os mais indicados para a utilização no presente trabalho. Com a tabela de todos os valores para z_0 e d , é possível transferir essa informação para as COS e sabendo que o perfil do vento na Camada Limite Atmosférica tem um comportamento logarítmico, é então fácil saber qual a velocidade vertical em qualquer ponto.

Contudo, ainda há muito para fazer e através deste trabalho é possível desenvolver-se um método melhorado e que se adapte a qualquer zona, mas para isso é necessário fazer alguns ajustes. No que toca à informação morfométrica da superfície é necessário criar-se um mapa ou acrescentar na tabela de atributos das COS já existentes mais informações acerca das características morfométricas de cada área de forma a ser mais fácil, económico e preciso para chegar ao grande objetivo de calcular os parâmetros aerodinâmicos e consequentemente à velocidade vertical num dado ponto. Na utilização do software, de modo a não ser necessário efetuar a seleção de áreas ou agrupamento de áreas um a um e a olho nu, tendo as informações necessárias e mais detalhadas na tabela de atributos, torna-se mais fácil e económico a utilização da programação em Python.

Referências Bibliográficas

- Ackere, S., Eetvelde, G., Schillebeeckx, D., Papa, E., Wyngene, K., & Vandeveld, L. (2015). *Wind Resource Mapping Using Landscape Roughness and Spatial Interpolation Methods*. *Energies*, Vol. 8, pp. 8682-8703. doi:10.3390/en8088682
- Alcoforado, J., Lopes, A., Andrade, H., & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa*.
- August, J. (1978). *Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies*. *Journal of Applied Meteorology*, American Meteorological Society, Vol. 17, pp. 636-643. doi:0021-8952/78/0636-0643\$05.00
- Benson, J. (2005). *Boundary-layer response to a change in surface roughness*. (Dissertation of MSc) The University of Reading.
- Bottema, M., & Mestayer, P. (1998). *Urban Roughness Mapping - Validation Techniques and Some First Results*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier Science Ltd. Allrights reserved, Vol. 74-76, pp. 163-173. doi:0167-6105/98/\$19.00
- Britter, R., & Hanna, S. (2003). *Flow and Dispersion in Urban Areas*. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 35, pp. 469-496. doi:10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147
- Caetano, M., & F. Marcelino (2017). *CORINE Land Cover de Portugal Continental 1990-2000-2006-2012*. Relatório Técnico, Direção-Geral do Território (DGT).
- Caetano, M., C. Igreja, F. Marcelino, & H. Costa (2017). *Estatísticas e dinâmicas territoriais multiescala de Portugal Continental 1995-2007-2010 com base na Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS)*. Relatório Técnico, Direção-Geral do Território (DGT).
- Caetano, M., Nunes, A., Dinis, J., Pereira, M., Marrecas, P., & Nunes, V. (2010). *Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2007 (COS2007)*. Memória Descritiva, Instituto Geográfico Português.
- Choi, E. (2009). *Proposal for Unified Terrain Categories Exposures and Velocity Profiles*. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei, Taiwan.
- Coceal, O., & Belcher, S. (2004). *A Canopy Model of Mean Winds Through Urban Areas*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Royal Meteorological Society, Vol. 130, pp. 1349-1372. doi:10.1256/qj.03.40
- Correia, E., Lopes, A., & Marques, D. (2015). *An Automatic GIS Procedure to calculate Urban Densities to Use in Urban Climatic Maps*, Poster 12: GD - Local Climates Zones and Urban Databases. *9th International Conference on Urban Climate, 12th Symposium on the Urban Environment*.
- Dallman, A., Sabatino, S., & Fernando, H. (2013). *Flow and Turbulence in an Industrial/Suburban Roughness Canopy*. *Environ Fluid Mech*, Springer Science+Business Media Dordrecht, Vol. 13, pp. 279-307. doi:10.1007/s10652-013-9274-7
- Direção-Geral do Território*. (2019). Obtido de Geodesia e Cartografia: http://www.dgterritorio.pt/produtos_e_servicos/geodesia_e_cartografia/cartografia/

- Faria, R. (2014). *Simulação de Escoamentos Atmosféricos para Estudo de Parques Eólicos: Estudo Comparativo dos Softwares OpenFOAM e Windie*. (Dissertação de Mestrado) Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Grimmond, C., & Oke, T. (1999). *Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form*. Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society, Vol. 38, pp. 1262-1292.
- Hanna, S., & Britter, R. (2001). *The Effect of Roughness Obstacles on Flow and Dispersion in Urban and Industrial Areas*. Seventh Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, pp. 266-270.
- Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M., & Raasch, S. (2013). *A new Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces*. Boundary-Layer Meteorol, Springer Science+Business Media Dordrecht, Vol. 148, pp. 357-377. doi:10.1007/s10546-013-9818-x
- Kent, C., Grimmond, S., Barlow, J., Gatey, D., Kotthaus, S., Lindberg, F., & Halios, C. (2017). *Evaluation of Urban Local-Scale Aerodynamic Parameters: Implications for the Vertical Profile of Wind Speed and for Source Areas*. Boundary-Layer Meteorol, Vol. 164, pp. 183-213. doi:10.1007/s10546-017-0248-z
- Legislação, L241. (2014). Obtido de Jornal Oficial da União Europeia: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014:241:FULL&from=PT>
- Lisboa: *Mapas Climáticos para o Ordenamento*. (2019). Obtido de ArcGIS: <https://www.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=9957359140af4fdb824bdf9783eef4e5>
- Macdonald, R., Griffiths, R., & Hall, D. (1998). *An Improved Method for the Estimation of Surface Roughness of Obstacles Arrays*. Atmospheric Environment, Vol. 32 (Nº11), pp. 1857-1864. doi:1352-2310/98 \$19.00 + 0.00, Great Britain.
- Millward-Hopkins, J., Tomlin, A., Ma, L., Ingham, D., & Pourkashanian, M. (2011). *Estimating Aerodynamic Parameters of Urban-Like Surfaces with Heterogeneous Building Heights*. Boundary-Layer Meteorol, Springer Science+Business Media, Vol. 141, pp. 443-465. doi:10.1007/s10546-011-9640-2
- Moreira, G. (2012). *Desenvolvimento de modelos de camada limite atmosférica aplicados a micro-regiões*. (Tese de Doutoramento) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- NUTS de Portugal. (2019). Obtido de Wikipédia, a enciclopédia livre: https://pt.wikipedia.org/wiki/NUTS_de_Portugal
- Rooney, G., Longley, I., & Barlow, J. (2005). *Variation of Urban Momentum Roughness Length with Land Use in the Upwind Source Area, as Observed in two U. K. Cities*. Boundary-Layer Meteorology, Vol. 115, pp. 69-84.
- Sequera, P., J. González, K. McDonald, S. LaDochy, & D. Comarazamy (2016). *Improvements in Land-Use Classification for Estimating Daytime Surface Temperatures and Sea-Breeze Flows in Southern California*. Earth Interact. doi:10.1175/EI-D-14-0034.1, in press
- Shaw, W., & Doran, J. (2001). *Observations of Systematic Boundary Layer Divergence Patterns and Their Relationship to Land Use and Topography*. Journal of Climate, pp. 1753-1764.

- Silva, J., Ribeiro, C., & Guedes, R. (2007). *Roughness Length Classification of Corine Land Cover Classes*. MEGAJOULE - Consultants, Maia, Portugal.
- Thunnissen, H., & Wit, A. (2000). *The National Land Cover Database of the Netherlands*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Supplement B7, pp. 223-230.
- Wieringa, J. (1993). *Representative Roughness Parameters for Homogeneous Terrain*. Boundary Layer Meteorology, Vol. 63, pp. 323-363, Netherlands

Anexo A

Tabela A.1 – Modelos morfométricos adequados para o cálculo dos parâmetros aerodinâmicos

Raupach	$z_0 = (h_r - d) \times \exp\left(-\frac{\kappa \times U_h}{u_*} + \psi_{RSL}\right)$	(A.1)
	$d = 1 - \frac{1 - \exp(-\sqrt{15 \times \lambda_f})}{\sqrt{15 \times \lambda_f}}$	(A.2)
	$\frac{u_*}{U_h} = \sqrt{C_S + 0.5 \times C_{dh} \times \lambda'_f}$	(A.3)
	$\lambda_{f,crit} = \frac{0.5 \times C_{dh} + \sqrt{(0.5 \times C_{dh})^2 + 4 \times C_S \times (ec/2)^2}}{2 \times (ec/2)^2}$	(A.4)
Bottema I	$z_0 = (h_r - d) \times \exp\left[-\left(\frac{0,51}{\lambda_f^{0,5}}\right)\right]$	(A.5)
	$d = \lambda_p^{0,6} \times h_r$	(A.6)
Bottema II	$z_0 = h_r \times \left\{ \frac{h_r - Z_{dpl}}{h_r} \times \exp\left[-\frac{\kappa}{(0,5 \times \lambda_f \times C_{dh})^{0,5}}\right] \right\}$	(A.7)
	$C_{dh} = 1,2 \times \max\left[1 - 0,15 \times \left(\frac{L_x}{h_r}\right); 0,82\right] \times \min\left[0,65 + 0,06 \times \left(\frac{L_y}{h_r}\right); 1,0\right]$	(A.8)
	$L^* = 4 \times \left(L_y \times \frac{h_r}{0,5 \times L_y + h_r}\right)$	(A.9)
<u>Alinhado:</u>	$d = \frac{L_y}{D_y} \times Z_{dpl}$	(A.10)
<i>Baixa densidade:</i>	$Z_{dpl} = h_r \times \frac{L_x + 0,33 \times L^*}{D_x}$	(A.11)
<i>Alta densidade ($W_x < L^*$):</i>	$Z_{dpl} = h_r \times \frac{L_x + 0,33 \times \left(2 - \frac{W_x}{L^*}\right) \times W_x}{D_x}$	(A.12)
<u>Desfasado $W_y/L_y > 1$:</u>	$d = 2 \times \left(\frac{L_y}{D_y}\right) \times Z_{dpl}$	(A.13)

Baixa densidade:

$$Z_{dpl} = h_r \times \frac{L_x + 0,33 \times L^*}{2 \times D_x} \quad (\text{A.14})$$

Alta densidade $W_x + D_x < L^$:*

$$Z_{dpl} = h_r \times \frac{L_x + 0,33 \times \left(2 - \frac{W_x + D_x}{L^*}\right) \times (W_x + D_x)}{2 \times D_x} \quad (\text{A.15})$$

Denso, desfasado $W_y/L_y < 1$:

$$d = Z_{dpl} \quad (\text{A.16})$$

$$Z_{dpl} = \left(\frac{W_y}{L_y}\right) \times \left[\frac{L_x + 0,33 \times \left(2 - \frac{W_x + D_x}{L^*}\right) \times (W_x + D_x)}{2 \times D_x} \times h_r \right] + \left(1 - \frac{W_y}{L_y}\right) \times \left[\frac{L_x + 0,33 \times \left(2 - \frac{W_x}{L^*}\right) \times W_x}{D_x} \times h_r \right] \quad (\text{A.17})$$

Macdonald

$$z_0 = h_r \left\{ \left(1 - \frac{d}{h_r}\right) \times \exp \left[- \left(0,5 \times \frac{C_D}{\kappa^2} \times \left(1 - \frac{d}{h_r}\right) \times \lambda_f\right)^{-0,5} \right] \right\} \quad (\text{A.18})$$

$$d = h_r \times [1 + \alpha^{-\lambda_p} \times (\lambda_p - 1)] \quad (\text{A.19})$$

**Hanna &
Britter**

$$\lambda_f < 0,15:$$

$$z_0 = \lambda_f \times h_r \quad (\text{A.20})$$

$$\lambda_f \geq 0,15:$$

$$z_0 = 0,15 \times h_r \quad (\text{A.21})$$

$$\lambda_f < 0,05:$$

$$d = 3 \times \lambda_f \times h_r \quad (\text{A.22})$$

$$0,15 > \lambda_f \geq 0,05:$$

$$d = h_r \times [0,15 + 5,5 \times (\lambda_f - 0,05)] \quad (\text{A.23})$$

Coceal

$$z_0 = h_r \times 10^{\log(z_0/h_r)} \quad (\text{A.24})$$

$$\log\left(\frac{z_0}{h_r}\right) = -0,575 \times \left[\log\left(\frac{L_c}{h_r}\right)\right]^2 + 0,934 \times \log\left(\frac{L_c}{h_r}\right) - 1,212 \quad (\text{A.25})$$

$$L_c = (1 - \lambda_p) \times \frac{h_r}{\lambda_f} \quad (\text{A.26})$$

$$d = h_r \times [1 + 4,43^{-\lambda_p} \times (\lambda_p - 1)] \quad (\text{A.27})$$

**Millward-
Hopkins**

$$z_0 = (h_r - d) \times \exp \left[- \left(0,5 \times \frac{C_D}{\kappa^2} \times \lambda_f^*\right)^{-0,5} \right] \quad (\text{A.28})$$

$$\lambda_f^* = \lambda_f \left(1 - \frac{d}{h_r}\right) \quad (\text{A.29})$$

$$L_R = h_r \frac{1.8 \times \left(\frac{b}{h_r}\right)}{\left(\frac{l}{h_r}\right)^{0.3} \times \left(1 + 0.24 \left(\frac{b}{h}\right)\right)} \quad (\text{A.30})$$

$$\lambda_p \geq 0.19: \quad d = h_r \times \left\{ \frac{19.2 \times \lambda_p - 1 + \exp(-19.2 \times \lambda_p)}{19.2 \times \lambda_p \times [1 - \exp(-19.2 \times \lambda_p)]} \right\} \quad (\text{A.31})$$

$$\lambda_p < 0.19: \quad d = h_r \times \left\{ \frac{117 \times \lambda_p + (187.2 \times \lambda_p^3 - 6.1) \times [1 - \exp(-19.2 \times \lambda_p)]}{(1 + 114 \times \lambda_p + 187 \times \lambda_p^3) \times [1 - \exp(-19.2 \times \lambda_p)]} \right\} \quad (\text{A.32})$$

Tabela A.2 – Classes criadas e respetivas descrições correspondentes. De notar que existem descrições que existem em mais do que uma classe uma vez que vai depender da sua envolvente para saber em que classe agrupar.

Classe	Código_COS	Descrição	
1. Tecido Urbano	1.1.1.01.1	Tecido urbano contínuo predominantemente vertical	
	1.1.1.02.1	Tecido urbano contínuo predominantemente horizontal	
	1.1.1.03.1	Áreas de estacionamento e logradouros	
	1.2.1.01.1	Indústria (1 e 2)	
	1.2.1.02.1	Comércio (1 e 2)	
	1.2.1.04.1	Equipamentos públicos e privados (1 e 2)	
	1.3.3.01.1	Áreas em construção	
	1.3.3.02.1	Áreas abandonadas em territórios artificializados	
	1.4.1.01.1	Parques e jardins (1 e 2)	
	1.4.1.02.1	Cemitérios (1 e 2)	
	1.4.2.01.1	Campos de golfe (1 e 2)	
	1.4.2.01.2	Outras instalações desportivas (1 e 2)	
	1.4.2.02.1	Parques de campismo (1 e 2)	
	1.4.2.02.2	Outros equipamentos de lazer (1 e 2)	
	1.4.2.03.1	Equipamentos culturais e zonas históricas (1 e 2)	
	2. Tecido suburbano	1.1.2.01.1	Tecido urbano descontínuo
		1.1.2.02.1	Tecido urbano descontínuo esparso
1.2.1.01.1		Indústria (1 e 2)	
1.2.1.02.1		Comércio (1 e 2)	
1.2.1.04.1		Equipamentos públicos e privados (1 e 2)	
1.4.1.01.1		Parques e jardins (1 e 2)	
1.4.1.02.1		Cemitérios (1 e 2)	
1.4.2.01.1		Campos de golfe (1 e 2)	
1.4.2.01.2		Outras instalações desportivas (1 e 2)	
1.4.2.02.1		Parques de campismo (1 e 2)	
1.4.2.02.2		Outros equipamentos de lazer (1 e 2)	
1.4.2.03.1	Equipamentos culturais e zonas históricas (1 e 2)		

3. Agricultura	1.2.1.03.1	Instalações agrícolas
	2.1.1.01.1	Culturas temporárias de sequeiro
	2.1.1.02.1	Estufas e Viveiros
	2.1.2.01.1	Culturas temporárias de regadio
	2.2.1.01.1	Vinhas
	2.4.1.01.1	Culturas temporárias de sequeiro associadas a vinha
	2.4.1.01.2	Culturas temporárias de sequeiro associadas a pomar
	2.4.1.01.3	Culturas temporárias de sequeiro associadas a olival
	2.4.1.02.1	Culturas temporárias de regadio associadas a vinha
	2.4.1.02.2	Culturas temporárias de regadio associadas a pomar
	2.4.1.02.3	Culturas temporárias de regadio associadas a olival
	2.4.2.01.1	Sistemas culturais e parcelares complexos (3, 6 e 7)
	2.4.3.01.1	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais (3, 6 e 7)
	3.2.4.12.1	Viveiros florestais
	4. Espaços descobertos	1.2.4.01.1
1.2.4.02.1		Aeródromos
1.3.1.01.1		Minas a céu aberto
1.3.1.02.1		Pedreiras
1.3.2.01.1		Aterros
1.3.2.02.1		Lixeiras e Sucatas
2.1.3.01.1		Arrozais
2.3.1.01.1		Pastagens permanentes
3.2.1.01.1		Vegetação herbácea natural
3.3.2.01.1		Rocha nua
5. Matos		2.4.1.03.1
	2.4.1.03.2	Pastagens associadas a pomar
	2.4.1.03.3	Pastagens associadas a olival
	3.2.2.01.1	Matos densos
	3.2.2.02.1	Matos pouco densos
	3.2.3.01.1	Vegetação esclerófita densa
	3.2.3.02.1	Vegetação esclerófita pouco densa
	3.3.3.01.1	Vegetação esparsa
6. Árvores de pequeno porte	2.2.3.01.1	Olivais
	2.4.2.01.1	Sistemas culturais e parcelares complexos (3, 6 e 7)
	2.4.3.01.1	Agricultura com espaço naturais e semi-naturais (3, 6 e 7)
	2.2.1.02.1	Vinhas com pomar
	2.2.1.03.1	Vinhas com olival
	2.2.2.01.1	Pomares de frutos frescos
	2.2.2.01.5	Pomares de citrinos
	2.2.2.01.6	Outros pomares
	2.2.2.02.1	Pomares de frutos frescos com vinha
	2.2.2.02.5	Pomares de citrinos com vinha
	2.2.2.02.6	Outros pomares com vinha
	2.2.2.03.1	Pomares de frutos frescos com olival
	2.2.2.03.5	Pomares de citrinos com olival

2.2.2.03.6	Outros pomares com olival
2.2.3.02.1	Olivais com vinha
2.2.3.03.1	Olivais com pomar
3.2.4.01.6	Florestas abertas de espécies invasoras
3.2.4.08.1	Cortes rasos de florestas de sobreiro
3.2.4.08.2	Cortes rasos de florestas de azinheira
3.2.4.08.3	Cortes rasos de florestas de outros carvalhos
3.2.4.08.4	Cortes rasos de florestas de castanheiro
3.2.4.08.5	Cortes rasos de florestas de eucalipto
3.2.4.08.6	Cortes rasos de florestas de espécies invasoras
3.2.4.08.7	Cortes rasos de florestas de outras folhosas
3.2.4.09.1	Cortes rasos de florestas de pinheiro bravo
3.2.4.09.2	Cortes rasos de florestas de pinheiro manso
3.2.4.09.3	Cortes rasos de florestas de outras resinosas
3.2.4.10.1	Novas plantações de florestas de sobreiro
3.2.4.10.2	Novas plantações de florestas de azinheira
3.2.4.10.3	Novas plantações de florestas de outros carvalhos
3.2.4.10.4	Novas plantações de florestas de castanheiro
3.2.4.10.5	Novas plantações de florestas de eucalipto
3.2.4.10.6	Novas plantações de florestas de espécies invasoras
3.2.4.10.7	Novas plantações de florestas de outras folhosas
3.2.4.11.1	Novas plantações de florestas de pinheiro bravo
3.2.4.11.2	Novas plantações de florestas de pinheiro manso
3.2.4.11.3	Novas plantações de florestas de outras resinosas
3.3.4.01.1	Áreas ardidas não florestais
3.3.4.02.1	Áreas ardidas em florestas de sobreiro
3.3.4.02.2	Áreas ardidas em florestas de azinheira
3.3.4.02.3	Áreas ardidas em florestas de outros carvalhos
3.3.4.02.4	Áreas ardidas em florestas de castanheiro
3.3.4.02.5	Áreas ardidas em florestas de eucalipto
3.3.4.02.6	Áreas ardidas em florestas de espécies invasoras
3.3.4.02.7	Áreas ardidas em florestas de outras folhosas
3.3.4.03.1	Áreas ardidas em florestas de pinheiro bravo
3.3.4.03.2	Áreas ardidas em florestas de pinheiro manso
3.3.4.03.3	Áreas ardidas em florestas de outras resinosas

7. Árvores de grande porte	3.2.4.05.7	Florestas abertas de outra folhosa com resinosas
	3.2.4.05.8	Florestas abertas de misturas de folhosas com resinosas
	3.2.4.06.1	Florestas abertas de pinheiro bravo com folhosas
	3.2.4.06.2	Florestas abertas de pinheiro manso com folhosas
	3.2.4.06.3	Florestas abertas de outras resinosas com folhosas
	3.2.4.06.4	Florestas abertas de misturas de resinosas com folhosas
	3.2.4.07.1	Outras formações lenhosas
	3.2.4.01.7	Florestas abertas de outras folhosas
	3.2.4.02.1	Florestas abertas de sobreiro com folhosas
	3.2.4.02.2	Florestas abertas de azinheira com folhosas
	3.2.4.02.3	Florestas abertas de outros carvalhos com folhosas
	3.2.4.02.4	Florestas abertas de castanheiro com folhosas
	3.2.4.02.5	Florestas abertas de eucalipto com folhosas
	3.2.4.02.6	Florestas abertas de espécies invasores com folhosas
	3.2.4.02.7	Florestas abertas de outra folhosa com folhosas
	3.2.4.03.1	Florestas abertas de pinheiro bravo
	3.2.4.03.2	Florestas abertas de pinheiro manso
	3.2.4.03.3	Florestas abertas de outras resinosas
	3.2.4.04.1	Florestas abertas de pinheiro bravo com resinosas
	3.2.4.04.2	Florestas abertas de pinheiro manso com resinosas
	3.2.4.04.3	Florestas abertas de outra resinosa com resinosas
	3.2.4.05.1	Florestas abertas de sobreiro com resinosas
	3.2.4.05.2	Florestas abertas de azinheira com resinosas
	3.2.4.05.3	Florestas abertas de outros carvalhos com resinosas
	3.2.4.05.4	Florestas abertas de castanheiro com resinosas
	3.2.4.05.5	Florestas abertas de eucalipto com resinosas
	3.2.4.05.6	Florestas abertas de espécies invasoras com resinosas
	3.2.4.01.1	Florestas abertas de sobreiro
	3.2.4.01.2	Florestas abertas de azinheira
	3.2.4.01.3	Florestas abertas de outros carvalhos
	3.2.4.01.4	Florestas abertas de castanheiro
	3.2.4.01.5	Florestas abertas de eucalipto
	2.4.4.01.1	SAF de sobreiro com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.01.2	SAF de azinheira com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.01.3	SAF de outros carvalhos com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.01.4	SAF de pinheiro manso com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.01.5	SAF de outras espécies com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.01.6	SAF de sobreiro com azinheira e com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.01.7	SAF de outras misturas com culturas temporárias de sequeiro
	2.4.4.02.1	SAF de sobreiro com culturas temporárias de regadio
	2.4.4.02.2	SAF de azinheira com culturas temporárias de regadio
	2.4.4.02.3	SAF de outros carvalhos com culturas temporárias de regadio
	2.4.4.02.4	SAF de pinheiro manso com culturas temporárias de regadio
	2.4.4.02.5	SAF de outras espécies com culturas temporárias de regadio
	2.4.4.02.6	SAF de sobreiro com azinheira e com culturas temporárias de regadio

2.4.4.02.7	SAF de outras misturas com culturas temporárias de regadio
2.4.4.03.1	SAF de sobreiro com pastagens
2.4.4.03.2	SAF de azinheira com pastagens
2.4.4.03.3	SAF de outros carvalhos com pastagens
2.4.4.03.4	SAF de pinheiro manso com pastagens
2.4.4.03.5	SAF de outras espécies com pastagens
2.4.4.03.6	SAF de sobreiro com azinheira com pastagens
2.4.4.03.7	SAF de outras misturas com pastagens
2.4.4.04.1	SAF de sobreiro com culturas permanentes
2.4.4.04.2	SAF de azinheira com culturas permanentes
2.4.4.04.3	SAF de outros carvalhos com culturas permanentes
2.4.4.04.4	SAF de pinheiro manso com culturas permanentes
2.4.4.04.5	SAF de outras espécies com culturas permanentes
2.4.4.04.6	SAF de sobreiro com azinheira com culturas permanentes
2.4.4.04.7	SAF de outras misturas com culturas permanentes
3.1.1.01.1	Florestas de sobreiro
3.1.1.01.2	Florestas de azinheira
3.1.1.01.3	Florestas de outros carvalhos
3.1.1.01.4	Florestas de castanheiro
3.1.1.01.5	Florestas de eucalipto
3.1.1.01.6	Florestas de espécies invasoras
3.1.1.01.7	Florestas de outras folhosas
3.1.1.02.1	Florestas de sobreiro com folhosas
3.1.1.02.2	Florestas de azinheira com folhosas
3.1.1.02.3	Florestas de outros carvalhos com folhosas
3.1.1.02.4	Florestas de castanheiro com folhosas
3.1.1.02.5	Florestas de eucalipto com folhosas
3.1.1.02.6	Florestas de espécies invasoras com folhosas
3.1.1.02.7	Florestas de outra folhosa com folhosas
3.1.2.01.1	Florestas de pinheiro bravo
3.1.2.01.2	Florestas de pinheiro manso
3.1.2.01.3	Florestas de outras resinosas
3.1.2.02.1	Florestas de pinheiro bravo com resinosas
3.1.2.02.2	Florestas de pinheiro manso com resinosas
3.1.2.02.3	Florestas de outra resinosa com resinosas
3.1.3.01.1	Florestas de sobreiro com resinosas
3.1.3.01.2	Florestas de azinheira com resinosas
3.1.3.01.3	Florestas de outros carvalhos com resinosas
3.1.3.01.4	Florestas de castanheiro com resinosas
3.1.3.01.5	Florestas de eucalipto com resinosas
3.1.3.01.6	Florestas de espécies invasoras com resinosas
3.1.3.01.7	Florestas de outra folhosa com resinosas
3.1.3.01.8	Florestas de misturas de folhosas com resinosas
3.1.3.02.1	Florestas de pinheiro bravo com folhosas
3.1.3.02.2	Florestas de pinheiro manso com folhosas

	3.1.3.02.3	Florestas de outra resinosa com folhosas
	3.1.3.02.4	Florestas de misturas de resinosas com folhosas
	2.2.2.01.2	Pomares de amendoeira
	2.2.2.01.3	Pomares de castanheiro
	2.2.2.01.4	Pomares de alfarrobeira
	2.2.2.02.2	Pomares de amendoeira com vinha
	2.2.2.02.3	Pomares de castanheiro com vinha
	2.2.2.02.4	Pomares de alfarrobeira com vinha
	2.2.2.03.2	Pomares de amendoeira com olival
	2.2.2.03.3	Pomares de castanheiro com olival
	2.2.2.03.4	Pomares de alfarrobeira com olival
	2.4.2.01.1	Sistemas culturais e parcelares complexos (3, 6 e 7)
	2.4.3.01.1	Agricultura com espaço naturais e semi-naturais (3, 6 e 7)
8. Corpos de água	4.1.1.01.1	Paúis
	4.2.1.01.1	Sapais
	4.2.2.01.1	Salinas
	4.2.2.02.1	Aquicultura litoral
	4.2.3.01.1	Zonas entre-marés
	5.1.1.01.1	Cursos de água naturais
	5.1.1.02.1	Canais artificiais
	5.1.2.01.1	Lagos e lagoas interiores artificiais
	5.1.2.01.2	Lagos e lagoas interiores naturais
	5.1.2.02.1	Reservatórios de barragens
	5.1.2.03.1	Reservatórios de represas ou de açudes
	5.1.2.03.2	Charcas
	5.1.2.03.3	Aquicultura interior
	5.2.1.01.1	Lagoas costeiras
	5.2.2.01.1	Desembocaduras fluviais
	5.2.3.01.1	Oceano
	3.3.1.01.1	Praias, dunas e areias interiores
	3.3.1.02.1	Praias, dunas e areias costeiras
Depende da sua envolvente	1.2.1.05.1	Infra-estruturas de produção de energia renovável
	1.2.1.05.2	Infra-estruturas de produção de energia não renovável
	1.2.1.06.1	Infra-estruturas de captação, tratamento e abastecimento de águas para consumo
	1.2.1.07.1	Infra-estruturas de tratamento de resíduos e águas residuais
	1.2.2.01.1	Rede viária e espaços associados
	1.2.2.02.1	Rede ferroviária e espaços associados
	1.2.3.01.1	Terminais portuários de mar e de rio
	1.2.3.02.1	Estaleiros navais e docas secas
	1.2.3.03.1	Marinas e docas pesca
	3.2.4.13.1	Aceiros e/ou corta-fogos