Universidade Técnica de Lisboa

**Instituto Superior Técnico** 

### Planeamento Celular em Comunicações Móveis

### Suportado em

## Sistemas de Informação Geográfica

José Manuel Gil Estevez

(Licenciado)

Dissertação para a obtenção do grau de

Mestre em Sistemas de Informação Geográfica

## **DOCUMENTO PROVISÓRIO**

Dezembro, 1999

### PLANEAMENTO CELULAR EM COMUNICAÇÕES MÓVEIS SUPORTADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

### **RESUMO**

O planeamento celular em redes de comunicações móveis tem assumido uma importância crescente, decorrente da enorme expansão que estes sistemas têm conhecido nos últimos anos na comunicação por voz, prevendo-se igualmente a curto prazo um crescimento acentuado da utilização das redes GSM na comunicação de dados, no suporte a serviços telemáticos em viaturas, na gestão de frotas, no acesso móvel a aplicações e na monitorização remota.

Pretendeu-se com este trabalho desenvolver metodologias baseadas em SIG, capazes de estimar o tráfego potencial numa dada zona, com base na determinação do mapa de cobertura rádio e na análise demográfica, apresentando uma nova ferramenta integrada capaz de aumentar a eficiência no planeamento de redes de comunicações móveis.

A metodologia seguida consistiu, numa primeira fase, na caracterização do espaço geográfico envolvente, implementação de um modelo geoestatístico de previsão de sinal e validação com medidas no terreno; numa segunda fase, usando dados demográficos, de tráfego viário e dos movimentos pendulares das populações, desenvolveram-se metodologias baseadas em SIG que permitem estimar o tráfego potencial que poderá ser gerado numa dada área de serviço.

#### **Palavras-Chave**

Sistemas de Informação Geográfica Modelação do Fenómeno de Propagação Georeferenciação de medidas Processamento de Dados Geoestatísticos Comunicações Móveis GSM

#### PLANNING OF CELLULAR MOBILE COMMUNICATIONS BASED ON GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

### ABSTRACT

Cellular planning in mobile communications networks has been assuming an increasing role, mainly due to the enormous expansion that has occurred in voice communications over the last few years. Moreover, one can also expect a new growth in GSM data communication, namely in supporting vehicular telematic services, fleet management, access to mobile applications and remote monitoring.

The goal of this work was the development of some methodologies based on GIS concepts, to estimate telephonic traffic in a given area, supported in radio coverage calculation and demographic analysis, and to present in this way a new tool capable of increasing the efficiency in mobile communications network planning.

The methodology carried out consisted, in a first step, on a characterization of the surrounding geographic space, geostatistical signal predicting model implementation and validation with field measurements. In a second step, using demographic data, road traffic, and pendulum population movements, GIS-based methodologies were developed for predicting potential telephonic traffic generated in a given service area.

#### **Key-words**

Geographic Information Systems Propagation Modeling Georegistration of Measurements Data Geostatistical Data Processing Mobile Communications GSM

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Luís Manuel de Jesus Sousa Correia, do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, orientador desta Tese, expresso o meu reconhecimento e gratidão pelas orientações que me deu, relativamente às matérias relacionadas com a componente de telecomunicações, bem como pelo prestimoso e imprescindível apoio dado na realização deste trabalho que, começando na difícil tarefa de definir o título e os objectivos na componente de telecomunicações, terminou na sua exaustiva e meticulosa revisão.

Ao Prof. Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento, do Departamento de Engenharia Civil e co-orientador desta Tese, pela ajuda e apoio na definição e programação dos objectivos deste trabalho no âmbito dos SIG.

Aos alunos finalistas da Licenciatura de Eng<sup>a</sup> Electrotécnica e de Computadores João Chaves e Pedro Oliveira pela sua colaboração dedicada na obtenção e disponibilização das medidas obtidas em campo.

À TELECEL pela cedência do equipamento de medida e ao IgeoE pela cedência da informação cartográfica indispensável para a realização deste trabalho.

# ÍNDICE

RESUMO i		
ABSTRACTiii		
AGRADECIMENTOSv		
ÍNDIC	СЕ	vii
ÍNDIC	CE DE FIGURAS	ix
ÍNDIC	CE DE TABELAS	xii
LISTA	A DE SIGLAS	xiii
INTRO	ODUÇÃO	1
1.1	LIGAÇÃO ENTRE TELECOMUNICAÇÕES E SIG	1
1.2	Motivação e Descrição da Tese	2
DADO	OS GEOGRÁFICOS	5
2.1	Introdução	5
2.2	ESCOLHA DA FERRAMENTA DE SIG	8
2.3	CARTOGRAFIA DIGITAL	9
2.4	IMAGENS MATRICIAIS (RASTER)	10
2.5	CARTOGRAFIA VECTORIAL	12
2.6	MODELO DIGITAL DO TERRENO	13
2.7	Georeferenciação de Elementos	17
	~ ~ ~	
CLASS	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO	21
<b>CLAS</b> 3.1	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO Introdução	<b> 21</b> 21
3.1 3.2	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO Introdução Construção das Imagens de Definição de Zonas	<b> 21</b> 21 26
3.1 3.2 3.3	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO Introdução Construção das Imagens de Definição de Zonas Ocupação do Terreno por Construções	21 21 26 30
3.1 3.2 3.3 3.4	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO Introdução Construção das Imagens de Definição de Zonas Ocupação do Terreno por Construções Ondulação do Terreno	21 21 26 30 37
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO Introdução Construção das Imagens de Definição de Zonas Ocupação do Terreno por Construções Ondulação do Terreno Inclinação do Terreno	21 21 26 30 37 40
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO Introdução Construção das Imagens de Definição de Zonas Ocupação do Terreno por Construções Ondulação do Terreno Inclinação do Terreno Cobertura Vegetal do Terreno	21 21 26 30 37 40 41
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DO TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA	21 21 26 30 37 40 41 44
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DO TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA	21 21 26 30 37 40 41 44 46
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DO TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA ZONAS DE COTA COM VALOR MAIS ELEVADO	21 26 30 37 40 41 44 46 47
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODE	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DO TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA ZONAS DE COTA COM VALOR MAIS ELEVADO ELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS	21 21 26 30 37 40 41 44 46 47 49
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODH 4.1	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO INTRODUÇÃO Construção das Imagens de Definição de Zonas Ocupação do Terreno por Construções Ondulação do Terreno Inclinação do Terreno Cobertura Vegetal do Terreno Percursos Terra-Água Determinação da Existência de Linha de Vista Zonas de Cota com Valor mais Elevado Introdução	21 21 26 30 37 40 41 41 46 47 47 49
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODE 4.1 4.2	SIFICAÇAO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇAO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DO TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA ZONAS DE COTA COM VALOR MAIS ELEVADO ELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS INTRODUÇÃO CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA A ESTUDAR	21 21 26 30 37 40 41 44 44 45 49 52
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODE 4.1 4.2 4.3	SIFICAÇÃO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇÃO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DO TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA ZONAS DE COTA COM VALOR MAIS ELEVADO ELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS INTRODUÇÃO CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA A ESTUDAR MODELAÇÃO DA RADIAÇÃO DA ANTENA.	21 21 26 30 37 40 41 44 46 47 49 49 52 54
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODH 4.1 4.2 4.3 4.4	SIFICAÇÃO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇÃO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DA TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA ZONAS DE COTA COM VALOR MAIS ELEVADO ELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS INTRODUÇÃO CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA A ESTUDAR MODELAÇÃO DA RADIAÇÃO DA ANTENA	21 21 26 30 37 40 41 44 46 47 49 52 52 54 60
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODH 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	SIFICAÇÃO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇÃO INTRODUÇÃO Construção das Imagens de Definição de Zonas Ocupação do Terreno por Construções Ondulação do Terreno Inclinação do Terreno Cobertura Vegetal do Terreno Percursos Terra-Água Percursos Terra-Água Determinação da Existência de Linha de Vista Zonas de Cota com Valor mais Elevado ELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS Introdução Caracterização do Problema a Estudar Modelação da Radiação da Antena Propagação em Espaço Livre Modelo de Okumura-Hata	21 26 30 37 40 41 44 44 46 47 49 52 52 54 60 63
CLASS 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 MODE 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	SIFICAÇÃO DE AMBIENTES DE PROPAGAÇÃO INTRODUÇÃO CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS DE DEFINIÇÃO DE ZONAS OCUPAÇÃO DA TERRENO POR CONSTRUÇÕES ONDULAÇÃO DO TERRENO INCLINAÇÃO DO TERRENO COBERTURA VEGETAL DO TERRENO PERCURSOS TERRA-ÁGUA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA DETERMINAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE LINHA DE VISTA ZONAS DE COTA COM VALOR MAIS ELEVADO ELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS INTRODUÇÃO CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA A ESTUDAR MODELAÇÃO DA RADIAÇÃO DA ANTENA PROPAGAÇÃO EM ESPAÇO LIVRE. MODELO DE OKUMURA-HATA PREVISÃO DO SINAL RECEBIDO	21 21 26 30 37 40 41 44 46 47 49 52 52 54 60 63 69

5.1	METODOLOGIA PARA A OBTENÇÃO DE MEDIDAS	75
5.2	REGISTO E PROCESSAMENTO DE MEDIDAS	76
5.3	GEOREFERENCIAÇÃO DE MEDIDAS NO SIG	78
5.4	Comparação das Medidas em 900 e 1800 MHz	83
5.5	CÁLCULO DA ATENUAÇÃO EM PROGRAMA EXTERNO	84
5.6	CÁLCULO DO DESVIO DA PREVISÃO NO PROGRAMA EXTERNO	86
5.7	CÁLCULO DO DESVIO DA PREVISÃO NO MODELO IMPLEMENTADO	87
ANÁL	ISE GEOESTATÍSTICA	91
6.1	INTRODUÇÃO	91
6.2	DEFINIÇÃO DE ZONAS HOMOGÉNEAS PARA ANÁLISE ESPACIAL	93
6.3	Análise da Distribuição do Tráfego Viário	97
6.4	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DA POPULAÇÃO	106
6.5	Análise da Distribuição de Emprego	113
6.6	ANÁLISE DO MOVIMENTO PENDULAR DAS POPULAÇÕES	115
6.7	Análise de Tráfego Telefónico	125
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 133		
REFE	RÊNCIAS	. 135

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-1 – Fotografia Aérea Digitalizada da Zona de Estudo (Fonte: IPCC)	6
Figura 2.1-2 – Imagem Satélite de Washington com Resolução de 1 m (Fonte: Space Imaging Inc.)	7
Figura 2.5-1 – Cartografia de Traço com um Pormenor da Zona de Estudo em Lisboa	12
Figura 2.6-1 – Imagem do Modelo Digital de Terreno correspondente à carta 431 do IGeoE	16
Figura 2.6-2 – Modelo Digital do Terreno de Lisboa Reclassificado em 16 Classes	16
Figura 3.1-1 – Área de Implementação de Edifícios	24
Figura 3.1-2 – Altura dos Edifícios de Lisboa	25
Figura 3.1-3 – Número de Pisos por Edifício por Classes	26
Figura 3.2-1 – Áreas Quadradas de 400 m para Análise do Terreno (Quadrículas)	27
Figura 3.2-2 – Sectores Polares de Análise de Terreno de 400 m e 5 °	27
Figura 3.2-3 – Imagem de Definição de Parcelas Quadriculares para Análise Estatística	28
Figura 3.2-4 - Caracterização do Sector C da Estação Base do Campo Pequeno	30
Figura 3.3-1 – Ortofoto da Zona de Estudo de Ambientes obtido de dados do CNIG	31
Figura 3.3-2 – Índice de Área Edificada (IAE) Calculado sobre Quadrículas	32
Figura 3.3-3 – Índice de Área Edificada (IAE) Calculado sobre Sectores	33
Figura 3.3-4 – Distribuição da Altura Média dos Edifícios (DHE) Calculado sobre Quadrículas	34
Figura 3.3-5 – Distribuição da Altura Média dos Edifícios (DHE) Calculado sobre Sectores	34
Figura 3.3-6 – Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) Calculado sobre Quadrículas	35
Figura 3.3-7 – Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) Calculado sobre Sectores	36
Figura 3.3-8 – Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) de Lisboa por Classes	37
Figura 3.4-1 – Imagem do MDT Após Aplicação do Filtro de Média de 400 m	38
Figura 3.4-2 – Perfil Longitudinal do MDT sem e com Filtragem	38
Figura 3.4-3 – Índice de Ondulação do Terreno (IOT) Calculado Sobre Quadrículas	39
Figura 3.4-4 – Índice de Ondulação do Terreno (IOT) Calculado Sobre Sectores	40
Figura 3.5-1 – Declives Calculados Segundo Radiais Centradas na EB	41
Figura 3.6-1 – Imagem da Cobertura Vegetal do Terreno de Lisboa	42
Figura 3.6-2 – Índice de Vegetação (IV) Calculado sobre Quadrículas	43
Figura 3.6-3 – Índice de Vegetação (IV) Calculado sobre Sectores	43
Figura 3.7-1 – Imagem de Percursos Mistos Terra – Água em Lisboa	44
Figura 3.7-2 – Imagem com as Distâncias à Margem Norte de Lisboa	45
Figura 3.7-3 – Distâncias Medidas da Estação Base Campo Pequeno	45
Figura 3.7-4 – Cálculo do Factor β do Percurso Terra - Água	46
Figura 3.8-1 - Imagem da Bacia de Visão da EB Campo Pequeno (até um Raio de 8 km)	47
Figura 3.9-1 – Plano de Cotas de Valor Superior à Antena da EB	48
Figura 4.3-1 – Imagem com a Localização das 3 Estações Base	55
Figura 4.3-2 - Diagrama de Radiação de uma Antena para Comunicações Móveis (fonte: KATHREIN)	56

Figura 4.3-3 – Ecrã de Introdução de Dados para Modelação do Ganho da Antena	56
Figura 4.3-4 – Imagem com o Valor do Azimute para cada Ponto do Espaço (referência 240 °)	57
Figura 4.3-5 - Diagrama de Radiação Horizontal da Antena	58
Figura 4.3-6 – Ganho Direccional do Sector C da EB Campo Pequeno	59
Figura 4.3-7 - Diagrama de Radiação da Antena a –3 dB	59
Figura 4.3-8 - Diagrama de Radiação da Antena a –3 dB e a –10 dB	60
Figura 4.4-1 – Potência Recebida Segundo Modelo de Propagação em Espaço Livre	63
Figura 4.5-1 – Imagem da Atenuação do Sinal em Função da Distância à EB Campo Pequeno	65
Figura 4.5-2 – Imagem da Atenuação Devida à Ondulação do Terreno	67
Figura 4.5-3 – Atenuação devida à inclinação média do terreno	68
Figura 4.5-4 –Factor de Correcção Devido ao Percurso Misto Terra-Água (Ks)	69
Figura 4.6-1 - Imagem com o Total dos Factores de Correcção	70
Figura 4.6-2 – Imagem da Potência Prevista para o Sinal	70
Figura 4.6-3 – Imagem da Potência Prevista para o Sinal Excluindo a Zona de não Validade	71
Figura 4.6-4 – Mapa de Cobertura Rádio por Classes	72
Figura 4.6-5 – Área de Cobertura para um Sinal Superior a –80 dBm	73
Figura 4.6-6 – Comparação da atenuação em espaço livre e segundo o modelo de Okumura	74
Figura 5.1-1 – Fotografia Aérea Digitalizada da Zona de Estudo (Fonte: IPCC)	
Figura 5.2-1 – Diagrama Entidade – Associação para Modelação da Base de Dados	77
Figura 5.3-1 – Frequência das Medidas de Sinal (número de medidas por célula)	80
Figura 5.3-2 –Estação Base do Campo Pequeno - Medidas de Sinal para 900 MHz [dBm]	81
Figura 5.3-3 - Histograma da Imagem com as Medidas de Sinal a 900 MHz	81
Figura 5.3-4 – EB Campo Pequeno - Sinal Medido a 1800 MHz [dBm]	82
Figura 5.3-5 Histograma da Imagem com as Medidas de Sinal a 1800 MHz	82
Figura 5.4-1 – Diferença de Sinal Medido a 900 MHz e 1800 MHz por Classes	83
Figura 5.4-2 - Histograma da Imagem com a Diferença de Sinal Medido a 900 MHz e a 1800 MHz	84
Figura 5.5-1 – Estimativa de Sinal com Base no Cálculo da Atenuação em Programa Externo	85
Figura 5.5-2 – Histograma da Imagem com o Sinal Estimado por Programa Externo (900 MHz)	85
Figura 5.6-1 – Diferença entre Sinal Previsto no Programa Externo e Sinal Medido (900 MHz)	86
Figura 5.6-2 – Histograma da Imagem Diferença entre Sinal Previsto no Programa Externo e Medido	87
Figura 5.7-1 – Potência Estimada pelo Modelo de Okumura-Hata na Zona de Medidas	88
Figura 5.7-2 - Potência Estimada pelo Modelo de Okumura-Hata na Zona de Medidas por Classes	88
Figura 5.7-3 – Imagem da Diferença em Sinal Previsto e Medido por Classes	89
Figura 5.7-4– Histograma da Imagem da Diferença entre Sinal Estimado e Medido	90
Figura 6.2-1 – Envolvente Circular de 1000 m para Definição de Zonas de Análise Espacial	94
Figura 6.2-2 – Envolventes de Coroas Circulares para Definição de Zonas de Análise Espacial	94
Figura 6.2-3 - Sector Circular de 120° para Definição de Zonas de Análise Espacial	95
Figura 6.2-4 – Imagem da Definição de Zona Circular para a Análise Espacial	96
Figura 6.2-5 – Imagem da Definição de Zonas Circulares para a Análise Espacial	96
Figura 6.2-6 – Imagem da Definição de Zonas de Sectores Circulares para a Análise Espacial	97
Figura 6.3-1 – Georeferenciação dos Pontos de Medida de Tráfego Rodoviário (Fonte: JAE)	98

Figura 6.3-2 – Diagrama de Voronoi para Determinação das Regiões de Influência das Medida	
Figura 6.3-3 – Diagrama Indicativo do Tráfego Penetrante em Lisboa (Fonte: CML)	
Figura 6.3-4 - Diagrama de Voronoi para Determinação de Regiões de Influência	100
Figura 6.3-5 - Diagrama de Voronoi Limitado à Área da Cidade de Lisboa	100
Figura 6.3-6 – Densidade por Célula do Tráfego Penetrante em Lisboa	101
Figura 6.3-7 – Densidade de Tráfego por Célula Estimado para as Freguesias de Lisboa	101
Figura 6.3-8 - Cálculo de Viaturas Presentes para Zonas Definidas por um Círculo de 1000m	102
Figura 6.3-9 - Cálculo de Viaturas Presentes para Zonas Definidas por Coroas Circulares	103
Figura 6.3-10 – Gráfico com o Total de Viaturas Presentes Dentro de Coroas Circulares	104
Figura 6.3-11 - Cálculo de Viaturas Presentes para Zonas Definidas por Sectores Circulares	104
Figura 6.3-12 - Gráfico com o Total de Viaturas Presentes Dentro de Sectores Circulares	105
Figura 6.4-1 – Imagem com os Códigos de Freguesia de Lisboa	109
Figura 6.4-2 – Padrão de Distribuição da População Residente	111
Figura 6.4-3 – Imagem com a Densidade Populacional de Lisboa (Residentes / km <sup>2</sup> )	112
Figura 6.4-4 – Imagem com a Densidade Populacional de Lisboa por Classes	112
Figura 6.5-1 – Padrão de Distribuição Espacial do Emprego para as Freguesia de Lisboa	113
Figura 6.5-2 - Densidade de Empregos por Célula para as Freguesia de Lisboa	115
Figura 6.6-1 – Imagem com a População Presente em Lisboa (Horário não Laboral)	118
Figura 6.6-2 – Número de Indivíduos Presentes por Célula (8 x 8 m) em Horário não Laboral	118
Figura 6.6-3 – Imagem da População Presente em Horário Laboral	119
Figura 6.6-4 – Número de Indivíduos Presentes em Horário Laboral por Célula	120
Figura 6.6-5 – Determinação da População Presente em Lisboa para Coroas Circulares	121
Figura 6.6-6 – Gráfico com a População Residente e Presente (Coroas Circulares)	122
Figura 6.6-7 – Determinação da População Presente em Lisboa para um Sector	122
Figura 6.6-8 – Gráfico com a População Residente e Presente (Sector Circular 120°)	123
Figura 6.6-9 – Imagem de Definição da Área de Análise de População Presente	124
Figura 6.7-1 – Densidade de Tráfego Telefónico em Erlang por Pixel	126
Figura 6.7-2 – Imagem com os Hexágonos de Definição das Zonas de Análise e Códigos	127
Figura 6.7-3 – Tráfego Telefónico Estimado para Células Hexagonais (Erlang)	127
Figura 6.7-4 – Número de Canais Estimados para Células Hexagonais de 1 km	129
Figura 6.7-5 – Estimativa de Canais GSM para Células Hexagonais de 1 km	130
Figura 6.7-6 – Imagem da Densidade de Tráfego com Indicação da Zona de Cálculo	

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 – Valores de Reclassificação do Número de Pisos de Edifícios	25
Tabela 3-1 - Valores de Reclassificação para uma Antena Sectorial	29
Tabela 4-1 – Localização Geográfica das Estações Base em Estudo (Fonte: Telecel)	55
Tabela 4-2 - Ficheiro de reclassificação da antena modelo SH1309.41.0004	58
Tabela 4-1 – Tabela de Reclassificação da Imagem da Potência Recebida	
Tabela 5-1 – Valores de Sinal Medidos em Campo	
Tabela 6-1 – Estimativa de viaturas presentes em sectores circulares.	103
Tabela 6-2 - Estimativa de viaturas presentes em sectores polares de 120°	105
Tabela 6-1 – População residente em Lisboa por Freguesias (Fonte: INE)	110
Tabela 6-1 – Dados sobre a distribuição do emprego em Lisboa (Fonte: CML)	114
Tabela 6-1 - Fluxos Pendulares de População na AML	116
Tabela 6-2 - População que Entra nas Zonas de Emprego em Lisboa	117
Tabela 6-3 - População que sai das zonas de residência	117
Tabela 6-4 - População Presente em Horário Laboral	119
Tabela 6-5 –Indivíduos residentes, presentes e valor máximo para as zonas indicadas	121
Tabela 6-6 - População Presente e Residente em Sectores Circulares	123
Tabela 6-7 - População Presente em Horário Laboral e não Laboral na Zona de Serviço	124
Tabela 6-1 – Relação entre Tráfego e número de Canais para uma Probabilidade de Bloqueio de 1%	128
Tabela 6-2 – Tabela de Reclassificação de Tráfego Telefónico em Canais GSM	129
Tabela 6-3 – Resultados da Estimativa de Tráfego para a Zona de Cobertura Prevista	131

## LISTA DE SIGLAS

- AML Área Metropolitana de Lisboa CEPT- Conferência Europeia de Correios e Telecomunicações CML - Câmara Municipal de Lisboa CNIG - Centro Nacional de Informação Geográfica COS - Coeficiente de Ocupação do Solo DEEC - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (IST) DHE - Distribuição da Altura dos Edifícios DoD - Department of Defense (USA) EB - Estação Base GIS - Geographic Information System GPS - Global Positioning System GSM - Global System for Mobile Communications IAE - Índice da Área Edificada ICP - Instituto das Comunicações de Portugal IEP - Instituto de Estradas de Portugal IGeoE - Instituto Geográfico do Exército INE - Instituto Nacional de Estatística IOT- Índice de Ondulação do Terreno IPCC - Instituto Português de Cartografia e Cadastro IV - Índice de Vegetação JAE - Junta Autónoma de Estradas MDE - Modelo Digital de Elevação MDT - Modelo Digital de Terreno PDOP - Position Dilution of Precision RLE - Run-Length Encoding SIG - Sistema de Informação Geográfica SMS - Short Message Service SQL - Structured Query Language TIN - Triangulated Irregular Network UMTS - Universal Mobile Telecommunication System UTM - Universal Transverse Mercator
- WGS-84 World Geodetic System 84

# **CAPÍTULO 1**

## Introdução

### 1.1 Ligação entre Telecomunicações e SIG

Um dos problemas que se coloca em comunicações móveis prende-se com a necessidade de estimar a cobertura rádio. No contexto das telecomunicações, entende-se por cobertura rádio a extensão geográfica dentro da qual é possível estabelecer comunicações via rádio com um nível de qualidade aceitável. A propagação de ondas electromagnéticas é um fenómeno fortemente dependente da geografia de uma dada zona em estudo, quer ao nível das construções existentes, da rugosidade do solo, dos declives e da sua orientação, quer ainda das características geológicas e da cobertura vegetal do terreno. Tendo presente este facto, investigou-se a possibilidade de modelar o fenómeno de propagação de ondas electromagnéticas com recurso a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com o propósito de desenvolver metodologias que permitissem estimar a cobertura rádio.

Um dos principais objectivos que se pretende alcançar com a modelação da propagação de ondas electromagnéticas consiste em poder estimar a intensidade de sinal rádio recebido em qualquer ponto de uma dada área de serviço. Entende-se por área de serviço, no contexto das telecomunicações, a extensão geográfica dentro da qual se pretende fornecer um dado serviço de telecomunicações.

Numa primeira fase deste estudo pretende-se avaliar as potencialidades dos SIG para implementar modelos de propagação que tenham em conta factores de natureza geográfica, tais como distâncias, cobertura vegetal do terreno, superfícies aquáticas, padrões de construção, relevo, bacias de visão, reflexões em declives e objectos.

A forte dependência da propagação das ondas electromagnéticas, em relação à orografia e à geografia da zona onde ela se desenrola, obriga a que para o estudo de uma cobertura rádio seja necessária uma boa caracterização desse mesmo espaço geográfico (designado neste contexto por ambiente de propagação), de modo a seleccionar correctamente o modelo de propagação mais adequado para cada zona.

Após o cálculo, através do modelo de propagação, do sinal expectável é necessário avaliar a exactidão dos resultados conseguidos, comparando-os com as medidas experimentais obtidas no terreno. Essas medidas e os valores de previsão de sinal fornecidos pelo modelo de propagação, devem ser georeferenciados no SIG, com vista à sua comparação e análise geoestatística, o que irá permitir avaliar a validade dos modelos e aferi-los nas suas componentes. Uma vez aferido um modelo, este pode ser usado em outras situações, permitindo determinar a cobertura rádio de um emissor, calcular a interferência em comunicações móveis celulares, ou apoiar um projecto de construção de um feixe hertziano.

Outro dos problemas que se coloca em telecomunicações prende-se com a necessidade de estimar o tráfego telefónico numa dada área de serviço. A partir de dados demográficos pode-se construir no SIG, um conjunto de imagens que representam a densidade espacial de indivíduos presentes numa dada zona em vários períodos temporais (laboral, pós-laboral, nocturno e outros). Delimitando nessas imagens os contornos das áreas de serviço pretendidas, pode-se estimar para cada uma delas o número total de indivíduos presentes, o tráfego telefónico gerado e o número de canais a instalar pelo operador de telecomunicações que permita garantir uma dada qualidade de serviço.

Com base em metodologias que serão desenvolvidas neste trabalho, pode-se implementar num SIG as ferramentas necessárias para o dimensionamento e localização de Estações Base (EBs) para comunicações móveis celulares. Actualmente existem ferramentas comerciais, baseadas em SIG, que são usadas pelos operadores de comunicações móveis celulares. Contudo, estas implementam apenas a componente de propagação, pelo que esta tese apresenta como inovação integrar a componente de estimação de tráfego, além da já referida componente de propagação, permitindo assim tornar o planeamento mais eficiente e mais próximo das necessidades reais das redes de comunicações celulares.

#### 1.2 Motivação e Descrição da Tese

O crescimento exponencial das necessidades de comunicações móveis para voz e dados a que assistimos presentemente tem provocado um aumento continuado do tráfego telefónico, superando frequentemente, em situações de ponta, a capacidade instalada pelos diversos operadores. Uma das restrições de caracter técnico mais significativa que dificulta o crescimento da capacidade telefónica instalada nas comunicações móveis, reside no reduzido número de frequências atribuídas aos diversos operadores. Esta limitação pode geralmente ser superada através de uma reutilização das mesmas frequências em zonas suficientemente afastadas, de modo a eliminar o problema da sua interferência mútua. Este conceito conhecido como estrutura celular, propõe a divisão de uma área de serviço em áreas de pequenas dimensões (designadas no contexto das telecomunicações por células), cada qual

dispondo de uma ou várias antenas de baixa potência, e usando apenas um subconjunto das frequências disponíveis, as quais poderão ser reutilizadas em outras zonas suficientemente afastadas.

Geralmente, quando se inicia um sistema de comunicações móveis celulares, começa-se por implementar grandes células, chamadas macro-células que cobrem áreas com elevado número de utilizadores potenciais; quando estes se tornam novos subscritores, aumentam o tráfego telefónico ao ponto de congestionarem a capacidade instalada, degradando desse modo o nível da qualidade do serviço prestado pelos operadores. Simultaneamente, colocam-se problemas de não uniformidade do tráfego em termos quer espaciais quer temporais, levando a que seja necessário posteriormente implementar uma estrutura complexa de grandes (macro-células) e pequenas células (micro-células), o que vai requerer um esforço considerável de planeamento e optimização celular. Assim, na sua fase final de implementação, um sistema de comunicações móveis passa a ser constituído por uma estrutura complexa de grande dimensão cobrindo zonas de baixa densidade de tráfego telefónico e por um grande número de células de pequena dimensão cobrindo áreas de grande densidade de tráfego. Consequentemente, o planeamento celular adquire uma maior complexidade para o qual se torna necessário estimar de forma rápida e flexível os limites de cobertura e de interferência e o tráfego expectável para cada uma da células.

Pretende-se com este trabalho dar resposta a estas necessidades, desenvolvendo uma ferramenta integrada e flexível, baseada em SIG, capaz de estimar de forma rápida a área geográfica coberta, a interferência e o tráfego potencial expectável nas células, contribuindo deste modo para um aumento da eficiência no planeamento e na análise em redes de comunicações móveis celulares.

Para validação dos resultados foi conduzido um trabalho de campo em duas escalas distintas: por um lado a caracterização da cidade de Lisboa na sua globalidade, através de uma análise macroscópica da sua orografia, densidade de construção, cobertura vegetal do terreno e zonas cobertas por água; por outro lado uma análise mais detalhada numa zona restrita (Campo Pequeno, São Sebastião), onde foram efectuadas medidas de sinal rádio nas bandas de GSM 900 e 1800 MHz.

No Capítulo 2, são apresentados os recursos e os dados disponíveis para a caracterização geográfica de uma determinada zona, designadamente, fotografia aérea, imagem satélite, ortofotomapas, cartografia digital, modelos digitais de terreno e de elevação. Descrevem-se igualmente as técnicas mais usadas na obtenção dos dados geográficos, que de forma resumida passa pela restituição estereoscópica sobre o modelo tridimensional do terreno dos temas relevantes para as necessidades particulares deste tipo de estudo, como sejam a altimetria, as construções artificiais, a altura da vegetação e o tipo de cobertura do terreno. Ainda neste capítulo desenvolve-se a ideia de que, para um determinado estudo de telecomunicações, pode ser viável (em termos económicos e técnicos) a realização específica de um levantamento aerofotogramétrico e respectiva estéreo-restituição, já que os temas necessários são geralmente mais restritos e particulares relativamente à cartografia que possa existir.

No Capítulo 3, desenvolvem-se metodologias de classificação de ambientes de propagação, que permitam obter a informação geográfica necessária para os estudos de cobertura a realizar. A título ilustrativo classifica-se o ambiente de propagação de Lisboa em função das variáveis geográficas mais significativas, designadamente, densidades de construção, ondulação e inclinação do terreno, cobertura vegetal do terreno, bacias de visão e percursos mistos terra-água.

No Capítulo 4, desenvolvem-se técnicas de modelação em SIG do diagrama de radiação de antenas e da propagação de ondas electromagnéticas, incluindo a implementação do modelo de propagação de Okumura-Hata [2]. A título ilustrativo da metodologia desenvolvida, calculam-se os parâmetros do modelo Okumura-Hata para a zona de estudo e determina-se a área de cobertura de uma das antenas constituintes da Estação Base da Telecel, situada no Campo Pequeno em Lisboa.

No Capítulo 5, define-se uma metodologia de recolha e processamento de dados referenciados geograficamente com recurso a GPS. Com o objectivo de comparar os resultados obtidos pelo modelo estatístico implementado no SIG, recorre-se por um lado a medidas no terreno, e por outro a um programa externo desenvolvido no IST. Após a georeferenciação das medidas e dos valores de previsões de sinal realiza-se um conjunto de análises estatísticas sobre as respectivas imagens, designadamente, cálculo de médias, de desvios padrão e de histogramas com vista à aferição do modelo implementado.

No Capítulo 6, constróiem-se imagens relativas à concentração espacial dos indivíduos, usando dados sobre população residente, distribuição do emprego e movimento diário das populações. São indicadas metodologias que permitem estimar a população presente, o tráfego telefónico gerado e o número de canais telefónicos necessários para uma dada área de serviço. A título ilustrativo, estima-se para a zona de cobertura da Estação Base do Campo Pequeno, a população presente, o tráfego telefónico expectável e o número de canais telefónicos necessários para garantir uma dada qualidade de serviço previamente estabelecida.

Finalmente, no Capítulo 7 são analisados os resultados obtidos, retiradas as conclusões e equacionados os possíveis desenvolvimentos futuros para o trabalho aqui apresentado.

# **CAPÍTULO 2**

### **Dados Geográficos**

Neste Capítulo são apresentados os recursos e os dados necessários para a caracterização geográfica de uma determinada zona de serviço, designadamente, imagens satélite, fotografias aéreas, ortofotomapas, cartografia digital, modelos digitais de terreno e de elevação. A título introdutório, descrevem-se igualmente as técnicas mais usadas na obtenção dos dados geográficos, designadamente, a restituição estereoscópica sobre o modelo tridimensional do terreno dos temas mais relevantes para as necessidades particulares deste tipo de estudo, como sejam, a altimetria da zona, as construções artificiais e a cobertura do terreno.

### 2.1 Introdução

A propagação de ondas electromagnéticas é um fenómeno fortemente dependente da orografia e da geografia da zona onde ela se desenrola, pelo que, para um determinado estudo de cobertura rádio, torna-se necessário aplicar metodologias para a caracterização desse mesmo espaço, nos seus elementos mais significativos. Num estudo de telecomunicações, para estimar o nível do sinal recebido em cada ponto de uma dada zona de serviço, os temas mais relevantes para a caracterização desse espaço geográfico são os que se referem à orografia do terreno, aos índices de ocupação do solo, à existência de cobertura vegetal e aos percursos realizados sobre superfícies aquáticas.

Um dos recursos importantes para a aquisição de informação geográfica para o SIG é a fotografia aérea, tendo como principais vantagens o seu baixo custo, a facilidade de acesso livre à informação a partir do ar e ainda a possibilidade de caracterizar a área em estudo com muito detalhe, que depende fundamentalmente da altura do voo. A partir da fotografia aérea da zona de estudo pode ser determinada a altimetria do terreno, bem como a volumetria dos edifícios e de outras construções importantes, aplicando técnicas de estéreo-restituição. É de salientar que para um determinado estudo de telecomunicações, tal como o aqui apresentado, pode-se justificar técnica e economicamente a obtenção de uma nova cartografia de base a partir de fotografia aérea existente, na qual serão

restituídos apenas os temas relevantes para o mesmo, e especificada com os requisitos de precisão adequados ao uso que se pretende.

A título ilustrativo, inclui-se uma fotografia aérea da zona em estudo, Figura 2.1-1, que poderá ser usada (após rectificação) na restituição de temas específicos, como sejam, edifícios, vegetação, ruas, arvoredo e outros que sejam considerados relevantes para um dado estudo de telecomunicações.



Figura 2.1-1 – Fotografia Aérea Digitalizada da Zona de Estudo (Fonte: IPCC)

Em alternativa ou em complemento à fotografia aérea, podem ser obtidos dados a partir de imagens de satélite para determinar a cobertura vegetal, índices de ocupação do solo e até directamente o MDT, recorrendo a imagens disponibilizadas pelo SPOT, Landsat, Radarsat e outros. Refira-se como exemplo, o lançamento recente do satélite IKONOS da Space Imaging Inc., para uso civil e já em funcionamento desde Setembro de 1999, que permite obter imagens multiespectrais com uma resolução espacial inferior a 1 m. Este satélite permite a obtenção de imagens com uma resolução espacial de 1 m, nas bandas do Azul (0,45-0,53), Verde (0,52-0,61), Vermelho (0,64-0,72) e Infravermelho Próximo (0,77-0,88), com uma gama dinâmica de 11 bits e com uma exactidão posicional circular de 12,2 m em 90 % dos casos. Com a utilização de pontos de controlo no solo podem ser produzidas imagens com uma exactidão horizontal de 2 m. As imagens obtidas, incluindo directamente o MDT, podem ser de grande utilidade para o planeamento de infra-estruturas de telecomunicações, entre outras aplicações. A título ilustrativo da resolução espacial disponível,

apresenta-se na Figura 2.1-2 uma imagem de uma zona de Washington, obtida em 30 de Setembro de 1999, na qual se pode observar que o detalhe espacial conseguido é comparável com o da fotografia aérea da Figura 2.1-1. A imagem satélite tem como vantagem adicional o facto de em termos práticos não ser geralmente necessária a sua ortorectificação, devido à elevada altitude da sua aquisição, tipicamente 600 a 900 km. Nestas circunstâncias a variação da escala na imagem devido à variação do relevo não é muito significativa, podendo ser efectuadas medidas de distâncias e ângulos com a precisão adequada ao estudo realizado.



Figura 2.1-2 – Imagem Satélite de Washington com Resolução de 1 m (Fonte: Space Imaging Inc.)

Em alternativa poderão ser adquiridos ortofotomapas digitais, produzidos a partir de imagens satélite ou de fotografias aéreas já ortorectificadas e georeferenciadas, e que permitem obter dados geográficos com grande precisão de uma dada zona, combinando num só produto a riqueza de informação da fotografia com o rigor do mapa.

De forma a reduzir os custos da produção da cartografia digital necessária para um estudo de telecomunicações é possível uma restituição fotogramétrica por objectivos, ou seja restituir apenas os temas necessários para uma aplicação específica, como por exemplo, a altimetria do terreno e a volumetria das construções.

#### 2.2 Escolha da Ferramenta de SIG

Após a obtenção dos dados geográficos que permitam caracterizar uma zona em estudo, torna-se então necessário dispor de uma ferramenta SIG que possibilite a sua referenciação geográfica e a realização de um conjunto de operações matemáticas, trigonométricas e de análise espacial. Como ferramenta de apoio à resolução do estudo apresentado optou-se por um SIG que funcione sobre um modelo de dados *raster* ou matricial, já que foi considerado o mais adequado para realizar a modelação dos diversos fenómenos em estudo, bem como todo um conjunto de análises espaciais igualmente necessárias. As funcionalidades básicas do SIG a escolher devem incluir a possibilidade de definir imagens (matrizes) com dados do tipo *numérico, byte* ou *real* de forma a contemplar as gamas de valores expectáveis para cada grandeza em estudo e efectuar cálculos matriciais com funções trigonométricas, exponenciais e logarítmicas.

De forma sistemática foi determinado um conjunto de funcionalidades necessárias para o estudo que se pretende levar a cabo, donde resultou a seguinte relação de especificações técnicas a satisfazer pelo SIG que vier a ser utilizado:

- Capacidade de referenciação geográfica de informação com visualização no ecrã.
- Importação de dados das mais variadas fontes externas e formatos.
- Conversão de ficheiros gráficos correspondentes a diferentes elipsóides e/ou projecções cartográficas.
- Extracção e fusão de matrizes.
- Reamostragem de valores por ficheiro de controlo.
- Reclassificação de imagens a partir de ficheiros de valores.
- Manipulação de Modelos Digitais de Terreno (perfis de terreno, declives, orientações, bacias de visão).
- Funções de medição de distâncias entre pontos, perímetro e áreas de polígonos.
- Geração de envolventes (*buffers*) em torno de pontos, linhas e polígonos.
- Determinação de campos de visão correspondentes a pontos de observação específicos.
- Sobreposição de imagens com realização de operações algébricas e booleanas.
- Funções estatísticas sobre as imagens, designadamente, média, máximo, mínimo e desvio padrão, com produção dos respectivos histogramas.
- Construção de filtros de imagem do tipo média, passa-alto, similaridade em que seja possível ao utilizador definir a dimensão e o valor dos elementos da matriz de definição do filtro.
- Capacidade de produção de saídas gráficas com possibilidade de sobreposição de imagens matriciais e vectoriais.

Foi efectuada uma pesquisa no mercado, a fim de avaliar o *software* de SIG disponível que permitissem a realização dos estudos incluídos neste trabalho, tendo sido escolhido o SIG IDRISI, já que responde a todos os requisitos técnicos atrás definidos e trata-se ainda de um produto de baixo custo usado amplamente por inúmeras universidades nacionais e estrangeiras.

### 2.3 Cartografia Digital

Como já referido anteriormente, para o estudo da propagação das ondas electromagnéticas é fundamental a caracterização do espaço geográfico envolvente, sendo necessário dispor de cartografia em formato digital. Caso não exista cartografia digital ou a existente esteja desactualizada, terá de iniciar-se todo o processo de aquisição de informação digital. Se existirem cartas topográficas em papel estas poderão ser digitalizadas e completadas em mesa digitalizadora ou em alternativa rasterizadas em scanner e posteriormente convertidas em formato vectorial, com recurso a software adequado.

No caso de aquisição de uma nova cartografia digital para inserir no SIG, será de extrema importância uma correcta especificação da mesma, em termos do nível de exactidão posicional realmente necessário, ou seja, a exactidão deverá ser apenas a adequada ao fim em vista, de forma a reduzir custos desnecessários. Igualmente no que respeita à representação cartográfica, esta deverá ser especificada de modo a evitar alguns erros comuns, designadamente, curvas de nível interrompidas e objectos representados com detalhes desnecessários, que dificultam a sua integração no SIG. O processo de aquisição de dados para a construção da cartografia digital inicia-se através de voos para levantamento fotográfico da área em estudo. Refira-se que o custo de aquisição da fotografia aérea, incluindo o voo, é pouco significativo, sendo tipicamente da ordem dos 5% do total do custo da cartografia completa. Este facto parece reforçar a ideia da viabilidade económica da aquisição de fotografia aérea actualizada, a uma escala adequada ao fim em vista, mesmo que se destine a ser usada em apenas um único estudo ou projecto de telecomunicações.

As fases fundamentais que compõem a obtenção da cartografia digital são as seguintes:

#### • Cobertura Aerofotográfica

Deverá ser executada uma cobertura aerofotográfica à escala adequada e usar o tipo de filme apropriado ao estudo em questão.

#### Apoio Fotogramétrico

O apoio fotogramétrico é geralmente baseado na geodesia local e compreende os trabalhos que sejam necessários efectuar para determinar as posições planimétricas e altimétricas de pontos de apoio no terreno, para a sua utilização na fase posterior de restituição de coordenadas no modelo tridimensional. Na aquisição de pontos fotogramétricos pode-se recorrer a técnicas de GPS

(Global Positioning System) sendo por vezes necessário um reconhecimento prévio do local e um planeamento do trabalho, que inclui o desenho da rede de pontos a coordenar sobre a cartografia do local. O trabalho de campo com GPS deve ser previamente preparado em gabinete, sendo possível escolher as melhores horas de observação que respeitem um determinado número de satélites visíveis, bem como o PDOP (Position Dilusion of Precision) adequado.

#### Estéreo-restituição Fotogramétrica

A orientação relativa e a absoluta de cada modelo estereoscópico poder-se-á fazer de forma analítica.

#### • Ortofotomapas Digitais

Como elemento complementar para um estudo com maior detalhe espacial é conveniente dispor, de ortofotomapas digitais, já que tendo o rigor geométrico das cartas, fornece informação fotográfica muito mais rica, para a análise do espaço geográfico.

As fases que conduzem à obtenção final dos ortofotomapas digitais são as seguintes:

- Rasterização dos Diapositivos;
- Aquisição de Dados Altimétricos;
- Ortorrectificação.

A ortorrectificação é um processo de reamostragem da imagem, para corrigir a sua geometria, distorcida devido às variações da altimetria do terreno. O operador utiliza uma imagem e o MDT para gerar o ortofotomapa digital. Com o processo de ortorrectificação é removido o efeito de deslocamento dos objectos na imagem, bem como o efeito da variação de escala na fotografia resultante da existência do relevo. Deste modo, obtém-se uma fotografia com uma escala única, sem distorções, e sobre a qual se pode realizar qualquer tipo de medidas geométricas, designadamente, distâncias, áreas e ângulos azimutais.

### 2.4 Imagens Matriciais (Raster)

O modelo de dados Matricial (também designado por quadricular ou *raster*) propõe a divisão da totalidade de uma área de estudo numa grelha regular de células (*pixels*), em que cada uma das células contém inscrito um e só um dado valor numérico, sendo geralmente do tipo *inteiro*, *real* ou *byte*. Este tipo de estrutura de dados tem como vantagem cobrir integralmente todo o espaço geográfico em análise, já que todo e qualquer ponto do espaço tem uma correspondência directa com uma célula, ou seja com um elemento do ficheiro de dados.

O valor inscrito numa determinada célula corresponde a um atributo específico ligado a esse ponto (valor da cota, potência do sinal, cobertura do terreno e outros), ou pode ser apenas um apontador de ligação a uma base de dados exterior onde estão registados os valores de outros atributos (temas). No primeiro caso será necessária uma imagem para cada tema e para cada resultado (mesmo para resultados intermédios), tendo como desvantagem originar uma grande proliferação de ficheiros, geralmente de grandes dimensões; no segundo caso, torna-se necessário usar uma base de dados externa para o registo dos atributos. Por exemplo, a estrutura mais usada no Capítulo 6, referente à análise geoestatística, consiste em imagens nas quais os valores inscritos nas células correspondem a apontadores para linhas de tabelas na base de dados. A vantagem desta abordagem é claramente visível no caso dos estudos relacionados com as freguesias, nos quais a imagem das freguesias é constituída apenas por 53 valores diferentes (código das 53 freguesias de Lisboa) e os valores correspondentes aos vários atributos de cada freguesia (área, população residente, população presente, densidades e outros) poderão ser armazenados em base de dados.

Usando esta abordagem, grande parte dos cálculos matemáticos e estatísticos são efectuados ao nível da base de dados (neste caso é usada a Base de Dados ACCESS da Microsoft), sendo expressos sobre a forma de imagens apenas os resultados significativos, evitando deste modo uma proliferação grande de imagens intermédias sem grande interesse prático.

A estrutura lógica de uma imagem é uma matriz de valores, se bem que na realidade esses valores são registados num ficheiro de uma só coluna, numa forma sequencial, geralmente linha a linha, com origem no canto superior esquerdo da imagem, como é o caso do IDRISI. Por exemplo, uma imagem que fosse constituída pelos seguintes valores,

10	15	9	10	1
1	14	10	11	13
14	13	11	10	12

teria um ficheiro ASCII correspondente na forma:

O ficheiro poderá ser escrito em formato ASCII ou em binário, com ou sem compressão de dados. A técnica de compressão geralmente usada é o RLE (run-length encoding) que regista o número de ocorrências consecutivas de um dado valor. O ficheiro resultante será de menor dimensão se houver um número suficiente de repetições em células consecutivas, caso contrário poderá ficar maior do que se tivesse sido armazenado apenas em formato binário, sem compressão.

As imagens matriciais mais significativas usadas na realização deste estudo são: o Modelo Digital do Terreno, Modelo Digital de Elevação de Edifícios, Áreas de Implantação dos Edifícios, Cobertura Vegetal do Terreno e Áreas de Superfícies Aquáticas e Áreas de Definição de Freguesias. Aplicando um conjunto de funções matemáticas e lógicas sobre estas imagens, obtemos uma sequência de novas imagens referentes aos resultados pretendidos, designadamente, imagens de caracterização da orografia do terreno, padrões de construção, cobertura rádio, densidade de população por freguesias e o tráfego telefónico estimado para áreas de serviço.

### 2.5 Cartografia Vectorial

Neste estudo será utilizada também cartografia em formato vectorial, que servirá fundamentalmente como cartografia de referenciação gráfica, sobreposta às imagens matriciais. Com essa finalidade, foi obtida junto da CML uma cartografia digital de traço em formato DXF, que inclui os temas referentes aos eixos de via, à localização dos edifícios, quarteirões e aos polígonos de definição das freguesias de Lisboa. Um exemplo desta cartografia está indicado na Figura 2.5-1.



Figura 2.5-1 – Cartografia de Traço com um Pormenor da Zona de Estudo em Lisboa

Para utilizar esta cartografia, foi necessário proceder ao seu ajuste e georeferenciação, através de operações de translação, rotação e afectação por um factor de escala adequado, o que foi efectuado com recurso à função *WARPS* disponível no *software* de SIG Geographics [3].

### 2.6 Modelo Digital do Terreno

O MDT pode ser obtido a partir da fotografia aérea estereoscópica de uma zona, construindo-se um modelo tridimensional do terreno. No caso particular deste estudo interessa que o MDT possa incluir o relevo natural, acrescido das construções artificiais e da vegetação que possa cobrir esse mesmo terreno. Genericamente, o processo de construção do MDT realiza-se por restituição das curvas de nível, pontos cotados e linhas de quebra no modelo tridimensional do terreno atrás referido, obtendo-se uma Rede Irregular de Triângulos (RIT ou TIN na terminologia anglo-saxónica), com a descrição completa da orografia do terreno. O Modelo Digital do Terreno é obtido a partir dos dados altimétricos da estéreo-restituição designadamente, curvas de nível, pontos cotados, linhas de quebra, copas de árvores, volumetria de edifícios e de outras construções artificiais.

A construção do MDT passa pela obtenção de uma colecção de pontos ao longo de um perfil predefinido, geralmente com intervalos regulares. As linhas de quebra são obtidas ao longo de rios, valas e cristas. A técnica de obtenção dos pontos para o MDT é essencial para a ortorrectificação da fotografia. Os passos a seguir são os seguintes:

- O estereorestituidor é programado para seguir ao longo de uma determinada linha de perfil no modelo estereoscópico. O operador vê o terreno e garante que o ponto de cota é mantido ao nível do chão, controlando ainda a velocidade à qual vai observando o terreno. Os pontos são colhidos em intervalos de tempo controlados;
- O operador identifica as mudanças significativas de declive (por exemplo, rios, cristas, diques, e quaisquer grandes descontinuidades que possam afectar o MDT) e recolhe pontos ao longo de uma linha de quebra;
- 3. Finalmente, o operador mede pontos individuais que não tinham sido recolhidos, por exemplo, num perfil ou numa linha de quebra, no cimo de montes ou no fundo de vales.

Projectando o TIN obtido sobre uma grelha regular de pontos, obtêm-se os dados altimétricos referentes ao centro de cada quadrícula, organizados segundo uma matriz de valores, na qual a linha e coluna representam as coordenadas geográficas do ponto, em coordenadas rectangulares planas x, y e o valor inscrito nessa posição, representa a cota do terreno h nesse ponto. Relaciona-se a posição linha e coluna da matriz com as coordenadas geográficas reais do ponto no terreno, associando à imagem um ficheiro com o valor das coordenadas dos pontos situados nos vértices opostos da área em estudo.

Sabendo as coordenadas dos extremos e o número de linhas e colunas calcula-se a resolução espacial e as coordenadas reais no terreno de todos os elementos da matriz, ficando assim caracterizada a altimetria do terreno, ou seja a cota associada a cada um dos elementos da matriz regular, gerando deste modo o modelo digital de terreno na forma matricial. Associando esta matriz de valores a uma paleta de cores, obtém-se uma imagem colorida que representa de forma sugestiva o relevo do terreno, como indicado na Figura 2.6-1 para a cidade de Lisboa.

A partir do MDT pode analisar-se a existência de uma linha de vista entre os diversos pontos no terreno e deduzir-se, através de operações matemáticas sobre a matriz de valores, os seguintes elementos:

- declives associados a cada ponto;
- azimutes cartográficos dos declives;
- rugosidade do terreno;
- perfis do terreno, construções e obstáculos de acentuado declive;

Estas operações matemáticas consistem, fundamentalmente, no estudo do contexto espacial da vizinhança do ponto, no qual para cada elemento da matriz são analisados os seus elementos circundantes e inscrito nele o valor resultante da operação em causa. Podem-se aplicar filtros digitais sobre a imagem percorrendo os valores da matriz com uma janela deslizante, geralmente de dimensão 3x3, 5x5 ou 7x7 e inscrevendo no ponto central dessa janela, o valor resultante da aplicação de determinados coeficientes aos pontos que caem dentro dela. Deste modo, aplicando um filtro *passa-baixo* pode-se suavizar os contornos de uma imagem, e aplicando um filtro *passa-alto* pode-se acentuar os seus contornos, permitindo por exemplo identificar os declives susceptíveis de provocar uma difracção significativa de ondas electromagnéticas.

No caso particular deste estudo para a cidade de Lisboa, o MDT foi obtido através do processamento de informação cartográfica digital cedida pelo IgeoE, designadamente, curvas de nível, linhas de água, linhas de quebra, pontos cotados e vértices geodésicos, com recurso ao *software* MGE – Terrain Annalist [4]. O algoritmo usado para a construção do MDT começa por desenhar um triângulo entre 3 pontos e faz passar uma circunferência por esses 3 pontos; se existir algum ponto no interior, apaga o triângulo e desenha um mais pequeno repetindo este processo até desenhar todos os triângulos. Nesta operação é necessário analisar e controlar alguns problemas que podem advir, resultantes de triângulos formados na zona limite da carta. Para contornar este problema, optou-se por definir uma zona de análise mais alargada onde estão incluídos todos os triângulos, e cortar posteriormente a imagem do MDT para a dimensão da zona de estudo pretendida, com a função *Window – Image Windowing* do IDRISI. Deste modo o MDT para a zona é obtido recorrendo apenas a triângulos completos.

Obtido o MDT com recurso ao TIN, converte-se através do software MGE – Terrain Annalist para o modelo matricial, por projecção do mesmo sobre uma matriz definida com uma quadrícula de 8 m, sendo em seguida exportado para o IDRISI em formato texto. Este ficheiro texto com a descrição matricial do MDT tem um formato *row major* sequencial de valores tipo *inteiro*, separados pelo caracter *espaço* do tipo:

#### 

e deverá ser acompanhado por um ficheiro de cabeçalho com as seguintes valores que correspondem às coordenadas no terreno dos cantos da imagem (Sistema de Coordenadas Militares do IgeoE):

CANTO – NW	$X = 104\ 000\ m$
	$Y = 200\ 000\ m$
CANTO - SE	$X = 120\ 000\ m$
	$Y = 190\ 000\ m$

ESPAÇAMENTO : 8 m N.º LINHAS : 1251 N.º COLUNAS : 2001

Para importar de forma automatizada este tipo de ficheiros para o IDRISI foi necessário escrever um programa de conversão - no caso presente em Visual Basic - de forma a compatibilizá-lo com a função de importação IMPORT-SSTIDRI do IDRISI.

Com a função WINDOW o ficheiro é reduzido para a dimensão de 1625 colunas e 1000 linhas que corresponde à área que se pretende estudar, resultando a imagem indicada na Figura 2.6-1.

Importa realçar que o modo de funcionamento interactivo do SIG IDRISI com o utilizador permite obter para qualquer ponto da imagem, o valor da grandeza que lhe está associado, quer seja uma cota de terreno, o ganho direccional de uma antena, ou um valor de previsão de sinal. Existe também a possibilidade de apontar sobre um valor qualquer da legenda e obter de imediato as zonas da imagem onde se verifica esse valor, ou seja, efectuar uma pesquisa pelo valor do atributo, com o resultado na componente gráfica. Esta funcionalidade fundamental do SIG, de obter o valor do atributo por indicação na imagem da sua posição geográfica e de localizar na imagem os pontos com um dado valor de atributo, permite ao utilizador uma grande capacidade interactiva de análise dos resultados obtidos. No entanto, se esses valores se destinarem a uma análise visual fora do ambiente do SIG, então torna-se necessário a produção de mapas em papel, o que tem como limitação fundamental a impossibilidade de apresentar uma legenda, com todos os valores possíveis para o atributo, normalmente correspondentes a 256 níveis de cor. A técnica geralmente usada consiste em reclassificar a imagem para 16 classes de valores, sendo assim possível associar à imagem uma paleta de 16 cores e uma legenda para as cores correspondentes.





Figura 2.6-1 – Imagem do Modelo Digital de Terreno correspondente à carta 431 do IGeoE

Como resultado temos o Modelo Digital de Terreno de Lisboa, representado na Figura 2.6-2 com uma paleta de 16 cores, sendo assim possível incluir uma legenda com os valores das cotas e as cores correspondentes. Assim por exemplo, apontando nesta imagem sobre o valor 178, aparece realçada toda a zona com cotas entre 178 m e 194 m (extremo não incluído); por outro lado apontando sobre qualquer ponto da imagem obtém-se o valor da respectiva classe.



Figura 2.6-2 - Modelo Digital do Terreno de Lisboa Reclassificado em 16 Classes

A partir da imagem do MDT, pode obter-se facilmente qualquer perfil do terreno, através da função PROFILE do IDRISI. Um perfil do MDT de Lisboa pode ser visto a título ilustrativo na Figura 3.4-2.

#### 2.7 Georeferenciação de Elementos

Para a execução deste trabalho, tornou-se necessário recolher um conjunto de dados e medidas no terreno, designadamente, as coordenadas geográficas da localização das antenas e dos pontos do espaço onde se efectuaram as medidas de sinal. Estas coordenadas podem ser obtidas por GPS, em termos de latitudes e longitudes, sendo necessário previamente converte-las para um determinado plano cartográfico e ligá-las a um sistema de coordenadas de referência (georeferenciação). Para tal é necessário efectuar uma transformação de coordenadas do sistema WGS-84 para o sistema Gauss-Militar [5], obtendo as coordenadas planas M, P.

Como equipamento para a georeferenciação dos valores experimentais, pode ser utilizado por exemplo o receptor GPS GeoExplorer II [6] com correcção diferencial em pós-processamento, usando a estação de base existente no IST. Este posicionamento por GPS em modo diferencial é geralmente utilizado em receptores de gama inferior, onde as correcções são feitas posteriormente por comparação entre os ficheiros recolhidos numa estação fixa de referência, cujas coordenadas são conhecidas com rigor e os dados recolhidos num receptor móvel. A correcção do posicionamento só é possível efectuar com precisão se ambos os receptores calcularem a sua posição a partir dos mesmos satélites e as condições da atmosfera percorrida pelo sinal forem semelhantes, o que pode ocorrer mesmo até afastamentos da ordem de muitas dezenas de quilómetros. O *software* de correcção diferencial em pós-processamento incluí geralmente a conversão dos dados para inúmeros sistemas de referência, incluindo o usado em Portugal nas cartas militares (Gauss-Militar). A precisão das medidas obtidas pelo processo diferencial em pós-processamento, com um tempo de estacionamento relativamente baixo e um PDOP (Position Dilution of Precision) < 5, permite-nos obter uma precisão da ordem do metro, perfeitamente adequada ao fim em vista e com um custo baixo por ponto medido.

Uma vez determinadas as coordenadas de latitude e longitude por posicionamento espacial GPS é necessário transformá-las nas coordenadas geográficas definidas pelo elipsóide e pelo datum usados em Portugal. É importante realçar que para um qualquer ponto situado na superfície da terra existe uma grande quantidade de diferentes latitudes e longitudes associadas, dependentes do sistema de coordenadas geodésicas considerado. Uma vez que os vários temas podem ter informação proveniente de diversos sistemas de georeferenciação, torna-se fundamental compatibilizá-los, caso contrário podem surgir erros de posicionamento da ordem das muitas dezenas de metros entre os diversos temas, inviabilizando algumas operações de análise da correlação entre eles. Em seguida, é necessário transformar as coordenadas esféricas num plano de coordenadas cartesianas, através de uma projecção cartográfica. A projecção de uma esfera num plano não pode ser feita sem distorções. No entanto

usando uma projecção conforme como a de Gauss (Transversa de Mercator) as distâncias e as direcções podem ser preservadas na transformação sem erro significativo para o estudo. É comum a existência nos SIG de funções de conversão entre diversos sistemas de coordenadas, sendo no IDRISI esta função realizada pelo módulo PROJECT.

Para a conversão das coordenadas das antenas e dos pontos de medida, torna-se necessário definir e associar um ficheiro de referência à imagem, com os parâmetros específicos para o sistema cartográfico português, designados por constantes de Molodensky [7]. Os dados indicados para a transformação de Dt73 Hayford para WGS84 em Portugal são, segundo o serviço de Geodesia do IPCC, os seguintes:

 $\begin{array}{l} \Delta X = -223,01\\ \Delta Y = +110,13\\ \Delta Z = +36,59 \end{array}$ 

Estes três valores representam o vector diferença dos centros do elipsóide do datum em relação ao elipsóide do WGS84.

Quando a localização dos pontos onde se realizam as medidas for obtida por GPS em coordenadas UTM, estas deverão ser convertidas para o Sistema Hayford-Gauss, a fim de ficarem compatíveis com as coordenadas das cartas militares e do MDT usados. Para tal efectua-se uma transformação directa entre os dois sistemas de coordenadas planas (X,Y) e (U,V) com a qual é possível em um deles exprimir as coordenadas do outro do seguinte modo:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = f(\mathbf{U}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{Y} = g(\mathbf{U}, \mathbf{V}) \end{cases}$$
(2.1)

Para transformar as coordenadas de um sistema no outro poderá ser necessário efectuar operações de translação, rotação, afectação de um factor de escala, assim como outras deformações que permitam modelar a relação entre os dois sistemas. A transformação geralmente usada é uma transformação polinomial de grau 2, para a qual são necessários no mínimo 6 pontos de controle, ou seja é necessário saber as coordenadas exactas de 6 pontos em ambos os sistemas, obtendo-se para cada ponto duas equações lineares.

A expressão genérica da transformação polinomial de grau 2 para a conversão de coordenadas UTM WGS84 em coordenadas militares tem a seguinte forma:

$$\begin{cases} X_{mil} = A_1 + B_1 X_{utm} + C_1 Y_{utm} + D_1 X_{utm}^2 + E_1 X_{utm} Y_{utm} + F_1 Y_{utm}^2 \\ Y_{mil} = A_2 + B_2 X_{utm} + C_2 Y_{utm} + D_2 X_{utm}^2 + E_2 X_{utm} Y_{utm} + F_2 Y_{utm}^2 \end{cases}$$
(2.2)

para um dado conjunto de 51 pontos de controle, obteve-se os parâmetros de transformação a seguir indicados, que aplicados em (2.2) permitem a conversão de coordenadas UTM em coordenadas Militares:

 $\begin{array}{l} A_1 = -3,7739762894736 \ x \ 10^5 \\ B_1 = +9,9932240605810 \ x \ 10^{-1} \\ C_1 = -9,0973134188858 \ x \ 10^{-3} \\ D_1 = +8,3148687755284 \ x \ 10^{-10} \\ E_1 = -1,3820829475817 \ x \ 10^{-10} \\ F_1 = -8,9857048411614 \ x \ 10^{-10} \\ A_2 = +4,0897941221000 \ x \ 10^6 \\ B_2 = +9,1711361760796 \ x \ 10^{-3} \\ C_2 = +9,9928310427206 \ x \ 10^{-1} \\ D_2 = -1,3640358654065 \ x \ 10^{-10} \\ E_2 = +1,7418262380700 \ x \ 10^{-9} \\ F_2 = -1,0470929467818 \ x \ 10^{-11} \end{array}$
# **CAPÍTULO 3**

## Classificação de Ambientes de Propagação

Neste Capítulo, desenvolvem-se metodologias de classificação de ambientes, que permitam caracterizar geograficamente uma dada zona, com o propósito de estudar a propagação de ondas electromagnéticas em comunicações móveis. A título ilustrativo, classifica-se o ambiente de propagação na área de Lisboa, com base nas variáveis geográficas mais significativas, designadamente, densidades de construção, ondulação e inclinação do terreno, tipo de ocupação do terreno, linhas de vista, percursos terra-água e planos de cota constante. A informação geográfica básica a manipular consiste em imagens com a área de implantação e altimetria dos edifícios, com o tipo de cobertura do solo e o MDT.

## 3.1 Introdução

A aplicação de modelos de propagação de ondas como o de Okumura-Hata [8] (a cuja implementação se refere o Capítulo 4) requer um conhecimento prévio das zonas envolventes e a sua classificação em ambientes padronizados. As metodologias de classificação de ambientes que se desenvolvem neste trabalho, estão fundamentalmente dirigidas para a aplicação em telecomunicações, se bem que este tipo de análise possa encontrar aplicação em outras áreas de actividade, onde seja necessário o conhecimento e a caracterização de um dado espaço geográfico.

A abordagem seguida para a resolução do problema da classificação de ambientes passa pela classificação padronizada das zonas em estudo, em que para cada uma se poderá escolher o modelo de propagação de ondas mais adequado, o que poderá ser sintetizado em três grandes categorias [9]:

- áreas abertas ausência de obstáculos numa região de pelos menos 300 m a 400 m diante do móvel;
- áreas suburbanas existência de alguns obstáculos, não muito densos, na região próxima do móvel;
- áreas urbanas região com grande densidade urbanística, e edifícios com 2 ou mais andares.

Um parâmetro proposto para quantificar a referida classificação é o Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) [10], o qual é definido pela razão entre a área bruta dos edifícios e a área do terreno onde estão implementados. Tipicamente temos,

- Urbano, para COS >1
- Suburbano, quando  $COS \approx 0.4$
- Rural, para COS < 0,1

Com base em outros índices que serão obtidos em secções posteriores, as 3 classes de ambientes anteriormente descritas, podem ser refinadas nas seguintes subdivisões [11]:

• 1 - rural

- A plano
- B-ondulado
- C montanhoso
- 2 suburbano
  - A residencial com espaços
  - B residencial sem espaços
  - C-residencial muito densa
- 3 urbano
  - A comercial
  - B serviços
  - C industrial

A classificação de ambientes com vista à determinação dos parâmetros de correcção aplicáveis aos modelos de propagação obriga, igualmente, a calcular os seguintes parâmetros [9]:

- Altura da ondulação do terreno
- Altura e distância a um objecto isolado
- Inclinação média do terreno
- Trajectos mistos sobre superfícies aquáticas
- Densidade da vegetação
- Densidade e altura dos edifícios
- Existência de áreas abertas
- Caracterização do terreno

Com base no cálculo do valor de COS poderá ser escolhido o modelo de propagação mais adequado para uma dada zona de estudo. No entanto, qualquer que seja o modelo escolhido, este poderá ter um

conjunto de parâmetros de correcção empíricos, relacionados directamente com as características geográficas e orográficas do terreno, os quais serão igualmente calculados neste Capítulo para o modelo de Okumura-Hata.

As imagens mais significativas para a caracterização de uma determinada zona (área de serviço), num estudo de telecomunicações, são as referentes ao MDT, altura dos edifícios, área de implantação dos edifícios e tipo de cobertura do solo. Sobre essas imagens que caracterizam uma dada zona nas suas componentes geográficas, demográficas e urbanísticas, torna-se necessário calcular um conjunto de índices que a descrevem em termos quantitativos. Para calcular esses índices, cada imagem é dividida em parcelas de terreno suficientemente pequenas, que possam ser consideradas homogéneas relativamente às grandezas observadas, e em seguida são determinados os valores estatísticos que caracterizam cada uma dessas parcelas. Em termos dimensionais, as áreas de serviço a analisar podem ser dos seguintes tipos:

- Pico-células, com uma dimensão inferior a 100 m;
- Micro-células, com uma dimensão entre 100 m e 1000 m e;
- Macro-células, pequenas de 1 km a 3 km e grandes com mais de 3 km.

Para cada parcela considerada homogénea, deverão ainda ser calculadas as seguintes variáveis geoestatísticas, a fim de caracterizar os diversos ambientes de forma mais detalhada [13]:

- Índice da Área Edificada IAE;
- Distribuição da Altura dos Edifícios DHE;
- Coeficiente de Ocupação do Solo COS;
- Índice de Ondulação do Terreno IOT;
- Índice de Vegetação IV.

A título ilustrativo, será feita uma caracterização de Lisboa, relativamente à área de implantação, altura e número de pisos dos seus edifícios. Estas imagens serão usadas posteriormente para o cálculo de vários índices, designadamente, o Índice da Área Edificada, a Distribuição da Altura dos Edifícios e o Coeficiente de Ocupação do Solo. A imagem com a área de implantação dos edifícios em Lisboa é indicada na Figura 3.1-1, sendo a sua resolução espacial de 8 m no terreno (quadrícula de 8 m).

#### Área de Implementação de Edifícios



Figura 3.1-1 – Área de Implementação de Edifícios

A vermelho temos indicadas as áreas onde existem edifícios construídos e a branco as áreas sem qualquer construção. Pode-se observar uma maior concentração de construções na zona central de Lisboa (Baixa e Avenidas Novas) e nas zonas ribeirinhas (junto ao rio Tejo). Em Monsanto (Parque Florestal) verifica-se a existência de apenas algumas construções dispersas, sendo a área de implantação de edifícios mínima.

Outra imagem importante para a caracterização de uma dada zona é a referente à altura dos edifícios. Para a obtenção dessa imagem, partiu-se das cotas dos topos dos edifícios fornecida pelo IgeoE e subtraíram-se as cotas do terreno definidas na imagem do MDT. Esta operação de subtracção de imagens, é realizada pelo módulo OVERLAY (subtract) e corresponde à aplicação da seguinte expressão:

A imagem resultante, correspondente à altura dos edifícios é indicada na Figura 3.1-2, onde se pode observar que os edifícios de maior altura, assinalados a turquesa e amarelo, se situam predominantemente na zona central de Lisboa.



Figura 3.1-2 – Altura dos Edifícios de Lisboa

Conhecida a altura dos edifícios e estimada a altura de piso (neste caso considerou-se 2,8 m), obtém-se uma imagem com o número de pisos estimados. Esta imagem é obtida dividindo a imagem com a altura dos edifícios pelo valor da altura do piso. A fim de produzir um mapa impresso de leitura mais sugestiva, é feita uma reclassificação da imagem do número de pisos, usando o módulo RECLASS de acordo com a Tabela 3-1.

Classe	Valor Mínimo Pisos	Valor Máximo Pisos	Legenda
0	0	1	0 Pisos
1	1	2	1 Piso
2	2	3	2 Pisos
3	3	4	3 Pisos
4	4	5	4 Pisos
5	5	6	5 Pisos
6	6	7	6 Pisos
7	7	8	7 Pisos
8	8	9	8 Pisos
9	9	10	9 Pisos
10	10	11	10 Pisos
11	11	12	11 Pisos
12	12	13	12 Pisos
13	13	14	13 Pisos
14	14	15	14 Pisos
15	15	100	> 15 Pisos

Tabela 3-1 - Valores de Reclassificação do Número de Pisos de Edifícios

Em resultado da referida reclassificação obtém-se uma nova imagem com o número de pisos dos edifícios de Lisboa por classes, indicada na Figura 3.1-3.



Figura 3.1-3 – Número de Pisos por Edifício por Classes

Pode observar-se na imagem, que Lisboa se caracteriza pela predominância de construções baixas (edifícios com menos de 5 pisos), existindo no entanto alguns edifícios mais altos na zona central (Avenidas Novas), mas muito dispersos geograficamente.

## 3.2 Construção das Imagens de Definição de Zonas

Como já foi referido o objectivo deste Capítulo consiste, fundamentalmente, em calcular os índices necessários para caracterizar a geografia e a orografia de uma dada zona de estudo, com base em imagens relativas ao MDT, ao Modelo Digital de Elevação (MDE) de edifícios, à ocupação do solo por construções, à cobertura vegetal do terreno e aos percursos mistos terra-água. Esses índices deverão ser calculados para pequenas parcelas de terreno nas imagens correspondentes aos temas analisados. Para tal torna-se necessário dividir a imagem em parcelas suficientemente pequenas para que possam ser consideradas homogéneas, calcular para cada uma os índices de caracterização e construir as diversas imagens com essa informação.

A geometria dessas parcelas poderá ter qualquer forma geométrica, sendo aqui analisados apenas dois tipos considerados mais significativos:

1. Forma quadricular, que corresponde a dividir toda a imagem em quadrículas, tal como indicado na Figura 3.2-1.



Figura 3.2-1 – Áreas Quadradas de 400 m para Análise do Terreno (Quadrículas)

2. Forma de coroas circulares divididas em sectores polares centrados na localização geográfica do ponto de interesse, tal como indicado na Figura 3.2-2.



Figura 3.2-2 – Sectores Polares de Análise de Terreno de 400 m e 5 °

Para calcular sobre uma imagem os índices no interior de qualquer parcela, é necessário construir previamente uma imagem com a definição da geometria dessas parcelas. Isto será feito para cada uma das duas situações apresentadas, quadricular e sector polar. Cada área individualizada terá inscrito um código único, que serve de ligação a uma linha de uma tabela na base de dados de atributos. As imagens de definição das zonas homogéneas de análise serão obtidas através da combinação de várias funções disponíveis no SIG, designadamente, o calculo de distâncias, de azimutes, reclassificação, operações matemáticas e agrupamentos de pixels, apresentando como exemplo de uma quadrícula de análise, a imagem da Figura 3.2-3.



Figura 3.2-3 - Imagem de Definição de Parcelas Quadriculares para Análise Estatística

O cálculo dos índices é feito recorrendo à imagem com a informação sobre o tema e à imagem com a definição das parcelas. Pode então ser usada a função de EXTRACT, que permite extrair da imagem em análise um conjunto de informações estatísticas para cada parcela, designadamente, o valor máximo, o valor mínimo, o desvio padrão, a gama de amplitude e a soma dos valores dos atributos que caem dentro da respectiva parcela. A função EXTRACT do módulo DATABASE WORKSHOP permite extrair da imagem a informação estatística referida e armazená-la numa tabela da Base de Dados. Usa uma imagem de definição das parcelas (constituída pelos códigos de identificação de cada parcela) e a imagem com o tema a analisar. Na Base de Dados, usando comandos SQL (Structured Query Language) é possível efectuar todo o tipo de cálculos matemáticos e manipulação dos dados das diversas imagens. Inversamente, com a informação armazenada na Base de Dados e a imagem de definição das função ASSIGN, produzir as imagens referentes aos temas pretendidos, designadamente, Índice da Área Edificada, Distribuição da Altura dos Edifícios, Coeficiente de Ocupação do Solo, Índice de Ondulação do Terreno e Índice de Vegetação.

Neste estudo, são incluídas as duas formas anteriormente indicadas para o cálculo dos índices, caracterizadas pelo uso da primeira ou da segunda imagem de definição de parcelas. Cada uma delas é seleccionada consoante a aplicação pretendida: a parcela quadricular poderá ser mais útil para o caso de um estudo prévio no qual ainda não se sabe qual a localização exacta da Estação Base (EB), enquanto que a parcela definida por coroas circulares divididas em sectores polares, poderá ser mais útil num projecto de implementação de uma EB, ou na análise de uma dada instalação existente (nesta situação, a localização da EB já está bem definida, podendo-se centrar a análise em torno da sua localização geográfica). Por exemplo, no caso de um estudo prévio, quando ainda não foi definida a localização exacta da EB, pretende-se geralmente um conhecimento aproximado e global da zona de serviço. Neste caso o procedimento adoptado consiste em dividir toda a área de estudo em parcelas quadradas de 400 metros de lado, consideradas zonas homogéneas em termos geoestatísticos, como indicado na Figura 3.2-1. Para cada uma delas, são calculados os valores dos parâmetros atrás

indicados, com base no modelo digital do terreno e no modelo digital de elevação de edifícios. Por outro lado, nas situações em que já está definida a localização da EB, pretende-se centrar a análise em torno desta. Neste caso, o procedimento adoptado consiste em definir áreas delimitadas por sectores polares de 5 ° dentro de envolventes de raio de 400 m, centrados na localização da EB, como indicado na Figura 3.2-2. Esta última definição das áreas de análise tem como principal vantagem, relativamente à anterior, o facto de caracterizar melhor as áreas mais próximas do ponto de interesse (áreas mais pequenas) e centrar a área de análise num ponto determinado (geralmente a localização da EB), o que consequentemente irá permitir uma análise mais fina dos parâmetros de caracterização desse espaço.

Grande parte das estações base instaladas ou a instalar no futuro são do tipo sectorial (geralmente sectores de 120°). Assim contemplou-se a possibilidade de efectuar a análise apenas segundo um dado sector. Nesse sentido, pode-se definir um sector circular polar em torno da EB, de modo a caracterizar o terreno circundante apenas numa dada direcção, para um sector típico de 120° ou para qualquer outro valor conforme o tipo de antena usado. A escolha de um sector típico de 120° ou de um sector real, conforme a antena em causa, pode visar dois propósitos distintos:

- 1. O apoio ao projecto de implementação de novas antenas
- 2. A análise de antenas já instaladas

Para a primeira situação, será considerada uma antena sectorial típica com 3 sectores de 120 ° que corresponde a uma imagem obtida por reclassificação da imagem de azimutes da forma indicada na Tabela 3-2

Valor Inferior (graus)	Valor Superior (graus)	Reclassificação
0	60	1
60	180	2
180	300	3
300	360	1

Tabela 3-2 - Valores de Reclassificação para uma Antena Sectorial

Neste caso particular, considerando o Sector C da Estação Base do Campo Pequeno e um sector de 120 °, dirigido segundo um azimute de 240 °, resulta uma imagem tal como a indicada na Figura 3.2-4.



Figura 3.2-4 - Caracterização do Sector C da Estação Base do Campo Pequeno

Para o segundo caso, a reclassificação poderá ser feita de acordo com a antena que efectivamente for usada, recorrendo para tal a um ficheiro de descrição da antena e às funções de reclassificação baseadas em ficheiro, disponíveis no SIG.

## 3.3 Ocupação do Terreno por Construções

A título ilustrativo, é feita a classificação do ambiente de propagação para a cidade de Lisboa, com base no cálculo dos índices atrás indicados. A área de Lisboa analisada está indicada no ortofoto apresentado na Figura 3.3-1 e é definida aproximadamente pelos limites da carta n.º 431 do IgeoE.

Como já referido anteriormente, o tipo de ocupação do solo numa dada zona pode determinar de forma muito significativa qual o modelo de propagação mais adequado para efectuar a previsão do sinal recebido em qualquer ponto da área de serviço. Nesse sentido, serão calculados em seguida um conjunto de índices que permitam caracterizar a área de Lisboa indicada.

#### Índice da Área Edificada - IAE

O Índice da Área Edificada (IAE) é definido como a percentagem de área ocupada com edifícios, relativamente à área total. Como já referido, este índice será calculado para cada parcela de terreno de análise, que neste caso particular será uma quadrícula de 400 m, Figura 3.2-3. O cálculo é feito com base na imagem de implantação de edifícios (na qual o pixel onde existe construção tem o valor 1 e onde não existe construção tem o valor 0), Figura 3.1-1 e na imagem de definição de parcelas que contém o código da parcela.



Figura 3.3-1 - Ortofoto da Zona de Estudo de Ambientes obtido de dados do CNIG

O primeiro passo, consiste em construir uma tabela na base de dados com 660 linhas (número de parcelas individuais), com um atributo (ID) corresponde ao código identificador de cada parcela. Esta operação é realizada automaticamente pela função FILL RANGE (0, 659) do módulo DATABASE WORKSHOP do IDRISI. Em seguida, com a função EXTRACT STATISTICAL SUMMARY FROM IMAGE (TOTAL - SUM), são calculados o valor da área edificada por parcela e o valor da área da parcela. Este valor pode não ser igual para todas as parcelas, situação que ocorre nos limites da imagem, onde a área das parcelas incompletas pode ser muito menor. Já na análise por sectores, a efectuar seguidamente, as parcelas têm naturalmente áreas diferentes, do centro para a periferia.

O valor do índice é dado por:

$$IAE =$$
área edificada / área da parcela (3.1)

Dividindo na base de dados o valor da área edificada pelo valor da área da parcela com o comando SQL

**UPDATE** [tabela] **SET** [IAE] = [área edificada] / [área da parcela],

obtemos uma coluna com os valores IAE que são associados a uma nova imagem através da função ASSIGN FIELD VALUES TO IMAGE. A imagem resultante está indicada na Figura 3.3-2, na qual as quadrículas em branco correspondem às zonas não edificadas ou seja, onde o índice de área edificada é igual a zero.



Figura 3.3-2 – Índice de Área Edificada (IAE) Calculado sobre Quadrículas

A vermelho temos indicadas as zonas onde o Índice de Área Edificada é maior atingindo o valor máximo de 0,6 e a branco as áreas sem qualquer construção sendo o valor do índice igual a 0. Pode-se observar uma maior concentração de construções na zona central de Lisboa (Baixa e Avenidas Novas) e nas zonas ribeirinhas (junto ao rio Tejo). Em Monsanto (Parque Florestal) verifica-se a existência de apenas algumas construções dispersas, sendo a área de implantação de edifícios mínima. No entanto caso exista uma só construção o índice deixa de ser 0, o que explica que a zona de Monsanto não esteja toda representada em branco.

Efectuando o mesmo cálculo, para parcelas definidas por sectores polares (de 400 m de raio e 5° de abertura), obtemos a imagem indicada na Figura 3.3-3.

Percentagem de Área Ocupada por Edifícios - IAE



Figura 3.3-3 – Índice de Área Edificada (IAE) Calculado sobre Sectores

Esta definição das parcelas de análise tem como principal vantagem, relativamente à anterior, o facto de caracterizar melhor as áreas mais próximas do ponto de interesse (áreas mais pequenas) e centrar a área de análise num ponto determinado (a localização da EB), o que consequentemente permite uma análise mais fina do índice.

#### Distribuição da Altura dos Edifícios - DHE

A distribuição da altura média dos edifício, corresponde ao cálculo do valor médio da alturas dos edifícios numa dada parcela de terreno. O cálculo pode efectuar-se de acordo com os procedimentos atrás indicados para o IAE, usando agora a seguinte expressão:

É de salientar que este cálculo não é uma média simples de alturas na parcela de análise, pois não se pretende uma altura média da zona (com o valor zero quando não há edifícios), mas sim a altura média dos edifícios na zona. Caso se pretenda a valor em número de pisos, divide-se o valor anterior pela altura por piso, que será aqui estimada em 2,8 m, obtendo-se a imagem indicada na Figura 3.3-4.



Figura 3.3-4 – Distribuição da Altura Média dos Edifícios (DHE) Calculado sobre Quadrículas

A vermelho temos indicadas as zonas onde o Índice da Altura Média dos Edifícios é maior atingindo o valor máximo de 12 pisos e a branco as áreas sem qualquer construção sendo o valor do índice igual a 0 pisos. Pode-se observar uma maior concentração de construções na zona central de Lisboa (Baixa e Avenidas Novas). Em Monsanto (Parque Florestal) verifica-se a existência de apenas algumas construções dispersas, sendo a altura média dos edifícios mínima.

Efectuando o mesmo cálculo para sectores polares, obtemos a imagem indicada na Figura 3.3-5.



## Altura Média dos Edifícios (m)

Figura 3.3-5 – Distribuição da Altura Média dos Edifícios (DHE) Calculado sobre Sectores

Tal como referido para o índice anterior, esta definição das parcelas de análise tem como vantagem o facto de caracterizar melhor as áreas mais próximas do ponto de interesse (áreas mais pequenas) e centrar a área de análise num ponto específico o que permite uma análise mais fina do índice em estudo.

#### Coeficiente de Ocupação do Solo -COS

O coeficiente de ocupação do solo é um parâmetro usado para caracterizar o grau de densidade urbanística de uma dada zona. É definido como a razão entre a área bruta dos edifícios e a área do terreno onde estão implantados. Usando os procedimentos já anteriormente referidos, o valor do COS para Lisboa é dado por,

A soma da área total do edifício é obtida com a função EXTRACT (Sum) sobre a imagem que contém número de pisos e o valor de COS é dado pela expressão indicada, sendo calculado na Base de Dados através do comando SQL,

**UPDATE** [tabela] **SET** [COS] = [Soma das Áreas Totais dos Edifícios] / [área da parcela]

Ligando o atributo COS da tabela a uma nova imagem (função ASSIGN), obtemos a distribuição espacial do índice, tal como está indicado na Figura 3.3-6.



Figura 3.3-6 - Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) Calculado sobre Quadrículas

A vermelho temos indicadas as zonas onde o Coeficiente de Ocupação do Solo é maior atingindo o valor máximo de 4 e a branco as áreas sem qualquer construção sendo o valor do índice igual a 0. Pode-se observar uma maior concentração de construções na zona central de Lisboa (Baixa e Avenidas Novas). Em Monsanto (Parque Florestal) verifica-se a existência de apenas algumas construções dispersas, sendo a ocupação do solo mínima.

Efectuando o mesmo cálculo, para parcelas definidas por sectores polares, obtemos a imagem indicada na Figura 3.3-7.



Coeficiente de Ocupação do Solo - COS

Figura 3.3-7 - Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) Calculado sobre Sectores

Tal como referido para o índice anterior, esta definição das parcelas de análise apresenta a vantagem de caracterizar melhor as áreas mais próximas do ponto de interesse e centrar a área de análise num ponto específico.

Reclassificando a imagem do COS de acordo com o seguinte critério,

- Área Urbana para COS >1
- Área Suburbana quando COS < 1
- Área Quasi-Aberta para COS < 0,4
- Área Aberta para COS < 0,1

obtemos uma imagem de caracterização da densidade urbanística por classes, indicada na Figura 3.3-8.



Figura 3.3-8 - Coeficiente de Ocupação do Solo (COS) de Lisboa por Classes

Analisando a imagem apresentada na Figura 3.3-8, constata-se que a zona de estudo, centrada na estação base do Campo Pequeno, pode ser considerada uma área urbana, para efeito da futura selecção do modelo de propagação mais adequado.

#### 3.4 Ondulação do Terreno

A altura da ondulação do terreno, ( $\Delta h$ ), é um elemento importante para a caracterização de uma dada zona e pode ser obtido a partir da imagem do MDT indicada na Figura 2.6-1. Para a determinação da ondulação do terreno são apresentados dois métodos alternativos, que se passam a descrever. No primeiro método é aplicado um filtro de média ao MDT e em seguida é comparada a imagem filtrada com a não filtrada, obtendo uma imagem com a variação contínua de  $\Delta h$ . No segundo método é calculado um  $\Delta h$  para cada parcela de análise, do mesmo modo que foram calculados os índices anteriores.

#### 1º Método por aplicação de um filtro passa-baixo

Para a determinação da altura média do terreno numa área de 400 m de lado aplica-se um filtro *passa-baixo* constituído por uma matriz de 50 por 50 elementos. Cada elemento da imagem corresponde no terreno a 8 metros, pelo que a matriz do filtro com 50 por 50 elementos corresponde a 400 m por 400 m no terreno. A matriz do filtro é construída usando a função FILTER, introduzindo os 2 500 elementos que a constituem.

Seguidamente, faz-se deslizar esta janela (matriz de filtragem) sobre o MDT, contabilizando para cada ponto do MDT o produto do seu valor por 1/2500 e inscrevendo no ponto central o somatório dos

2 500 pontos calculados. Em seguida a janela desliza uma posição para a esquerda e repete-se os cálculos indicados, terminando o processo depois de percorrer todos os pontos do MDT.

Os elementos do filtro de Média 50 x 50 são os seguintes:

Coluna 1		Coluna 50		
Linha 1 -	1/2 500	1/2 500		1/2 500
Linha 50 -	1/2 500	1/2 500		1/2 500

Após a aplicação do referido filtro ao MDT obtém-se a imagem indicada na Figura 3.4-1.



Figura 3.4-1 - Imagem do MDT Após Aplicação do Filtro de Média de 400 m

O resultado obtido com o filtro de média pode ser verificado mais facilmente através da análise dos perfis calculados em ambas as imagens. Esses perfis calculados segundo uma dada direcção, estão representados na Figura 3.4-2.



Figura 3.4-2 – Perfil Longitudinal do MDT sem e com Filtragem

Em seguida é obtida uma imagem com o dobro do valor absoluto das diferenças entre o MDT filtrado e não filtrado, que se considera uma boa medida da ondulação do terreno  $\Delta h$ .

#### 2º Método por Cálculo da Média e do Desvio Padrão

O segundo método utilizado, calcula o índice de ondulação do terreno para cada parcela, quer para quadrículas, quer para sectores, tal como indicado nas Figura 3.2-1 e Figura 3.2-2. Neste método, para cada zona considerada homogénea, é calculado o desvio padrão através da função EXTRACT, sendo construída uma imagem com a função ASSIGN, associando a cada zona um valor correspondente a 2,5 vezes o desvio padrão, o que corresponde aproximadamente à variação de cotas entre os 10% e 90%, se considerarmos uma distribuição normal da variação em torno da média.

Para a análise definida por quadrículas, obtemos a imagem indicada na Figura 3.4-3.



Índice de Ondulação do Terreno - IOT

Figura 3.4-3 - Índice de Ondulação do Terreno (IOT) Calculado Sobre Quadrículas

Como se pode observar na imagem, as zonas de maior ondulação do terreno, assinaladas em tons de vermelho, correspondem às colinas de Lisboa e à zona de Monsanto. Na zona de implantação da EB do Campo Pequeno o Índice de Ondulação do Terreno é mínimo.

Para zonas definidas por sectores polares, obtemos a imagem indicada na Figura 3.4-4.

Índice de Ondulação do Terreno - IOT



Figura 3.4-4 - Índice de Ondulação do Terreno (IOT) Calculado Sobre Sectores

Como se pode observar nesta imagem, os resultados são semelhantes aos obtidos anteriormente, sendo que esta definição das parcelas de análise apresenta a vantagem de caracterizar melhor as áreas mais próximas do ponto de interesse e centrar a área de análise num ponto específico.

### 3.5 Inclinação do Terreno

Outro aspecto importante na previsão de sinal relaciona-se com a determinação dos declives do terreno, medidos a partir da antena (declives vistos pela antena). Estes declives podem ser calculados a partir da imagem com as cotas do terreno ou seja a partir do MDT.

O declive do terreno  $\theta_i em mrad para uma determinada zona é dado por:$ 

$$\theta_{i \, [mrad]} = 1000 \cdot tg^{-1}(\Delta_{b}/d) \tag{3.4}$$

onde,

 $\Delta_h$  - representa a variação da cota média de uma zona para a seguinte e,

d - representa a distância de uma zona à seguinte.

O cálculo da inclinação média do terreno  $\theta$ *i* é efectuado ao nível da base de dados, usando para tal os comandos SQL necessários. É calculada a variação da cota média de uma parcela para a seguinte, na direcção radial, divide-se este valor pela distância entre as parcelas (valor constante igual a 400 m), determina-se a tg<sup>-1</sup> e multiplica-se o resultado por 1000. Os valores do atributo  $\theta_i$ , em mrad, são

associados através da função ASSIGN, a uma nova imagem, que representa o declive do terreno para cada parcela, tal como indicado na Figura 3.5-1.



Declives Medidos Segundo Radiais Centradas na EB (mrad)

Figura 3.5-1 - Declives Calculados Segundo Radiais Centradas na EB

Nesta imagem os declives positivos vistos da localização da EB (encostas ascendentes) são representados a tons de vermelho, enquanto que os declives negativos (encostas descendentes) são representados em tons de verde. Na imagem obtida, são bem visíveis as encostas ascendentes e descendentes, correspondentes às colinas de Lisboa e à zona de Monsanto.

## 3.6 Cobertura Vegetal do Terreno

O tipo de cobertura do terreno tem uma importância significativa na determinação da atenuação das ondas electromagnéticas, num dado percurso do sinal. Com este objectivo, interessa determinar qual a percentagem de terreno ocupado por vegetação, ou seja em calcular o Índice de Vegetação (IV), para cada uma das parcelas de análise.

As zonas verdes consideradas neste estudo, correspondem às zonas indicadas a verde na Figura 3.6-1 e foram obtidas a partir da cartografia digital fornecida pelo IGeoE.



Figura 3.6-1 – Imagem da Cobertura Vegetal do Terreno de Lisboa

Importa também referir que a existência de árvores nas ruas pode influenciar de forma significativa as condições de propagação. No entanto, a cartografia disponível à escala 1:25:000 não referencia com o detalhe necessário este tipo de vegetação, pelo que não é possível considerá-la neste estudo. Se fosse possível dispor da fotografia área ou dos ortofotos, correspondentes aos voos efectuados para a produção da cartografia de Lisboa à escala 1:1000, seria viável em termos práticos restituir com detalhe este tema específico e assim contabilizar de forma mais rigorosa a atenuação provocada pela existência de determinado tipo de vegetação, designadamente, a existência de árvores de porte significativo nas vias.

Usando a imagem de definição de parcelas, definida pelas quadrículas de 400 m (Figura 3.2-3) e a imagem da cobertura vegetal, indicada na Figura 3.6-1, obtemos uma nova imagem correspondente ao Índice Vegetação, indicada na Figura 3.6-2, que corresponde à percentagem de área com cobertura vegetal, relativamente à área total da respectiva parcela.

O cálculo é efectuado ao nível da base de dados, tal como para os índices já referidos anteriormente, e é dado por,

$$IV = Area verde / Area da parcela de análise$$
 (3.5)

O valor total de área verde, existente em cada parcela é obtido com recurso à função EXTRACT (SUM), que determina esses valores e os insere na tabela da base de dados de atributos. Os valores de IV são calculado na base de dados, através de comandos SQL e com a função ASSIGN esses valores são associados a uma nova imagem, resultando para o caso de Lisboa, a imagem indicada na Figura 3.6-2.



Figura 3.6-2 – Índice de Vegetação (IV) Calculado sobre Quadrículas

Analisando as imagem resultantes, pode-se verificar facilmente que as parcelas com uma percentagem significativa de cobertura vegetal (superior a 50%), assinaladas em tons de laranja e vermelho, correspondem predominantemente ao parque de Monsanto. Aplicando uma imagem de definição de sectores polares, obtemos uma imagem do índice de vegetação indicada na Figura 3.6-3



Índice de Vegetação - IV (% da área ocupada com vegetação)

Figura 3.6-3 – Índice de Vegetação (IV) Calculado sobre Sectores

Neste caso os resultados são semelhantes aos obtidos anteriormente, sendo que as áreas mais próximas do ponto de interesse estão melhor caracterizadas, já que as parcelas de análise são de menor dimensão.

## 3.7 Percursos Terra-Água

A propagação de ondas electromagnéticas sobre percursos mistos terra e água, pode provocar alterações, nos valores previstos para a atenuação do sinal recebido.

Para o cálculo do factor de correcção a introduzir, em resultado da propagação em trajectos mistos terra-água, torna-se necessário determinar para cada ponto do espaço os valores do índice  $\beta$ , definido como a razão entre o comprimento do percurso sobre terra e sobre água:

$$\beta$$
 = Distância Percorrida sobre Água / Distância Total Percorrida (3.6)

A título ilustrativo, são calculados os valores de  $\beta$  para uma área de Lisboa, classificada na Figura 3.7-1 em termos de terra ou água. O percurso misto será calculado entre uma antena localizada na EB do Campo Pequeno, e todos os pontos do espaço geográfico considerado.



Figura 3.7-1 – Imagem de Percursos Mistos Terra – Água em Lisboa

Para o cálculo de  $\beta$  é necessário produzir uma nova imagem com a distância de todos os pontos à margem, que corresponde aproximadamente ao comprimento do percurso das ondas sobre a superfície aquática.

A imagem resultante está indicada na Figura 3.7-2.



Figura 3.7-2 – Imagem com as Distâncias à Margem Norte de Lisboa

A imagem da distância de todos os pontos à margem é em seguida dividida pela imagem indicada na Figura 3.7-3, correspondente à distância de todos os pontos à EB.





Figura 3.7-3 - Distâncias Medidas da Estação Base Campo Pequeno

Como resultado, obtém-se a imagem indicada na Figura 3.7-4, correspondente aos valores de  $\beta$ , para cada ponto do espaço geográfico em análise.

Como se pode verificar na imagem de  $\beta$ , este toma valores mais elevados (representados a laranja e vermelho), na situação da propagação de ondas electromagnéticas sobre o estuário do Tejo, onde consequentemente, os factores de correcção da atenuação a calcular serão mais significativos.



Figura 3.7-4 – Cálculo do Factor β do Percurso Terra - Água

## 3.8 Determinação da Existência de Linha de Vista

Para determinar a existência de linha de vista entre a antena e todos os pontos do espaço geográfico circundante, torna-se necessário analisar o MDT incluindo todas as construções e vegetação que a possam influenciar. Assim, adicionaram-se ao MDT, as imagens do Modelo Digital de Elevação de Edifícios, da altura das antenas e de outras construções que não figuravam na cartografia disponível, como seja o caso do edifício da CGD.

Usando a função de cálculo de bacias de visão VIEWSHED sobre a imagem do MDT com a soma dos temas atrás indicados, obtém-se uma imagem com a informação dos todos os pontos que estão em linha de vista com a antena. Essa imagem é indicada na Figura 3.8-1, onde se pode destacar por curiosidade, a existência de uma zona no rio Tejo, em frente ao Terreiro do Paço, de formato quase triangular assinalada a vermelho, com linha de vista com a antena.

Para reduzir o tempo de cálculo, que neste caso particular pode ser significativo (cerca de 10 minutos para uma imagem de 2 MB), confinou-se a zona de cálculo a uma envolvente de 8 km, centrada na localização da antena da Estação Base do Campo Pequeno.

Este tipo de análise é particularmente interessante na determinação de possíveis interferências entre zonas de serviço que, estando geograficamente distantes, possam ter áreas comuns de linha de vista, originando desse modo situações de cobertura rádio indesejável.



Figura 3.8-1 - Imagem da Bacia de Visão da EB Campo Pequeno (até um Raio de 8 km)

Para contabilizar o efeito da curvatura da terra na determinação da linha de vista de raios directos, a imagem do MDT é corrigida (deformada propositadamente), sendo-lhe subtraída uma imagem com curvatura da terra nessa zona. Por outro lado, a atmosfera é responsável por uma curvatura vertical do raio directo na propagação das ondas, provocada pela variação do índice de refracção ao longo do percurso. Para contabilizar esse efeito de refracção das ondas na atmosfera terrestre foi considerado um raio fictício da terra igual a 4/3 do seu raio real [9].

A imagem com a curvatura da terra na zona em análise é obtida a partir de uma outra imagem com as distâncias medidas a partir da EB (pode ser escolhido qualquer outro ponto). Nestas circunstâncias a imagem que representa a terra curva é dada por,

$$[Imagem Terra Curva] = 4/3 * [Imagem Distância] / 2 Raio da Terra$$
(3.7)

Para a cidade de Lisboa o efeito combinado da terra curva e da refracção das ondas provoca uma variação máxima do valor fictício da cota (nas zonas mais distante da EB) de cerca de 10 m o que tem pouco significado neste estudo em termos práticos.

#### 3.9 Zonas de Cota com Valor mais Elevado

O facto da antena estar acima ou abaixo de um dado plano de nível tem implicações importantes nas condições de propagação das ondas electromagnéticas. Usando a função de reclassificação RECLASS sobre o MDT, é possível determinar as zonas que estão acima ou abaixo do nível de uma dada antena. A título ilustrativo, determinou-se para a Estação de Base do Campo Pequeno, os pontos com cota superior ou inferior. O resultado deste cálculo está representado na Figura 3.9-1.



Figura 3.9-1 – Plano de Cotas de Valor Superior à Antena da EB

Verifica-se pela imagem obtida, que a antena da EB do Campo Pequeno (representada por um ponto vermelho) está situada, em termos relativos, numa cota elevada, ficando apenas abaixo do nível das cotas da zona de Monsanto.

# **CAPÍTULO 4**

## Modelação da Propagação de Ondas

Neste Capítulo, desenvolvem-se técnicas de modelação da radiação de antenas e de propagação de ondas electromagnéticas, incluindo a implementação em SIG, do modelo de propagação em espaço livre e do modelo de propagação de Okumura-Hata, com os respectivos factores de correcção. A título ilustrativo da metodologia desenvolvida, calculam-se os parâmetros do modelo Okumura-Hata, os factores de correcção da atenuação e a área de cobertura de uma antena da Telecel, instalada numa Estação Base, situada na zona do Campo Pequeno, na cidade de Lisboa.

#### 4.1 Introdução

Em 1880, Hertz demonstrou que a propagação de ondas electromagnéticas em espaço livre era possível. Em 1895 Marconi estabeleceu a primeira ligação por rádio, numa distância de várias milhas, usando duas antenas fixas, e dois anos mais tarde conseguiu uma comunicação móvel com um navio, situado a uma distância de 18 milhas.

Hoje em dia, os serviços de comunicações móveis, incluem, o rádio móvel privado (PMR, Trunking), os telefones sem fios, a telemensagem (paging), o telefone celular GSM, a transmissão de dados e os sistemas de determinação de posição, entre outros. Os serviços podem ser classificados, de acordo com o tipo de ligação, como sejam, a difusão quando uma informação é enviada por um emissor e recebida por vários utilizadores, a ligação ponto a ponto quando a informação é enviada ou trocada entre dois utilizadores e a ligação ponto-a-multiponto quando a informação é enviada ou trocada entre um utilizador e um grupo de utilizadores. Quanto ao modo de comunicação, os serviços podem ser classificados em unidireccionais quando a comunicação é efectuado num só sentido (do móvel para o fixo ou do fixo para o móvel) e bidireccionais quando podem ser efectuadas em ambos os sentidos, em simultâneo ou não.

Em qualquer dos casos, para o planeamento de um sistema de comunicações móveis, torna-se indispensável, determinar as características de propagação das ondas electromagnéticas e estimar a

potência recebida num receptor, colocado numa qualquer localização geográfica. A modelação no SIG da propagação das ondas e a implementação de um modelo de previsão de sinal tem como objectivo estimar o valor da potência recebida em cada ponto do espaço e construir um conjunto de imagens com a indicação das zonas onde se prevê a existência de cobertura rádio, ou seja produzir mapas de cobertura de sinal.

O cálculo da potência do sinal recebido, em qualquer ponto de um dado espaço geográfico, pode ser efectuado com base nas fórmulas de Hata [14], que nos permitem estimar a atenuação básica das ondas e os factores de correcção associados. Em ambientes urbanos, geralmente não há linha de vista entre o emissor e o receptor, sendo a propagação determinada principalmente por fenómenos de difracção e rerradiação de ondas. Nestas circunstâncias, a propagação torna-se um fenómeno complexo de calcular, em termos exclusivamente determinísticos, sendo necessário usar modelos semi-empíricos, baseados no cálculo de uma componente determinística e duma componente estatística. A aplicação de modelos que tenham uma componente empírica, requer a classificação prévia de ambientes tal como efectuado no Capítulo anterior.

O modelo de Hata é do tipo semi-empírio e está baseado na análise de intensas campanhas de medida, realizadas por Okumura [15]. A atenuação em ambientes urbanos é fundamentalmente uma função da frequência da portadora do sinal, da altura das antenas e da distância entre o emissor e o receptor, para além das características do próprio cenário da propagação, sendo necessário adicionar factores de correcção, determinados pelas características da zona onde se desenrola a propagação das ondas electromagnéticas. O modelo de Hata é aplicável em situações em que as antenas das EB estão situadas em cotas superiores aos prédios vizinhos e para distâncias superiores a 1 000 m da EB. O modelo de Okumura-Hata prevê a existência de um conjunto de factores de correcção, que devem ser calculados, e que são determinados fundamentalmente pelas condições do terreno (factores geográficos, factores orográficos e padrões de urbanização), e que permitem afinar o modelo de propagação para as condições reais da sua utilização.

Como a determinação da cobertura rádio tem aplicação prática em diversas áreas das telecomunicações, como sejam, a radiodifusão, os feixes hertzianos e as comunicações móveis celulares, será feita uma pequena descrição das mais significativas, sendo que o foco do trabalho será centrado nas comunicações móveis celulares GSM.

#### • Determinação da Cobertura em Radiodifusão

Nos projectos de radiodifusão a comunicação é feita exclusivamente no sentido do emissor para o receptor e pretende-se, geralmente, cobrir zonas extensas de terreno, pelo que os emissores são colocados em pontos altos, de modo a diminuir a atenuação do sinal, originada pela obstrução da linha de vista devida a acidentes do terreno ou construções artificiais. No entanto, há outras situações que

obrigam a que a cobertura esteja limitada a uma determinada zona, que não deve ser excedida. Nestes casos também poderão ser usados modelos de propagação e ferramentas próprias do SIG para avaliar os limites de cobertura e as possíveis interferências entre emissores.

Para determinadas gamas de frequência o limite máximo de cobertura é condicionado pela própria curvatura da terra, o que pode ser modelado facilmente no SIG, enquanto que para outras gamas de frequência o sinal pode chegar por outras vias como seja por reflexões e difracção obrigando ao uso de modelos mais elaborados.

#### • Feixes Hertzianos

Pode-se estabelecer uma ligação entre dois pontos através de um feixe hertziano [16], geralmente de frequência superior a 1 GHz, recorrendo a antenas muito directivas (com um ganho elevado numa dada direcção), que confinam a energia transmitida a um feixe estreito. Esta ligação é particularmente interessante para distâncias elevadas (superiores a vários quilómetros) ou quando a orografia do terreno não facilita a instalação de cabos coaxiais ou fibras ópticas, como seja o caso de rios ou cadeias de montanhas. Podem ser igualmente usados para cobrir distâncias curtas em ambientes urbanos, designadamente na interligação de Estações de Base nas redes de comunicações móveis celulares GSM.

Por outro lado sendo a frequência da portadora elevada temos uma maior largura de banda disponível, podendo ter uma capacidade superiores a 1000 canais telefónicos. A propagação faz-se normalmente em linha de vista entre as antenas emissoras e receptoras, sendo que quando o comprimento da ligação exceder 50 km as antenas deixam de estar em linha de vista devido à curvatura da terra. Também se existirem obstáculos entre as duas antenas, derivados da orografia natural, vegetação ou construções artificiais, não é possível estabelecer a ligação entre elas, devendo então instalar-se estações intermédias, sendo que em ambos os casos a ligação deverá fazer-se através de troços, também designados por secções radioeléctricas ou saltos. Pode-se concluir que a propagação de ondas electromagnéticas em feixes é também um fenómeno altamente dependente da geografia e da orografia da zona em estudo, sendo vantajoso usar um Sistema de Informação Geográfica na modelação, no cálculo da ligação e na previsão do sinal recebido.

#### • Dimensionamento de Células em Comunicações Móveis

Os sistemas celulares de comunicação móvel caracterizam-se por uma divisão do espaço a cobrir em termos radioeléctricos em pequenas áreas, designadas por células, cuja dimensão depende do tráfego esperado e das condições de propagação particulares para cada zona. Numa primeira fase de implementação, os sistemas celulares de comunicações móveis baseavam-se em macro-células, que se caracterizavam por células de elevada dimensão, superior a 20 km de raio. Posteriormente para

aumentar a capacidade global dos sistemas aparecem os sistemas apoiados também em micro-células com raios da ordem de 1km, com antenas instaladas no telhado dos prédios.

O espectro radioeléctrico, com um reduzido número de frequências disponíveis para novos serviços, é um bem escasso. A principal vantagem dos sistemas celulares consiste na possibilidade de reutilização das frequências em outras células, desde que estejam suficientemente afastadas de modo a não se interferirem mutuamente.

Em resumo as características mais particulares de um sistema de comunicações móveis celulares são as seguintes:

- 1. Servem uma densidade elevada de utilizadores especialmente em ambientes urbanos.
- 2. Ultrapassam o problema do limitado espectro radioeléctrico disponível.
- 3. Usam as vantagens da reutilização de frequências em zonas geográficas distintas.
- 4. Usam geralmente emissores de baixa potência e localizados a baixa altitude.
- 5. Dividem toda a zona de serviço em pequenas células de cobertura.
- 6. Consideram a hipótese teórica de uma expansão modular ilimitada do sistema.
- Permitem a mudança de canal derivada da passagem de uma célula para outra sem interrupção da conversação em curso.

As características específicas deste sistema de telecomunicações podem ser modeladas em SIG, sendo possível determinar as zonas com cobertura rádio e posteriormente estimar o tráfego potencial gerado nessas zonas, criando uma ferramenta integrada capaz de aumentar a eficiência no planeamento e análise das redes de comunicações móveis celulares.

## 4.2 Caracterização do Problema a Estudar

Dentro dos diversos sistemas de comunicações móveis celulares existentes em todo o Mundo iremos analisar apenas o de maior expressão na Europa e no Mundo conhecido por Global System for Mobile (GSM). O GSM resulta de uma proposta apresentada em 1982 pela Nordic Telecom e pelos Correios e Telecomunicações Holandeses à Conferência Europeia de Correios e Telecomunicações (CEPT), no sentido de desenvolver um novo padrão para redes digitais celulares para a Europa. A Comissão Europeia emitiu uma directiva no sentido dos seus membros reservarem frequências na banda dos 900 MHz para permitir o "roaming" entre as respectivas redes internacionais, isto é a possibilidade de usar noutros países, o que até então não era possível. Em Setembro de 1987, 13 operadores e administrações formam um grupo de consulta dentro do CEPT designado por Groupe Spéciale Mobile e conhecido por GSM. A designação francesa do Groupe Spéciale Mobile foi transformada para Global System for Mobile (GSM), mantendo-se o acrónimo GSM.

Em termos mundiais, as comunicações móveis GSM apresentam os seguintes números:

- 200 redes em 110 países;
- 75% do mercado total das comunicações celulares;
- 55 milhões de utilizadores em todo o mundo.

O aparecimento de telefones móveis celulares segundo a norma GSM, ao permitirem aos seus utilizadores contactarem ou serem contactados telefonicamente em qualquer local, criaram um enorme interesse na população em geral, levando a um aumento exponencial do número de utilizadores. Por outro lado, o recente aparecimento de um conjunto de novos serviços apoiados nas redes GSM, designadamente, serviços telemáticos em viaturas, gestão de frotas, acesso móvel a aplicações, monitorização remota, máquinas de venda e outros, permitem antever um crescimento de tráfego muito superior às previsões mais optimistas.

Este crescimento acima das previsões coloca aos operadores das redes celulares novos desafios em termos do planeamento das redes, já que o espectro disponível é limitado. A forma de ultrapassar o problema da insuficiência de espectro radioeléctrico para as chamadas telefónicas previsíveis consiste em reutilizar as mesmas frequências em outras zonas suficientemente afastadas em termos geográficos, prevenindo uma possível interferência entre elas. Em consequência o número de canais (frequências para as várias portadoras) é igualmente limitado, obrigando os responsáveis pelo planeamento das redes à reutilização das mesmas frequências em células muito pequenas e próximas umas das outras. A título de exemplo, refira-se que cada operador português (Telecel, TMN e Óptimus) tem de momento, para o GSM 900, cerca de 40 canais para todo o País, atribuídos pelo Instituto de Comunicações de Portugal (ICP). Cada canal é constituído por 2 frequências (uplink e downlink), podendo suportar até oito chamadas telefónicas simultâneas em divisão no tempo, perfazendo assim apenas um total de 320 chamadas para todo o País, caso não utilizassem técnicas de reutilização de frequências.

As macro-células têm tipicamente uma dimensão de 20 km, sendo o valor máximo limitado a 35 km, devido a problemas com o atraso na propagação das ondas, originado pela distância de ida e volta a percorrer pelo sinal. A potência emitida pela estação base numa macro-células é da ordem dos 40 a 70 W podendo ser utilizadas vários tipos de antenas (com cobertura omnidireccional ou sectorial no plano horizontal, com sectores de 120°) e que costumam estar montadas em locais de cota elevada a fim de evitarem as obstruções. Uma microcélula pode ser usada para cobrir um cruzamento ou algumas ruas, e destinam-se fundamentalmente a aumentar a capacidade do sistema (em termos de chamadas telefónicas simultâneas) usando geralmente apenas 2 ou 3 canais. As antenas situam-se tipicamente ao nível dos telhados e emitem potências da ordem dos 2 a 6 W. Esta situação é mais comum em zonas urbanas onde a dimensão das células anda na ordem de 1 km, sendo que em determinadas microcélulas a zona de cobertura pode ter diâmetros da ordem dos 200 m.

Para aumentar a capacidade do sistema, entrou recentemente em funcionamento o GSM 1800, a trabalhar nos 1800 MHz, sendo atribuídas pelo ICP a cada operador mais 30 canais, o que poderá obrigar a recalcular o planeamento da cobertura e a realizar novas campanhas de medida. O planeamento da cobertura rádio visa garantir que:

- dentro de uma célula existe um sinal mínimo que permita manter a comunicação telefónica com uma qualidade satisfatória para os utilizadores;
- a interferência entre células que compartilham as mesmas frequências seja mínima, de modo que a relação sinal interferência seja superior a um dado valor, tipicamente 0 dB;
- não existam zonas não cobertas ou de elevada interferência entre as células que perturbem as comunicações quando os utilizadores móveis em "handover" se desloquem de umas células para outras;

O problema do planeamento das redes móveis celulares é complexo, devido às suas múltiplas variáveis de natureza geográfica, pelo que uma metodologia baseada em SIG parece ser adequada para esse fim, designadamente para: estimar a cobertura rádio dentro de cada célula, estimar o tráfego potencial gerado pelos utilizadores dentro das zonas de cobertura, georeferenciar em mapas as medidas de campo, estabelecer correlação espacial entre valores, aplicar técnicas de análise espacial para escolha dos melhores locais para localizar as estações base de acordo com multicritérios e condicionantes e ainda para o cadastro georeferenciado de equipamento.

## 4.3 Modelação da Radiação da Antena

Um componente importante em qualquer modelo de canal de comunicações consiste nas antenas. A antena emissora é geralmente colocada num ponto elevado do espaço para radiar energia e pode ser caracterizada pela sua localização geográfica (latitude, longitude e altitude), altura, ambiente envolvente, ganho, diagrama de radiação e direcção máxima de radiação.

A modelação do ganho da antena será feita a título ilustrativo para uma área de 13 km por 8 km correspondente à quase totalidade de Lisboa onde, entre outras, estão implantadas 3 Estações de Base Sectoriais da Telecel, de acordo com os dados da Tabela 4-1.

Estação Base Localização	Sector Nome	Coordenada M [m]	Coordenada P [m]	Altitude H [m]
3	А			114
São Sebastião	В	111 460	196 869	116
	С			115
	А			125
Campo Pequeno	В	112 220	197 666	127
	С			125
Av. da República	В	111 981	197 195	106
	С			106

Tabela 4-1 – Localização Geográfica das Estações Base em Estudo (Fonte: Telecel)

M, P e H são as coordenadas cartográficas da localização da base da antena, referidas ao sistema cartográfico militar Português. Com base nos referidos dados, foi construída a imagem indicada na Figura 4.3-1 com a localização das três Estações Base.



Figura 4.3-1 - Imagem com a Localização das 3 Estações Base

A antena emissora, corresponde a um tema particular a tratar no SIG, e foi modelada com recurso a duas imagens: uma com a sua localização geográfica da antena (latitude, longitude e altitude) e outra com o diagrama de radiação da antena, e que contém para cada pixel da imagem o valor do ganho da antena segundo o azimute específico do pixel, de 0 a 360 graus. A antena emissora radia energia electromagnética de acordo com o seu diagrama de radiação, tendo geralmente uma característica direccional, ou seja radia mais em determinadas direcções e menos em outras. Uma antena típica tem um diagrama de radiação semelhante ao indicado, como exemplo ilustrativo, na Figura 4.3-2.



Figura 4.3-2 - Diagrama de Radiação de uma Antena para Comunicações Móveis (fonte: KATHREIN)

O lóbulo principal da antena, que corresponde à direcção de maior capacidade de radiação está dirigido segundo um dado azimute. Este azimute corresponde ao ângulo horizontal definido pela direcção do norte cartográfico e a direcção de maior ganho da antena ou seja do lóbulo principal.

Para criar a imagem de modelação do diagrama de radiação da antena segundo cada azimute foi desenvolvido e integrado no SIG IDRISI, sob a forma de um módulo, um programa em Visual Basic que inscreve em cada pixel da imagem o valor do seu ganho em função de um ficheiro de descrição da antena e do azimute considerado. O ecrã para a introdução dos dados da antena no programa está indicado na Figura 4.3-3.



Figura 4.3-3 - Ecrã de Introdução de Dados para Modelação do Ganho da Antena
Os procedimentos para a introdução dos dados e modelação do diagrama de radiação da antena são os indicados em seguida:

a) Criação do ficheiro da imagem por introdução no programa indicado dos dados:

Localização da antena (coordenadas M, P) Valor do azimute da direcção de radiação máxima da antena

- b) Criação da imagem e do ficheiro de descrição da imagem por importação do ficheiro anterior
- c) Reclassificação da imagem em função do diagrama de radiação da antena efectivamente usada (produzido no formato de um ficheiro de reclassificação IDRISI)

A partir da localização da EB do Campo Pequeno e do azimute da antena, obtemos a imagem indicada na Figura 4.3-4.



Figura 4.3-4 – Imagem com o Valor do Azimute para cada Ponto do Espaço (referência 240 °)

Em seguida, a imagem foi reclassificada com um ficheiro de descrição da antena, em que para cada azimute, variando de 1 em 1 grau, é indicado o ganho da antena, em dBi, nessa direcção. Um exemplo de ficheiro de reclassificação para uma antena modelo SH1309.41.0004, usada na EB Campo Pequeno – Sector C, é mostrado na Figura 4.3-2.

Azimute	Ganho (dBi)		
0	10,68		
1	10,67		
2	10,65		
357	10,64		
358	10,66		
359	10,66		

Tabela 4-2 - Ficheiro de reclassificação da antena modelo SH1309.41.0004

Traçando o gráfico do diagrama de radiação horizontal da antena considerada (modelo SH1309.41.0004) obtém-se a imagem indicada na Figura 4.3-5.



Figura 4.3-5 - Diagrama de Radiação Horizontal da Antena

Após a reclassificação da imagem dos azimutes da antena com o ficheiro atrás indicado, obtemos a imagem do ganho direccional da antena (em dBi) para todas as direcções, indicada na Figura 4.3-6.

Em cada *pixel* da imagem está inscrito o valor do ganho da antena (em dBi) em função do azimute desse mesmo ponto, medido em relação ao azimute cartográfico da antena. O azimute cartográfico da antena do Sector C da EB do Campo Pequeno é de 240° (dados fornecidos pela Telecel), pelo que o valor máximo do ganho da antena se verifica também nessa direcção, onde atinge o valor de 10,68 dBi. No sentido contrário para o azimute cartográfico de 60° o ganho da antena toma o seu valor mínimo igual a –34.68 dBi.





Figura 4.3-6 – Ganho Direccional do Sector C da EB Campo Pequeno

Em determinados estudos de propagação interessa caracterizar a antena em termos do seu diagrama de radiação a -3 dB (sector angular com radiação até metade da potência radiada na direcção do máximo), pelo que por reclassificação da imagem anterior podemos obter uma nova imagem com a indicação do sector de maior ganho da antena, tal como indicado na Figura 4.3-7.



Figura 4.3-7 - Diagrama de Radiação da Antena a -3 dB

Ainda por reclassificação da imagem do ganho da antena, pode igualmente ser obtido o diagrama a -3 dB e a -10 dB, indicado na Figura 4.3-8.



Figura 4.3-8 - Diagrama de Radiação da Antena a -3 dB e a -10 dB

### 4.4 Propagação em Espaço Livre

O cálculo da propagação em espaço livre tem um interesse prático muito reduzido neste estudo, já que é uma simplificação grosseira de uma realidade muito mais complexa e que deverá forçosamente levar em linha de conta os diversos factores geográficos e orográficos da zona, onde decorre a propagação das ondas electromagnéticas. Este assunto é aqui abordado de forma introdutória, apenas como uma primeira abordagem à posterior implementação no SIG de um modelo de propagação mais elaborado, e que forçosamente já vai contemplar a realidade geográfica e orográfica do ambiente, sobre o qual se vai desenrolar a propagação das ondas electromagnéticas – o modelo de Okumura-Hata.

Segundo o modelo de propagação em espaço livre, conhecido por fórmula de Friis a potência num receptor, suficientemente afastado do emissor, é dado por [17]:

$$P_r = G_e G_r (\lambda/4\pi d)^2 P_e \tag{4.1}$$

onde,

- Pr- Potência Recebida
- Ge- Ganho de Emissão
- Gr-- Ganho de Recepção
- $\lambda$  Comprimento de Onda
- d Distância entre Emissor e Receptor
- Pe- Potência de Emissão

Para a previsão do sinal recebido, é usado o modelo no qual a potência no receptor é dada por (em unidades logarítmicas):

$$P_{\rm r} = P_{\rm e} + G_{\rm e} + G_{\rm r} - L_{\rm p} \tag{4.2}$$

com:

P<sub>r</sub> – Potência de sinal recebido [dBm]

P<sub>e</sub> – Potência emitida [dBm]

Ge - Ganho de emissão [dBi]

G<sub>r</sub>-Ganho de recepção

L<sub>p</sub> - Atenuação de propagação

A atenuação de propagação será função da distância e da frequência, tendo-se para o espaço livre,

$$L_{p [dB]} = 32,5 + 20 \log (d_{[km]}) + 20 \log (f_{[MHz]})$$
(4.3)

A distância será medida entre o emissor e todos os pontos da zona em estudo, ou seja a distância a todos os pixels representados na imagem. Como resultado destes cálculos, os valores calculados para cada célula são inscritos nas posições correspondentes em novas imagens, ou seja em novas matrizes de valores. Aplicando (4.3), a atenuação das ondas em espaço livre para uma frequência de 900 MHz e para uma distância em metros para ser compatível com a imagem do MDT e com as imagens dele derivadas, é dada por:

$$L_{|dB|} = 31,58 + 20 \log d_{|m|} \tag{4.4}$$

Enquanto que para uma frequência de 1800 MHz se tem:

$$L_{|dB|} = 37,61 + 20 \log d_{|m|} \tag{4.5}$$

Esta equações serão usadas posteriormente, para construir as imagens correspondentes à atenuação espacial, para cada uma das frequências, em espaço livre.

### 1. Localização da antena

As coordenadas M, P da EB permite a construção de uma imagem com a localização da antena em termos coordenadas linha, coluna na matriz. A construção da imagem com a localização da antena é feita por conversão do ficheiro vectorial de pontos para formato matricial, sendo que esta nova imagem irá conter inscrito no pixel da localização da EB o valor correspondente a sua cota.

### 2. Cálculo das distâncias às EB

Um dos factores importantes na previsão do nível de sinal recebido, tem a ver com a distância entre o emissor e o receptor. Partindo da imagem com a localização da antena, aplica-se a função de cálculo de distâncias, obtendo a imagem de distâncias à EB. Como será necessário em cálculos subsequentes calcular o logaritmo das distâncias, a imagens correspondente às distâncias será posteriormente reclassificada, de forma a excluir o valor zero no ponto de localização da antena. Seguidamente, deverá ser calculado o logaritmo decimal das distâncias. No caso particular do IDRISI, apenas existe a função ln (logaritmo natural), pelo que a imagem obtida deverá ser dividida por 2,3026, para a conversão para a base 10.

### 3. Cálculo da atenuação

Para a construção da imagem da atenuação, os passos a dar são os seguintes:

- 1. Construir uma imagem com a distância de todos os pontos à EB.
- 2. Reclassifica-se a imagem, de modo a retirar o valor de distância zero, para se poder aplicar posteriormente a função logaritmo.
- 3. Construir uma imagem com a atenuação com base na expressão A + B log (d) em que log(d) corresponde a imagens já anteriormente obtida para a EB.

#### 4. Previsão do sinal

Aplicando (4.4) sobre a imagem correspondente à distância dos pontos do espaço à Estação Base do Campo Pequeno, obtemos uma imagem correspondente à atenuação em espaço livre para a frequência 900 MHz. Considerando um ganho para antena dado pelo diagrama de radiação indicado anteriormente, e uma potência radiada pela antena de 40,53 dBm (dado fornecido pela Telecel) a previsão do sinal é dada por (assume-se uma antena de 0 dBi para o terminal móvel,

$$Pr = 40,53 + [Ganho Antena] - [Atenuação em Espaço Livre]$$
 (4. 6)

A imagem de previsão de sinal resultante é indicada na Figura 4.4-1.



Figura 4.4-1 - Potência Recebida Segundo Modelo de Propagação em Espaço Livre

É de realçar que este modelo é demasiado simplista face à propagação em condições reais em ambiente urbano, já que não contempla a orografia nem a cobertura do terreno, pelo que este modelo simplificado não será usado neste estudo. Está aqui referido apenas a título ilustrativo e para comparação de resultados com o modelo estatístico de Okumura-Hata que será implementado na próxima secção.

### 4.5 Modelo de Okumura-Hata

Para a previsão de nível de sinal recebido será usado um modelo empírico proposto por Okumura, baseado em intensas campanhas de medidas na banda de 150 a 2000 MHz.

O modelo foi apresentados sob a forma de curvas, tendo Hata estabelecido expressões que aproximam algumas dessas curvas aos valores experimentais. A atenuação básica da propagação segundo Hata vem dada por:

$$L_{b} (_{dB}) = 69,55 + 26.16 \log (f_{[MHz]}) - 13,82 \log (h_{be}) + [44,90 - 6,55 \log (h_{be})] \log (d_{[km]}) - H_{mu} [_{dB}] (h_{m},f)$$

$$(4.7)$$

onde para uma cidade pequena / média  $H_{mu \ [dB]}$  (h<sub>m</sub>,f) vem dado por,

$$\mathbf{H}_{\mathrm{mu}} = [1, 10 \cdot \log (\mathbf{f}_{\mathrm{MHz}}) - 0, 70 \cdot \mathbf{h}_{\mathrm{m}} - 56 \cdot \log (\mathbf{f}_{\mathrm{MHz}}) - 0, 80]$$
(4.8)

Para cidade grande,

$$\mathbf{H}_{\mathbf{mu}_{[\mathbf{B}]}} = \begin{cases} 8,29 \cdot \log^2 \left( 54 \cdot \mathbf{h}_{\mathbf{m}} \right) \cdot 1.10 & \text{para } \mathbf{f} \le 200 \text{ MHz} \\ \\ 3,20 \cdot \log^2 \left( 1,75 \cdot \mathbf{h}_{\mathbf{m}} \right) \cdot 4.97 & \text{para } \mathbf{f} \ge 400 \text{ MHz} \end{cases}$$
(4.9)

sendo válido para

$$f \in [150, 2000] \text{ MHz}$$
$$d \in [1, 100] \text{ km}$$
$$h_{be} \in [30, 1000] \text{ m}$$
$$h_{m} \in [1, 10] \text{ m}$$

No caso particular da cidade de Lisboa considerou-se  $H_{mu}$  correspondente a uma cidade pequena / média. Importa realçar que a distância é definida em metro para ser compatível com o sistema de unidades usado no SIG.

Os factores geográficos e orográficos mais importantes na previsão do nível são:

- a) existência de linha de vista.
- b) difracção do sinal
- c) existência de obstáculos.
- d) ondulação do terreno.
- e) cobertura do terreno.
- f) reflexão no solo, nos objectos e em declives.
- g) orientação e largura das ruas.
- h) altura das antenas.
- i) caminhos mistos terra-água.
- j) padrões de distribuição e características dos edifícios
- k) outros obstáculos isolados ou juntos, materiais de construção, densidade, altura, etc.).

Para o cálculo da atenuação será usada a expressão já anteriormente apresentada ao que há que acrescentar factores de correcção para contabilizar a influência dos parâmetros atrás descritos.

$$L_{p} [dB] = L_{b} [dB] + \sum_{i} (factores de correcção)$$
(4. 10)

Importa sublinhar que o modelo utilizado para a previsão do sinal só tem significado para distâncias superiores a 1000 m da EB pelo que serão considerados *buffers* de 1000 centrados na EB dentro dos quais não serão calculados valores de previsão de sinal. Os valores fornecidos pelo modelo para os pontos situados dentro de um círculo de 5000 m poderão ter desvios significativos, pelo que nos

mapas de previsão de cobertura será sempre representado um buffer de 5000, dentro do qual os valores deverão ser considerados de forma crítica

No caso específico da EB Campo Pequeno - Sector C - em 900 MHz, temos para Lp

$$L_{p (dB)} = 34,48 * [Distância à EB] +20,12$$
 (4. 11)

obtendo-se a imagem indicada na Figura 4.5-1, correspondente à atenuação básica ainda sem os factores de correcção.



Lp - Atenuação Básica Devida à Distância à EB (dB)

Figura 4.5-1 – Imagem da Atenuação do Sinal em Função da Distância à EB Campo Pequeno

Como a atenuação, para uma dada frequência, depende apenas da distância considerada, na imagem apresentada pode observar-se um aumento da atenuação com a distância à estação base, em torno da antena, de forma idêntica para todas as direcções.

Com o objectivo de melhorar a previsão do sinal, inclui-se no modelo a caracterização do terreno, declives, edifícios, padrões de construção e cobertura do terreno, sendo considerados os respectivos factores de correcção ao modelo [13].

### 1. Correcção da atenuação determinada pelo tipo de ambiente

Como já foi referido em 3.1, o ambiente de propagação pode classificar-se em várias categorias. Neste trabalho aplicam-se os critérios de 3.3, a que correspondem os seguintes factores de correcção:

### a) Correcção para áreas suburbanas

Esta correcção será aplicada quando o valor de COS se situar entre 0,4 e 1

$$K_{mr} = \begin{cases} 10 \text{ dB} & \text{para} \quad f = 900 \text{ MHz} \\ \\ 12 \text{ dB} & \text{para} \quad f = 1800 \text{ MHz} \end{cases}$$
(4. 12)

Analisando a imagem apresentada na Figura 3.3-8 constata-se que a zona de estudo situa-se em área considerada urbana pelo que não será introduzido este factor de correcção ao modelo.

#### b) Correcção para áreas quasi-abertas

Esta correcção será aplicada quando o valor de COS se situar entre 0,1 e 0,4

$$Q_{r} = \begin{cases} 24 \text{ dB} & \text{para} & \text{f} = 900 \text{ MHz} \\ \\ 27 \text{ dB} & \text{para} & \text{f} = 1800 \text{ MHz} \end{cases}$$
(4.13)

Do mesmo modo analisando a imagem apresentada na Figura 3.3-8 constata-se que a zona de estudo situa-se em área considerada urbana pelo que não será introduzido este factor de correcção ao modelo.

#### c) Correcção para áreas abertas

Esta correcção será aplicada quando o valor de COS for inferior a 0,1

$$Q_{o} = \begin{cases} 29 \, dB & \text{para} \quad f = 900 \, \text{MHz} \\ \\ 32 \, dB & \text{para} \quad f = 1800 \, \text{MHz} \end{cases}$$
(4. 14)

Ainda analisando a imagem apresentada na Figura 3.3-8 constata-se que a zona de estudo situa-se em área considerada urbana pelo que também não será introduzido este factor de correcção ao modelo.

#### 2. Correcção da atenuação devida à ondulação do terreno

O cálculo da correcção da atenuação devida à ondulação do terreno, Kh, é efectuado a partir da imagem da altura da ondulação do terreno por aplicação dos modelos respectivos:

$$K_{h(\Delta h)_{[B]}} = \begin{cases} -8 \log^{2}(\Delta_{h}) + 16 \log (\Delta_{h}) - 7 & \text{para } f = 922 \text{ MHz} \\ \\ -3 \log^{2}(\Delta_{h}) - 0,5 \log (\Delta_{h}) + 4,5 & \text{para } f = 1430 \text{ MHz} \end{cases}$$
(4.15)

No caso particular em que a frequência de trabalho é próxima dos 900 MHz aplicando (4.8) obtém-se a imagem indicada na Figura 4.5-2 que será utilizada posteriormente no cálculo da atenuação total do sinal.



kh - Correcção para a Ondulação do Terreno (dB)

Figura 4.5-2 - Imagem da Atenuação Devida à Ondulação do Terreno

Pode observar-se na figura apresentada que a atenuação é menor nas zonas mais planas da cidade, designadamente próximo na zona envolvente da Estação de Base e ainda sobre o rio Tejo. Os máximos de atenuação correspondem às colinas de Lisboa mais marcadas, como sejam por exemplo, Monsanto e as freguesias da Graça, Sé, Penha de França e Lapa.

#### 3. Correcção da atenuação devida à inclinação média do terreno

O cálculo da correcção da atenuação devida à inclinação média do terreno,  $K_{sp}$ , é efectuado a partir da imagem da inclinação do terreno por aplicação da formula seguinte:

$$K_{sp(\theta i)[dB]=} -0,0025 \theta^{2}_{[mrad]} +0,204 \theta_{[mrad]}$$
(4.16)

Obtendo-se a imagem indicada na Figura 4.5-3 que será utilizada posteriormente no cálculo da atenuação total do sinal.

#### ksp - Correcção Devida à Inclinação do Terreno (dB)



Figura 4.5-3 - Atenuação devida à inclinação média do terreno

Verifica-se uma maior atenuação do sinal (-5 dB) nas encostas descendentes, designadamente, Monsanto, Graça, Castelo de S. Jorge e toda a zona ribeirinha do Tejo. Nas encostas viradas para a EB temos pelo contrário um reforço do sinal relativamente à atenuação básica que pode atingir 3 dB.

### 4. Correcção da atenuação devida ao trajecto misto (agua/solo) - β

Esta correcção deverá ser aplicado quando na área em estudo a propagação sobre percursos mistos seja significativa. Para determinar a extensão dos percursos mistos terra-água foi construída uma imagem da cobertura da zona de estudo por superfícies aquáticas e por terra, Figura 3.7-1. Neste caso particular constata-se facilmente que existe um percurso misto significativo correspondente à propagação sobre o estuário do Tejo, pelo que a correcção da atenuação deverá ser efectuada. Para tal seguiu-se o processamento estabelecido na Secção 3.7, obtendo-se a imagem da Figura 3.7-4, contendo os valores de  $\beta$  para todos os pontos do espaço (recorde-se que  $\beta$  representa a percentagem de percurso sobre a água).

A atenuação devida ao trajecto terra-água é dada de acordo com o modelo de propagação adoptado pelas expressões indicadas na equação (4 .17).

$$K_{s}(d) = \begin{cases} -8.0\beta^{2} + 19.0\beta & \text{para } d > 30 \text{ km} \\ 7.8\beta^{2} + 5.6\beta & \text{para } d < 30 \text{ km} \end{cases}$$
(4.17)

em que  $\beta$  é igual à razão entre o percurso em terra e na água em percentagem

Como estamos numa situação de percurso terra-água com distâncias da ordem dos 5 km deverá ser aplicada a expressão indicada na equação para d <30 km, resultando a imagem da Figura 4.5-4, correspondente ao factor de correcção da atenuação  $\beta$ , devida ao percurso misto terra-água.



ks - Factor de Correcção Percurso Terra - Água (dB)

Figura 4.5-4 – Factor de Correcção Devido ao Percurso Misto Terra-Água (Ks)

Verifica-se pela imagem obtida, que a atenuação aumenta com o afastamento à margem, atingindo o valor de 8 dB para as zonas situadas no meio do rio Tejo

### 4.6 Previsão do Sinal Recebido

Estando já determinados todos os factores de correcção determinados pelo ambiente onde irá decorrer o fenómeno da propagação, pode-se passar à fase de previsão do sinal recebido em cada ponto do espaço geográfico em estudo por aplicação do modelo de Okumura-Hata. Recorrendo à expressão

$$P_{\rm r} = P_{\rm e} + G_{\rm e} + G_{\rm r} - L_{\rm b} - \sum K_{\rm I}$$
(4.18)

podemos obter a imagem correspondente à previsão do sinal resultante da energia radiada pela antena do sector C da EB Campo Pequeno. De acordo com os dados fornecidos pelo operador a potência de alimentação da antena Pe é de 40,53 dBm e considera-se um ganho na antena de recepção de 0 dBi. O ganho da antena de emissão, a atenuação total e os factores de correcção são representados pelas imagens obtidas anteriormente nos respectivas secções.

A correcção total da atenuação é dada por,

Total Correcção = 
$$\sum i$$
 (de todos os factores de correcção considerados)I (4. 19)

A imagem correspondente à totalidade dos Factores de Correcção foi construída através da soma das imagens correspondentes aos diversos factores de correcção, determinados pela ondulação do terreno, declives e trajectos mistos terra-água e está indicada na Figura 4.6-1.



ki - Total dos Factores de Correção (dB)

Figura 4.6-1 - Imagem com o Total dos Factores de Correcção

A expressão final é assim,

$$P_{r[dBm]} = 40,53 + 0 + G_r - L_b - \sum K_I$$
(4. 20)

tendo como resultado a imagem da Figura 4.6-2.



Figura 4.6-2 – Imagem da Potência Prevista para o Sinal

Verifica-se nitidamente na imagem uma redução significativa do sinal na direcção contrária à orientação da antena, em resultado do diagrama de radiação da mesma.

Aqui importa referir uma nota importante relativa aos limites de validade do modelo ensaiado, que só poderá ser aplicado para distâncias superiores a 1 km da EB, pelo que daqui em diante só será calculada previsão de sinal para distâncias superiores a esse limite. Os limites de validade da aplicação do modelo estão indicados na Figura 4.6-3.



Figura 4.6-3 – Imagem da Potência Prevista para o Sinal Excluindo a Zona de não Validade

Na imagem indicada na Figura 4.6-3 importa realçar que num círculo de raio de 1 km centrado na EB o modelo não tem aplicabilidade pelo que não está representado o valor do sinal. O círculo vermelho de raio de 5 km indica a zona onde devido à proximidade com a EB o modelo pode igualmente fornecer valores pouco precisos.

A fim de produzir mapas de leitura fácil importa reclassificar a imagem anterior dos valores contínuos correspondentes à previsão do sinal. Para esse efeito são definidas 16 classes de potência entre os valores menor de -105 dBm até maior que -35 dBm de acordo com a Tabela 4-3, com a qual se construiu um ficheiro de reclassificação (o valor mínimo relativo ao GSM é de -102 dBm).

N.º da	Valor Mínimo	Valor Máximo	Legenda	
Classe	[dBm]	[dBm]	Associada	
0	-9999	-105	<105 dBm	
1	-105	-100	-105 a -100 dBm	
2	-100	-95	-100 a -95 dBm	
3	-95	-90	-95 a -90 dBm	
4	-90	-85	-90 a -85 dBm	
5	-85	-80	-85 a -80 dBm	
6	-80	-75	-80 a -75 dBm	
7	-75	-70	-75 a -70 dBm	
8	-70	-65	-70 a -65 dBm	
9	-65	-60	-65 a -60 dBm	
10	-60	-55	-60 a -55 dBm	
11	-55	-50	-55 a -50 dBm	
12	-50	-45	-50 a -45 dBm	
13	-45	-40	-45 a -40 dBm	
14	-40	-35	-40 a -35 dBm	
15	-35	9999	> -35 dBm	

Tabela 4-3 – Tabela de Reclassificação da Imagem da Potência Recebida

Reclassificando por classes de potência a imagem indicada na Figura 4.6-3 obtemos o mapa de cobertura indicado na Figura 4.6-4.



Figura 4.6-4 – Mapa de Cobertura Rádio por Classes

Caso se pretenda determinar a zona de cobertura para um dado nível de sinal (por exemplo superior a -80 dBm) reclassifica-se a imagem da potência recebida com o valor desejado obtendo-se o mapa indicado na Figura 4.6-5.

Importa realçar o aumento de cobertura sobre o Tejo, resultante de uma atenuação menor sobre a água e uma vez mais se indica a zona de não aplicabilidade do modelo com um círculo vermelho mais pequeno (de raio de 1 000 m) e a zona onde o modelo poderá fornecer resultados menos precisos com um círculo vermelho maior (de raio 5 000 m).



Figura 4.6-5 – Área de Cobertura para um Sinal Superior a –80 dBm

Calculando o perfil longitudinal com a função PROFILE ao longo de uma dada direcção, pode-se obter facilmente um gráfico da atenuação com a distância, segundo essa mesma direcção. Para obter o perfil da atenuação segundo uma dada direcção é digitalizado sobre a imagem da atenuação a linha sobre a qual se quer calcular esse perfil.

A título ilustrativo, obteve-se o perfil longitudinal segundo a direcção de máxima radiação da antena (azimute = 240°) e para as imagens correspondentes ao modelo de propagação em espaço livre e ao modelo de Okumura-Hata.

Pela análise do gráfico apresentado, pode-se verificar que a previsão de sinal com recurso ao modelo de Okumura-Hata conduz a valores de potência significativamente inferiores ao modelo de propagação em espaço livre, ou seja, a estimação de sinal pelo modelo de espaço livre conduz a erros significativos

Comparação da Previsão de Sinal (Espaço Livre e Okumura)



Figura 4.6-6 – Comparação da atenuação em espaço livre e segundo o modelo de Okumura

•

# **CAPÍTULO 5**

## Medidas de Campo e Aferição do Modelo

Neste Capítulo define-se uma metodologia de recolha, processamento e inserção de medidas no SIG. Comparam-se níveis de sinal medidos com a previsão de sinal fornecida pelo modelo implementado no SIG e com a previsão de sinal calculada através de um programa externo desenvolvido no IST. A partir das medidas e dos valores de previsões de sinal obtidos pelos dois métodos realiza-se um conjunto de análises estatísticas sobre as respectivas imagens, designadamente, cálculo de médias, de desvios padrão e de histogramas, com vista à aferição do modelo.

### 5.1 Metodologia para a Obtenção de Medidas

Neste secção define-se uma metodologia para georeferenciar um conjunto de medidas de sinal, que incidiram sobre uma zona de Lisboa, que engloba as EBs de S. Sebastião, Campo Pequeno e Av. da República, indicada aproximadamente na fotografia aérea apresentada na Figura 5.1-1.

Na zona de estudo indicada, foram realizadas medidas de campo para as frequências de 900 MHz e 1800 MHz, com vista à comparação geoestatística dessas medidas entre si e com os valores de previsão calculados. As referidas medidas foram realizadas pelos alunos finalistas da Licenciatura de Eng<sup>a</sup> Electrotécnica e de Computadores, João Chaves e Pedro Oliveira e contaram com o apoio da empresa Telecel, um operador Português de comunicações móveis GSM, que disponibilizou todo o equipamento necessário.

Na recolha das medidas de sinal deverão ser registados vários parâmetros, designadamente: localização geográfica do ponto medido em termos de latitude e longitude, intensidade do sinal recebido, código da EB, frequência de trabalho, data e hora da medida. O equipamento geralmente usado consiste num medidor de campo (telemóvel com *software* apropriado), um GPS e um computador portátil para registo dos valores de posição, hora e intensidade do sinal recebido. De forma a minimizar o erro de posicionamento por GPS, devido fundamentalmente ao erro de cerca de

100 m, introduzido pelo Departamento de Defesa dos EUA (DoD), deverá ser feita uma correcção diferencial em pós processamento dos valores de posicionamento obtidos.



Figura 5.1-1 – Fotografia Aérea Digitalizada da Zona de Estudo (Fonte: IPCC)

### 5.2 Registo e Processamento de Medidas

Para facilitar a análise, tratamento e processamento de medidas obtidas em campo, estas devem ser armazenados em tabelas de uma base de dados relacional, juntamente com outras informações relevantes fornecidas pelo operador, como sejam, localização das EB, altitude da antena, potência radiada, tipo de antena, diagrama de radiação e outros.

Com o propósito de registar e processar as medidas obtidas no terreno foi criada uma base de dados com o esquema relacional indicado na Figura 5.2-1.





Figura 5.2-1 - Diagrama Entidade - Associação para Modelação da Base de Dados

Do diagrama Entidade-Associação apresentado, resultam as seguintes relações (tabelas) a implementar na base de dados:

### A - Entidades Consideradas:

**Estações Base** (<u>Código da Estação</u>, Designação, Localização\_Distrito, Localização\_Concelho, Localização\_Freguesia)

Antenas (Código da Antena, Ganho Máximo, Diagrama de Radiação)

Ganho Direccional da Antena (Diagrama de Radiação, Azimute, Ganho Azimutal)

#### Sectores (Código de Sector, Designação)

#### **B** - Associações Consideradas:

**Estações Base - Sectores** (<u>Código da Estação\*, Código de Sector\*</u>, Código da Antena Emissão\*, Código da Antena Recepção\*, Cota do Terreno, Altura da Antena, Azimute da Antena, Down-Tilt Electrónico, Down-Tilt Mecânico, Potência de Alimentação, Latitude, Longitude)

**Valores Medidos** (<u>N.º Medida</u>, Latitude, Longitude, Intensidade do Sinal, Código da Estação\*, Código de Sector\*, Frequência de trabalho, data, hora da medida).

Os atributos sublinhados são as chaves primárias e os assinalados com \* são as chaves estrangeiras. A título ilustrativo é indicado na Tabela 5-1 um exemplo de parte da tabela com os valores medidos:

ID	Μ	Р	Sinal	Codigo_EB	Banda	Codigo_Sector
1	112028,5	197596,1	-65,00	C_PEQ	1800	A
2	112029,1	197593,3	-64,43	C_PEQ	1800	А
3	112029,1	197592,8	-64,40	C_PEQ	1800	А
4	112029,2	197592,7	-64,43	C_PEQ	1800	А
5	112029,3	197592,0	-64,29	C_PEQ	1800	А
6	112029,4	197591,1	-63,90	C_PEQ	1800	А
7	112029,7	197589,8	-63,57	C_PEQ	1800	A
8	112029,8	197589,3	-63,57	C_PEQ	1800	A

Tabela 5-1 – Valores de Sinal Medidos em Campo

### 5.3 Georeferenciação de Medidas no SIG

A georeferenciação das medidas foi efectuada sobre uma imagem com resolução espacial de 8 m no terreno, considerando-se como atributo o valor médio das medidas que caem dentro de cada quadrícula. O valor médio do sinal recebido numa quadrícula é dado pelo quociente entre a soma de todos valores medidos dentro de uma dada quadrícula e o número de medidas que caem dentro dessa mesma quadrícula. Deste modo, é possível relacionar os valores experimentais para as várias frequências e os valores de previsão, mesmo que estes sejam medidos ou calculados em localizações espaciais ligeiramente diferentes, desde que os mesmos caiam no interior da mesma quadrícula. Os respectivos valores são relacionáveis entre si porque ocupam o mesmo espaço geográfico, ou seja a mesma quadrícula de 8 m.

Os valores correspondentes às medidas são recuperados, por interrogação à base de dados atrás indicada, com base nos critérios de selecção pretendidos. O resultado dessa interrogação é inserido num ficheiro de texto (X,Y,Z) com os valores X, Y associados às coordenadas no terreno e o valor Z associado ao valor da medida. No IDRISI este ficheiro é importado para formato vectorial, convertido

para formato matricial, usando a função POINTRAS (Vector to Raster Conversion – Point) e em seguida são produzidas três imagens com:

- a frequência de pontos contidos em cada célula da imagem (número de pontos de medida na célula),
- a soma dos identificadores Z dos pontos (soma de todos os valores medidos em cada célula),
- uma máscara das células onde existem medidas (a célula toma o valor 1 se existir pelo menos uma medida no seu interior e 0 caso contrário).

Estas imagens poderão ter a resolução espacial que se pretenda, a qual define a chave espacial que irá permitir relacionar os dados medidos com os valores de previsão no mesmo espaço geográfico, ou seja sobre o mesmo pixel.

Foram experimentados vários valores para encontrar a dimensão mais adequada para o pixel, constatando-se que valores entre 2 m e 10 m parecem adequados. Neste intervalo de valores a resolução espacial ainda é suficiente para a grandeza observada, permite a obtenção de valores estatísticos com uma amostra com uma dimensão adequada e ainda possibilita a produção de mapas com as medidas obtidas com boa representação e visualização. Face a estas considerações, foi escolhido o valor de 8 m para a dimensão do pixel, valor idêntico à resolução das imagens usadas em Capítulos anteriores, facilitando deste modo a comparação com imagens já existentes.

Usando as ferramentas de importação de dados do IDRISI (módulo IMPORT-XYZIDRIS) procedeu-se à importação dos dados no formato X,Y,Z e converte-se para o formato vectorial do IDRISI. Seguidamente procede-se à conversão do ficheiro vectorial para *raster* com o módulo de Conversão Vector / RASTER POINTRAS que converte o atributo do ponto (valor do sinal) num valor para o pixel.

A construção de uma imagem com as medidas georeferenciadas envolve os seguintes passos a indicar:

- 1. Definir três imagens iniciais em branco georeferenciadas para serem actualizadas pelo módulo de conversão vectorial / *raster* e que serão usadas nos passos seguintes.
- 2. Construção de uma imagem com a frequência de pontos amostrados para cada pixel, ou seja o número de pontos que caem dentro da respectiva quadrícula (pixel). Para cada pixel temos,

$$Valor do pixel_i = N_i$$
 (5. 1)

em que N<sub>i</sub> – Número de pontos que caem dentro dos limites do pixel.

 Construção de uma imagem com a soma dos valores de todos os pontos que caem dentro de cada pixel. Para cada pixel temos,

Valor do pixel<sub>i</sub> = 
$$\Sigma_i V_i$$
 (5. 2)

em que V<sub>i</sub> - Valores das Medidas dos pontos que caem dentro dos limites do pixel.

4. Construção de uma imagem com o valor médio dentro do pixel, dividindo a imagem da soma de valores pela imagem com a frequência de valores. Para cada pixel temos,

Valor do pixel<sub>i</sub> = 
$$\Sigma_i V_i / N_I$$
 (5.3)

 Construção de uma imagem com a máscara das medidas (célula com o valor 1 se tem medida e 0 se não tem medida).

Na Figura 5.3-1 temos uma imagem com o número de medidas em cada célula (número de medidas dentro da quadrícula por unidade de tempo, já que o ritmo de obtenção das medidas foi constante, uma por segundo). Pode-se verificar, por curiosidade, os instantes em que a velocidade do veículo no qual se fez as medidas foi menor ou parou (zonas a vermelho onde chegou a 58 medidas por célula) devido ao tráfego, semáforos ou outras paragens.



Figura 5.3-1 - Frequência das Medidas de Sinal (número de medidas por célula)

A utilização dos procedimentos atrás indicados na georeferenciar das medidas referentes à Estação Base do Campo Pequeno (Sector C, frequência 900 MHz, conduz à imagem indicada na Figura 5.3-2.

#### EB: (Campo Pequeno - 900 MHz ) - Sinal Medido [dBm]



Figura 5.3-2 – Estação Base do Campo Pequeno - Medidas de Sinal para 900 MHz [dBm]

Na zona em estudo o sinal medido varia entre -96 dBm e -40 dBm. Pode verificar-se na imagem um sinal mais forte, indicado em tons de vermelho, nas zonas mais próximas da Estação Base onde se situa o emissor, decaindo com a distância e também nas vias mais estreitas. A construção do histograma da mesma imagem conduziu aos resultados indicados na Figura 5.3-3, onde se pode observar um valor médio do sinal -72,7 dBm e um desvio padrão de 12,7 dB.



Figura 5.3-3 - Histograma da Imagem com as Medidas de Sinal a 900 MHz

A fim de analisar a evolução do sinal e efectuar posteriormente comparações entre as medidas de sinal a 900 MHz e a 1800 MHz foram igualmente georeferenciadas no IDRISI as medidas de sinal a 1800 MHz, obtendo-se a imagem indicada na Figura 5.3-4.



EB: (Campo Pequeno - 1800 MHz) Sinal Medido [dBm]

Figura 5.3-4 – EB Campo Pequeno - Sinal Medido a 1800 MHz [dBm]

O sinal na zona indicada varia entre -97 dBm e -53 dBm. Através do histograma da imagem podemos obter a informação estatística indicada na Figura 5.3-5. O valor médio do sinal é de –79,6 dBm e o desvio padrão é de 8 dB.



Figura 5.3-5 Histograma da Imagem com as Medidas de Sinal a 1800 MHz

### 5.4 Comparação das Medidas em 900 e 1800 MHz

A diferença entre o sinal recebido em ambas as frequências é determinada através de uma operação de subtracção das duas imagens, combinada com a aplicação de uma máscara (de forma a que a comparação seja efectuada apenas nos pontos do espaço onde existam medidas para ambas as frequências), resultando após reclassificação a imagem indicada na Figura 5.4-1.





Figura 5.4-1 - Diferença de Sinal Medido a 900 MHz e 1800 MHz por Classes

Verifica-se que o sinal em 900 MHz é superior ao sinal em 1800 MHz em praticamente todos os pontos de medida. O valor máximo da diferença ocorre nas vias mais largas, especialmente na Av. da República.

Pode igualmente ser feita uma análise estatística dos desvios através da construção do histograma da imagem dos desvios, Figura 5.4-2, onde se pode observar um desvio médio de 19,4 dB (sinal a 900 MHz acima do sinal a 1800 MHz), com um desvio padrão de 18 dB.



Figura 5.4-2 - Histograma da Imagem com a Diferença de Sinal Medido a 900 MHz e a 1800 MHz

### 5.5 Cálculo da Atenuação em Programa Externo

Com o objectivo de obter valores de referência e comparar os resultados fornecidos pelo modelo estatístico de Okumura-Hata implementado no SIG, utilizou-se um programa desenvolvido, no DEEC (Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores) do IST, por A. Clara, e J. Ferreira [18] fora do ambiente do SIG. Os resultados obtidos neste programa são posteriormente importados para o SIG para tratamento estatístico e comparação com as medidas realizadas em campo. Para o cálculo da atenuação neste programa é necessário um conhecimento da geografia e da orografia da zona de estudo, podendo para tal ser usados os resultados das análises efectuadas no Capítulo 3.

No programa de cálculo da atenuação o ambiente da propagação é caracterizado através de três ficheiros de dados:

- Bloco.dat ficheiro construído a partir de uma carta topográfica da zona em estudo com uma resolução de 50 metros e que inclui informação sobre a cota média do terreno, altura média dos edifícios, e tipo de cobertura do solo (edifício, água, vegetação).
- Vias.dat ficheiro que caracteriza todas as ruas localizadas na região de estudo, incluindo informação referente aos troços de via, coordenadas cartesianas de início e fim de cada um deles e a largura de cada troço de via.
- Cruzam.dat Ficheiro que contém informação geográfica relativa aos cruzamentos das ruas.

A descrição do modo de funcionamento deste programa sai do objectivo deste trabalho, pelo que não será descrito em pormenor, importando principalmente realçar a necessidade de uma boa caracterização da envolvente geográfica. Sendo a atenuação do sinal calculada por um programa

externo, esses valores terão de ser posteriormente importados para o SIG com o propósito de produzir as imagens correspondentes aos mapas de sinal para cobertura e interferência.

Usando os procedimentos já referidos para a importação de valores para o SIG, obtém-se a imagem apresentada na Figura 5.5-1, correspondente ao sinal previsto no programa externo para 900 MHz.



Sinal Estimado pelo Programa do DEEC-IST para 900 MHz [dBm]

Figura 5.5-1 - Estimativa de Sinal com Base no Cálculo da Atenuação em Programa Externo

O sinal estimado para a zona indicada varia entre -106 dBm e -34 dBm. A partir do histograma indicado na Figura 5.5-2, podemos obter o valor médio da potência radiada -82 dBm e o respectivo desvio padrão 11,4 dB.



Figura 5.5-2 – Histograma da Imagem com o Sinal Estimado por Programa Externo (900 MHz)

### 5.6 Cálculo do Desvio da Previsão no Programa Externo

A fim de verificar a exactidão da previsão obtida no programa externo efectua-se o cálculo do desvio entre a previsão do sinal e as medidas efectuadas em 900 MHz resultando após reclassificação a imagem indicada na Figura 5.6-1.



Desvios Sinal Medido e Sinal Estimado no Programa Externo [dB]

Figura 5.6-1 – Diferença entre Sinal Previsto no Programa Externo e Sinal Medido (900 MHz)

No histograma da imagem, indicado na Figura 5.6-2, podemos observar uma média de desvio entre previsão e sinal medido de 9,4 dB, com um desvio padrão de 10,4 dB, o que nos indica que o programa de cálculo externo conduz neste caso a valores estimados próximos das medidas obtidas.



Figura 5.6-2 – Histograma da Imagem Diferença entre Sinal Previsto no Programa Externo e Medido

### 5.7 Cálculo do Desvio da Previsão no Modelo Implementado

A fim de avaliar a exactidão do modelo implementado no SIG, efectua-se uma comparação entre os valores de previsão de sinal fornecidos pelo modelo e as medidas obtidas para 900 MHz. Para calcular o desvio da previsão no modelo implementado constrói-se uma imagem com a diferença entre sinal previsto e sinal medido, seguindo os procedimentos já anteriormente descritos. É de realçar a função de análise espacial envolvida, já que os valores de previsão e os valores medidos são relacionáveis apenas porque têm como atributo comum o mesmo espaço geográfico que compartilham, ainda que em instantes de tempo diferentes.

A previsão de sinal efectuada no Capítulo 4, com base no modelo de Okumura-Hata implementado no SIG, está indicada na Figura 5.7-1 apenas para a zona onde foram efectuadas medidas. A imagem apresentada corresponde a uma janela da imagem indicada na Figura 4.6-2 (Capítulo 4).

### Potência Estimada na Zona de Medidas (dBm)



Figura 5.7-1 – Potência Estimada pelo Modelo de Okumura-Hata na Zona de Medidas

Reclassificando a imagem anterior em classes de potência, a fim de melhorar a sua legibilidade fora do ambiente do SIG, obtém-se a imagem indicada na Figura 5.7-1 correspondente à potência estimada em intervalos de valores.



Figura 5.7-2 - Potência Estimada pelo Modelo de Okumura-Hata na Zona de Medidas por Classes

O desvio na previsão é calculado construindo uma imagem com a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os medidos no terreno, sendo a comparação feita apenas nas células onde existem medidas (através do uso de uma máscara com os pontos de medida) de acordo com,

obtendo-se após reclassificação a imagem indicada na Figura 5.7-3, correspondente à diferença (em intervalos de valores) entre sinal estimado e medido na frequência de 900 MHz.



Diferença entre Sinal Estimado e Medido em 900 MHz [dBm]

Figura 5.7-3 – Imagem da Diferença em Sinal Previsto e Medido por Classes

A diferença entre as duas imagens, ou seja entre os níveis de sinal previsto e medido, podem ser melhor observadas através do histograma da imagem diferença, apresentado na Figura 5.7-4.

Analisando o histograma apresentado, constata-se que a diferença média entre a previsão e o sinal medido é de -3,2 dB (previsão de sinal subestimada) com um desvio padrão de 18,1 dB. Pode concluir-se deste modo, que os resultados fornecidos pelo modelo implementado são uma boa aproximação das medidas obtidas em campo, isto apesar de algumas medidas terem sido feitas já dentro da zona limite da não aplicabilidade do modelo de Okumura-Hata (1 km em torno da EB).



Figura 5.7-4- Histograma da Imagem da Diferença entre Sinal Estimado e Medido

A exactidão na previsão do sinal recebido com o modelo estatístico implementado no SIG, sem qualquer afinação, está próxima da conseguida recorrendo ao programa externo para o cálculo da atenuação, o qual conduziu, como já anteriormente referido, a um desvio médio de 9,4 dB, com um desvio padrão de 10,4 dB.

As metodologias apresentadas neste Capítulo e as apresentadas nos Capítulos 3 e 4 permitem que todas as análises estatística aqui apresentadas possam ser facilmente obtidas, em simultâneo para várias zonas específicas dentro de uma imagem, como sejam ruas, sectores, coroas circulares, zonas urbanas, zonas com cobertura vegetal ou quaisquer outras, permitindo deste modo aferir os parâmetros dos modelos de propagação usados em cada caso particular.

# **CAPÍTULO 6**

## Análise Geoestatística

Neste Capítulo, são desenvolvidas metodologias que permitem estimar o tráfego viário, a população presente e o tráfego telefónico gerado numa determinada zona. A título ilustrativo, estima-se para a área de cobertura da Estação Base do Campo Pequeno, a população presente, o tráfego telefónico expectável e o número de canais telefónicos necessários para garantir uma dada qualidade de serviço previamente estabelecida.

### 6.1 Introdução

A possibilidade de estimar a população presente dentro de uma dada zona geográfica revela um interesse prático significativo, já que permite inferir indirectamente o tráfego telefónico gerado dentro dessa zona, podendo contribuir para um melhor dimensionamento de uma EB na sua fase de planeamento e implantação no terreno. Com esse objectivo são desenvolvidas metodologias, baseadas em SIG, que permitam estimar a população presente numa determinada área, bem como o tráfego telefónico gerado por essa mesma população.

A área em análise poderá ter uma forma geométrica regular como coroas ou sectores circulares, ou qualquer outra forma não regular ou dispersa, tal como a que resulta de um determinado mapa de cobertura rádio, calculado com base num dado modelo de propagação implementado no SIG. Para as situações cada vez mais usuais de utilização de antenas sectoriais é importante analisar a população presente dentro de sectores típicos de 120°. Interessa igualmente calcular a população presente dentro dos sectores definidos pelos diagramas de radiação de antenas já implantadas no terreno e orientadas segundo um determinado azimute cartográfico.

A zona coberta por sinal rádio tem geralmente uma forma irregular, podendo ter zonas de não cobertura dentro do seu contorno exterior, dificultando o cálculo do valor da área e da população presente por métodos manuais. Com a utilização da metodologia desenvolvida o cálculo da população

presente dentro de qualquer zona torna-se uma operação trivial, podendo-se inferir o tráfego telefónico gerado, com base nos mais variados indicadores, sócio-económicos.

De forma genérica, para a obtenção de dados demográficos e de tráfego rodoviário podem ser usadas, entre outras, as fontes a seguir indicadas:

### • Fontes primárias:

- Imagem Satélite
- Fotografia aérea
- Inquéritos
- Dispositivos electrónicos para contagem de veículos (espirais no solo ou radares)
- Levantamentos de campo

### • Fontes secundárias:

- INE dados sobre alojamentos, população residente, população presente, rendimentos.
- IEP (Ex. JAE) dados sobre mobilidade rodoviária.
- Operadores de transportes rodoviário, ferroviário, fluvial, marítimo e aéreo.

Para o caso ilustrativo de Lisboa, a população presente numa dada freguesia poderá ser estimada com base na população residente, segundo os dados do INE (Censos 91), corrigida com os movimentos pendulares das populações, quando se deslocam para os respectivos locais de trabalho. A análise dos movimentos pendulares das populações poderá ser feito analisando as entradas e as saídas de viaturas ligeiras, dados sobre transportes colectivos rodoviários, ferroviários e fluviais. Em alternativa pode-se recorrer a dados do INE (Censos 91) sobre os movimentos pendulares das populações na Área Metropolitana de Lisboa (AML), organizados segundo uma matriz de origem/destino. O conhecimento do Concelho em que um determinado indivíduo vive e o Concelho em que trabalha foi obtido por inquérito individual, no âmbito do Censos 91, levado a cabo pelo INE em 1991. Totalizando todos os dados individuais foi construída uma matriz de origens e destinos, na qual se pode calcular quantos indivíduo se deslocam de um concelho para outro.

Com base nos dados disponíveis sobre a população residente, pode ser calculado um padrão de distribuição dos indivíduos pelas diversas freguesias (distribuição percentual da população residente por freguesia) e com base nos dados sobre a distribuição dos empregos por freguesias, pode ser calculado um padrão de distribuição de empregos igualmente por freguesias. No caso ilustrativo em estudo, interessa fundamentalmente analisar quantas pessoas entram em Lisboa para trabalhar, quantas saem de Lisboa para trabalhar e quantas se deslocam dentro de Lisboa do local de residência para o local de trabalho. Com base nos dados sobre a mobilidade das populações, é calculada a densidade populacional de indivíduos presentes por freguesia, para os diversos períodos temporais (laboral e não
laboral), em função dos fluxos migratórios e dos padrões de distribuição de indivíduos residentes e de empregos.

A população presente numa dada freguesia será calculada com base na população residente, deduzida da população deslocada (de acordo com o padrão de distribuição de residentes) acrescida da população entrada (de acordo com o padrão de distribuição de empregos), obtendo-se uma imagem com a densidade da população presente por freguesia. Com a referida imagem poderá ser feita uma estimativa da população presente dentro de várias zonas de análise, designadamente para:

- Envolventes circulares com raios crescentes de 500 m a 5 000 m em incrementos de 500 m.
- Sectores circulares para raios crescentes de 500 m a 5 000 m em incrementos de 500 m mas delimitados por um sector de 120 °, dirigido segundo o azimute cartográfico correspondente ao máximo do diagrama de radiação da antena.
- Áreas com qualquer forma geométrica designadamente, as que resultam de mapas de cobertura.

Para as duas primeiras situações referidas, será construída uma tabela de valores com o total da população presente dentro de cada círculo e ainda um gráfico indicando a população presente em função da distância à EB. Com este gráfico é possível de forma simples interpolar os valores intermédios, podendo deste modo seleccionar o raio de cobertura mais adequado para servir um determinado número de indivíduos presentes.

Para o terceiro caso será feito o cálculo do valor da área, a previsão do número de indivíduos presentes e a estimativa do tráfego telefónico gerado, para a zona definida no mapa de cobertura da EB do Campo Pequeno, Figura 4.6-5, (calculada no Capítulo 4, através do modelo de propagação de Okumura-Hata implementado no SIG)

# 6.2 Definição de Zonas Homogéneas para Análise Espacial

Para realizar a análise da densidade do tráfego rodoviário ou do número de indivíduos presentes numa dada região é necessário construir uma imagem auxiliar com a definição de zonas de menor dimensão, que serão consideradas homogéneas para a grandeza observada. As imagens com as zonas de análise são construídas no SIG usando funções de distância, reclassificação e sobreposição de imagens. A título ilustrativo da metodologia proposta, considerou-se o caso particular em que a zona de análise se centra na localização da EB do Campo Pequeno em Lisboa.

Para a EB do Campo Pequeno as imagens de definição de zonas homogéneas consideradas neste estudo são as seguintes:

 Círculo centrado na localização da EB com um raio de 1000 m, tal como indicado a vermelho na Figura 6.2-1.



Figura 6.2-1 – Envolvente Circular de 1000 m para Definição de Zonas de Análise Espacial

2. Coroas circulares centradas na localização da EB com um raio variável de 500 a 5 000 m em incrementos de 500 m, tal como indicado na Figura 6.2-2.



Figura 6.2-2 – Envolventes de Coroas Circulares para Definição de Zonas de Análise Espacial

3. Coroas circulares centradas na localização da EB com um raio variável de 500 a 5 000 m em incrementos de 500 m, delimitados por um sector de 120°, conforme indicado na Figura 6.2-3.

#### Sectores Circulares de 500 m Centrados na EB do Campo Pequeno



Figura 6.2-3 - Sector Circular de 120° para Definição de Zonas de Análise Espacial

#### Construção das Imagens com a definição das zonas de análise

A título exemplificativo, são indicados os métodos de construção das imagens com a definição das zonas de análise para os seguintes casos: círculo de raio 1 000 m, coroas circulares de raios de 500 m a 5 000 m com incrementos de 500 m e sectores circulares de raios de 500 m a 5 000 m com incrementos de 500 m sector de 120°, orientado segundo o azimute de radiação máxima da antena considerada (EB do Campo Pequeno, Sector C).

## 1. Círculo de raio definido

A imagem correspondente à envolvente circular de raio 1 000 m, pode ser obtida através da função BUFFER de valor 1 000 m, aplicada sobre a imagem de localização da EB Campo Pequeno, resultando o imagem da Figura 6.2-4.

#### Envolvente Circular de Raio 1000 m EB: Campo Pequeno



Figura 6.2-4 – Imagem da Definição de Zona Circular para a Análise Espacial

### 2. Coroas circulares de raio definido

A imagem correspondente às envolventes circulares de raio 500 m, pode ser obtida por reclassificação da imagem da distancia à EB em classes de intervalo 500 m até ao limite de 10 classes, resultando a imagem indicada na Figura 6.2-5.





Figura 6.2-5 – Imagem da Definição de Zonas Circulares para a Análise Espacial

## 3. Coroas circulares em sectores polares

A imagem correspondente às envolventes circulares de raio 500 m dentro de um sector de 120° pode ser construída por reclassificação da imagem distância à EB em classes de intervalo 500 m

até ao limite de 10 classes (imagem já anteriormente construída), multiplicada pela imagem de definição do sector polar de 120°, resultando a imagem da Figura 6.2-6.



Figura 6.2-6 - Imagem da Definição de Zonas de Sectores Circulares para a Análise Espacial

# 6.3 Análise da Distribuição do Tráfego Viário

Neste estudo será incluído o desenvolvimento de uma metodologia de análise da distribuição do tráfego rodoviário, devido ao interesse que se espera que este tema possa vir a despertar, em consequência dos futuros serviços telemáticos para viaturas propostos pelos principais fabricantes do ramo automóvel. O surgimento destes novos serviços, baseados nas comunicações de dados SMS (Short Message Service) sobre GSM e no posicionamento por satélite (GPS), irão aumentar significativamente o potencial de comunicação móvel com as viaturas. É expectável a curto prazo que as novas viaturas venham equipadas com equipamento terminal de comunicações GSM/SMS que permita pedidos automáticos de assistência e de socorro em estrada, telemetria de veículos, alarme, seguimento de veículos roubados em mapas digitais e a sugestão de itinerários alternativos em função de dados em tempo real sobre o tráfego rodoviário. O desenvolvimento nos operadores de telecomunicações de serviços que permitam a determinação da posição da viatura, com algum rigor e muito baixo custo (sem necessidade de GPS), com base na determinação da distância (determinação do tempo de propagação das ondas electromagnéticas) a várias estações de base abre igualmente um potencial de utilização que poderá vir a ser significativo num futuro próximo.

Nestas circunstâncias, podemos antever que a curto prazo as viaturas poderão *per si* ser elementos geradores de comunicações móveis, pelo que parece importante desenvolver metodologias, que

permitam estimar a sua distribuição geográfica e a sua densidade espacial, com base em medições pontuais de tráfego efectuada por processos automáticos.

Neste estudo são usados os dados sobre tráfego viário, disponibilizados em ficheiro pelo IEP (Instituto de Estradas de Portugal). Estes dados são armazenados em tabelas de uma base de dados para processamento no SIG. Importa realçar que em virtude dos escassos dados disponíveis sobre o tráfego viário, designadamente poucos de pontos de medida, os resultados apresentados tem apenas um caracter ilustrativo da metodologia proposta. Para o estudo que se pretende realizar os resultados que se possam obter não têm qualquer significado em termos práticos, devido à dimensão das células de GSM da ordem de 1000 m (em ambientes urbanos), podendo todavia ser usados em outros sistemas de comunicações móveis como seja o *trunking*. No entanto, a tendência crescente de efectuar medidas de tráfego viário de forma automática nas cidades (através de espiras no pavimento e radares de contagem), faz antever o aparecimento, a curto prazo, de dados mais fiáveis e com uma resolução espacial compatível com o tipo de análise que se pretende em GSM.

Os dados de tráfego viário disponibilizados pelo IEP referem-se a medidas obtidas em estradas situadas em zonas envolventes de Lisboa. Efectuando operações de selecção e agrupamento desses dados, obteve-se uma imagem matricial indicada na Figura 6.3-1, com os vários pontos de medida e respectivos identificadores, que funcionam como elemento de ligação à base de dados.



Figura 6.3-1 - Georeferenciação dos Pontos de Medida de Tráfego Rodoviário (Fonte: JAE)

Sobre a imagem com os valores de tráfego para cada ponto de medida, podem ser construídos polígonos de Thiessen, com o objectivo de estimar as zonas de influências das medidas realizadas, obtendo-se a título ilustrativo a imagem da Figura 6.3-2.

Importa realçar uma vez mais, que os resultados obtidos não permitem efectuar qualquer estimava do tráfego no interior da cidade de Lisboa, pelo que não serão usados neste trabalho.

#### Poligonos de Thiessen Definidos por 30 Postos de Contagem



Figura 6.3-2 - Diagrama de Voronoi para Determinação das Regiões de Influência das Medida

Em alternativa, para estimar a densidade de tráfego dentro de Lisboa, ainda que de forma muito grosseira, optou-se por considerar os dados sobre o tráfego penetrante em Lisboa disponibilizados pela CML. Reconhece-se a falta de rigor dos resultados que venham a ser obtidos devido à escassez de dados disponíveis. No entanto pretende-se apenas ilustrar a metodologia proposta, a qual poderá ser usada em situações onde existam dados suficientes. O número de veículos e as principais zonas de entrada em Lisboa, segundo dados de 1998, são as indicadas na Figura 6.3-3.



Figura 6.3-3 – Diagrama Indicativo do Tráfego Penetrante em Lisboa (Fonte: CML)

Com base nos valores de tráfego nos pontos indicados, procede-se à sua referenciação espacial e ligação do respectivo atributo à base de dados. Seguidamente, obtêm-se os polígonos de Thiessen, indicados na Figura 6.3-4, com o fim de determinar as zonas mais influenciadas pelas medidas pontuais. Deste modo, determinam-se as zonas do espaço com valores de tráfego idênticos aos dos pontos medidos.





Figura 6.3-4 - Diagrama de Voronoi para Determinação de Regiões de Influência

Em seguida, confina-se a área em análise à limitada pelo contorno exterior da cidade, obtendo-se a imagem indicada na Figura 6.3-5.



Figura 6.3-5 - Diagrama de Voronoi Limitado à Área da Cidade de Lisboa

Posteriormente, liga-se cada ponto do espaço à base de dados, através do identificador da zona inscrito em cada célula, construindo-se uma imagem na qual cada ponto do espaço tem inscrito o valor do tráfego determinando para a zona a que pertence.

Dividindo o valor anterior pela área de cada zona (calculada em quadrículas), obtem-se o valor da densidade de tráfego para cada ponto do espaço indicada na Figura 6.3-6.

Densidade do Tráfego Penetrante em Lisboa



Figura 6.3-6 – Densidade por Célula do Tráfego Penetrante em Lisboa

Ligando a densidade de tráfego por célula com a dimensão das freguesias em células, obtêm-se uma estimativa do tráfego por freguesia, indicada na Figura 6.3-7.





Figura 6.3-7 – Densidade de Tráfego por Célula Estimado para as Freguesias de Lisboa

De acordo com a imagem obtida pode observar-se uma maior densidade espacial de tráfego viário nas freguesias ocidentais (em tons de vermelho) e uma menor densidade nas freguesias orientais (em tons de verde).

## 1. Cálculo de viaturas presentes para zonas definidas por um círculo de 1 000 m

Uma análise possível, consiste em determinar o total de viaturas presentes numa zona centrada na EB, com um raio de 1 000 m, tal como indicado na Figura 6.3-8.



Densidade do Trafego Penetrante em Lisboa

Figura 6.3-8 - Cálculo de Viaturas Presentes para Zonas Definidas por um Círculo de 1000m

Efectuando o cálculo no SIG, através da função EXTRACT, determina-se que o total estimado de viaturas presentes dentro do círculo assinalado é de 6 376.

## 2. Cálculo de viaturas presentes em zonas definidas por sectores circulares

Outro cálculo que poderá ser feito, consiste em determinar o número acumulado de viaturas presentes dentro de círculos, centrados na EB, para raios crescentes de 500 m até aos 5 000 m, tal como indicado na Figura 6.3-9.

#### Densidade do Trafego Penetrante em Lisboa



Figura 6.3-9 - Cálculo de Viaturas Presentes para Zonas Definidas por Coroas Circulares

Efectuando o cálculo no SIG, através da função EXTRACT, determina-se o total estimado de viaturas presentes dentro dos círculos assinalados, cujos valores constam na Tabela 6-3.

	Distância à	Viaturas	Acumulado de		
Zona	EB	Previstas no Sector	Viaturas no Sector		
	(m)	Circular	Circular		
1	500	1 679	1 679		
2	1000	4 698	6 376		
3	1500	7 967	14 343		
4	2000	12 803	27 146		
5	2500	17 182	44 328		
6	3000	21 436	65 763		
7	3500	25 662	91 425		
8	4000	26 408	117 833		
9	4500	24 639	142 472		
10	5000	24 644	167 116		

Tabela 6-1 – Estimativa de viaturas presentes em sectores circulares.

Os valores apresentados na referida tabela, podem ser vistos sob a forma do gráfico indicado na Figura 6.3-10, no qual é possível interpolar o número de viaturas presentes para qualquer raio, ou inversamente determinar o raio dentro do qual estão presentes um dado número de viaturas.



Acumulado Viaturas Previstas - Sectores Circulares

Figura 6.3-10 - Gráfico com o Total de Viaturas Presentes Dentro de Coroas Circulares

## 3. Estimativa das viaturas presentes dentro de zonas definidas por sectores polares.

Como as antenas são geralmente sectoriais, pode interessar caracterizar apenas um determinada sector. Caso ainda não seja conhecida a antena a instalar pode-se tomar como referência um sector de 120 graus dirigido segundo um dado azimute (neste caso particular 240 °), tal como indicado na Figura 6.3-11.



Figura 6.3-11 - Cálculo de Viaturas Presentes para Zonas Definidas por Sectores Circulares

Efectuando o cálculo no SIG, através da função EXTRACT, determinou-se o total estimado de viaturas presentes no interior dos círculos assinalados, cujos valores constam na Tabela 6-2.

Zana	Distância à	Viaturas	Acumulado de		
Zona	EB (m)	Previsias	Viaturas no Sector		
	(111)	no sector i orar	1 Olai		
1	500	580	580		
2	1000	1 729	2 309		
3	1500	3 114	5 423		
4	2000	5 739	11 162		
5	2500	7 852	19 014		
6	3000	9 858	28 872		
7	3500	11 831	40 703		
8	4000	13 686	54 389		
9	4500	14 331	68 719		
10	5000	14 785	83 504		

Tabela 6-2 - Estimativa de viaturas presentes em sectores polares de 120°.

Os valores apresentados na referida tabela, podem ser vistos sob a forma do gráfico indicado na Figura 6.3-12, que permite estimar o número de viaturas presentes numa determinada zona em estudo ou em alternativa a dimensão máxima da zona de serviço para um dado valor máximo de viaturas.



#### Acumulado Viaturas Previstas - Sector Radial

Figura 6.3-12 - Gráfico com o Total de Viaturas Presentes Dentro de Sectores Circulares

Tal como já referido anteriormente, importa realçar que os resultados apresentados são pouco significativos para um estudo prático de tráfego GSM, fundamentalmente devido à pequena resolução espacial dos pontos de medida do tráfego viário (apenas medidas em 5 pontos de entrada de Lisboa). No entanto, na falta de melhores dados, a metodologia apresentada poderá vir a ter interesse prático, quando no futuro se venha a dispor de medidas com uma resolução espacial mais adequada. A determinação da correlação espacial entre tráfego viário e tráfego telefónico poderá ser importante, já que num futuro próximo, uma percentagem significativa das viaturas poderão estar equipadas com

equipamento autónomo de comunicação de dados GSM/SMS. Estas viaturas irão permitir uma grande variedade de serviços telemáticos (incluindo o acesso à Internet), potencialmente geradores de muito tráfego telefónico em GSM e muito provavelmente também nos sistemas que lhe vão suceder a curto prazo, como seja o UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), um sistema de terceira geração para comunicações móveis em desenvolvimento na Europa, fortemente vocacionado para a comunicação de dados para além da voz.

# 6.4 Análise da Distribuição da População

O cálculo da população presente numa determinada área e a uma dada hora, é efectuado recorrendo a um modelo desenvolvido neste trabalho. Este modelo entra em linha de conta com a distribuição espacial da população residente, com a distribuição espacial do trabalho e com a mobilidade dos indivíduos, designadamente, entradas e saídas da zona em análise e movimentos no seu interior dos locais de residência para os locais de trabalho.

A distribuição espacial da população residente e a distribuição espacial do trabalho podem ser obtidas recorrendo aos dados estatísticos sobre demografia e emprego, desagregados em pequenas unidades espaciais, geralmente a freguesia ou a secção estatística. Os movimentos das populações podem ser determinados a partir de várias fontes, designadamente, inquéritos estatísticos, tráfego rodoviário colectivo e individual, ferroviário, fluvial e aéreo.

A distribuição espacial da população residente pode ser modelada através de uma matriz coluna do tipo,

$$\mathbf{RZ} = \begin{bmatrix} RZ_1 \\ RZ_2 \\ \dots \\ RZ_n \end{bmatrix}$$
(6.1)

onde,

 $RZ_n$  - representa a percentagem de população que reside na Zona n

sendo  $\sum_{n} RZ_{n} = 1$ 

A distribuição espacial do trabalho na região pode ser modelada através de uma matriz coluna,

$$\mathbf{TZ} = \begin{bmatrix} TZ_1 \\ TZ_2 \\ \dots \\ TZ_n \end{bmatrix}$$
(6. 2)

onde,

 $TZ_{n}\xspace$  - representa a percentagem de empregos existentes na Zona n

sendo  $\sum_{n} TZ_{n} = 1$ 

A distribuição espacial, a uma dada hora do dia, da população numa dada região (p.e. Lisboa), é determinada pelas entradas e saídas de indivíduos e pelas deslocações de umas zonas para outras zonas (p.e. Freguesias) dentro da mesma região. Neste modelo será assumido como hipótese que:

as **entradas** correspondem predominantemente a indivíduos que entram na região para trabalhar, distribuindo-se nessa região segundo um padrão de distribuição do emprego.

as **saídas** correspondem predominantemente a indivíduos que saem da região para trabalhar fora, abandonando a região segundo um padrão de distribuição de residentes.

a **movimentação interna** corresponde predominantemente a indivíduos que abandonam o local de residência e deslocam-se para os locais de trabalho, dentro da mesma região, ou seja, equivale a saídas de acordo com o padrão de distribuição de residentes e entradas de acordo com o padrão de distribuição do emprego.

Sejam para uma dada região,

 $N_{resid}$  - o número total de residentes

 $N_{entradas}$  - o número de indivíduos que entram diariamente

 $N_{saídas}$  - o número de indivíduos que saem diariamente

- $N_{movim}$  o número de indivíduos que se movimentam diariamente dos locais de residência para o local de trabalho dentro de uma mesma região.
- PZ<sub>n</sub>-o número total de indivíduos presentes na Zona n

Em período não laboral a distribuição espacial da população presente pode ser estimada por

$$\mathbf{PZ} = \begin{bmatrix} PZ_1 \\ PZ_2 \\ \dots \\ PZ_n \end{bmatrix} = \mathbf{N}_{\text{resid}} \cdot \begin{bmatrix} RZ_1 \\ RZ_2 \\ \dots \\ RZ_n \end{bmatrix}$$
(6.3)

Em período laboral a distribuição espacial da população presente pode ser estimada por

$$\mathbf{PZ} = \begin{bmatrix} PZ_1 \\ PZ_2 \\ \dots \\ PZ_n \end{bmatrix} = (\mathbf{N}_{\text{resid}} \cdot \mathbf{N}_{\text{movim}} \cdot \mathbf{N}_{\text{safdas}}) \cdot \begin{bmatrix} RZ_1 \\ RZ_2 \\ \dots \\ RZ_n \end{bmatrix} + (\mathbf{N}_{\text{entradas}} + \mathbf{N}_{\text{movim}}) \cdot \begin{bmatrix} TZ_1 \\ TZ_2 \\ \dots \\ TZ_n \end{bmatrix}$$
(6.4)

Para qualquer dos casos a densidade da população presente numa dada zona  $DZ_n$  é dada por

$$\mathbf{DZ} = \begin{bmatrix} DZ_1 \\ DZ_2 \\ \dots \\ DZ_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PZ_1 \\ PZ_2 \\ \dots \\ PZ_n \end{bmatrix} / \begin{bmatrix} AZ_1 \\ AZ_2 \\ \dots \\ AZ_n \end{bmatrix}$$
(6.5)

em que,

# $AZ_n$ - é a área da Zona <sub>n</sub> que pode ser calculada em qualquer unidade (no entanto, a implementação no SIG deste modelo é mais simples se a área for calculada em células da matriz da imagem)

A partir da matriz com as densidades espaciais da população para cada zona (p.e. freguesias ou secções estatísticas), constrói-se no SIG uma imagem correspondente desagregada por zonas. Integrando os valores da densidade para uma qualquer área, recorrendo às funções específicas do SIG, obtem-se a população presente nessa área ou áreas, quaisquer que sejam os seus contornos. A título ilustrativo desta modelação, será feito o cálculo, para a cidade de Lisboa, da população presente em áreas características (coroas, sectores circulares e células hexagonais), incluindo uma zona de serviço correspondente a uma área de cobertura rádio, calculada pelo modelo de propagação (Capítulo 4) para a estação base do Campo Pequeno.

No estudo demográfico que se segue, são usados os dados estatísticos referente ao recenseamento geral da população CENSOS 91, disponibilizados pelo INE em suporte papel. Os elementos fornecidos estão desagregados geograficamente ao nível da freguesia e contêm informação referente à população residente e à população presente aquando do inquérito, segmentada entre homens e mulheres. Os valores indicados no Censos 91, correspondentes à população presente e residente numa dada freguesia, não variam de forma significativa, sendo a população presente em média superior em

cerca de 3 %. Para o estudo demográfico que se segue, foram utilizados os valores correspondentes à população residente.

O primeiro passo consiste na construção de uma imagem com os códigos das freguesias com a codificação definida pelo INE e a georeferenciação dos contornos das freguesia. Para esse efeito, foi obtida na CML uma cartografia vectorial, correspondente aos limites das freguesias de Lisboa e posteriormente convertida de polígonos para formato matricial, através do módulo POLYRAS do IDRISI, obtendo-se a imagem indicada na Figura 6.4-1.





Figura 6.4-1 – Imagem com os Códigos de Freguesia de Lisboa

Esta imagem é ligada, através do atributo código de freguesia, presente em cada célula, a uma tabela de uma base de dados ACCESS contendo a informação alfanumérica associada, correspondente aos valores de população residente, tal como indicado na Tabela 6-3.

CÓDIGO	FREGUESIA	Residentes	% Total
1	Ajuda	22 404	3,4%
2	Alcântara	18 510	2,8%
3	Alto do Pina	12 654	1,9%
4	Alvalade	10 996	1,7%
5	Ameixoeira	10 605	1,6%
6	Anjos	12 490	1,9%
7	Beato	17 494	2,6%
8	Benfica	47 099	7,1%
9	Campo Grande	12 146	1,8%
10	Campolide	20 972	3,2%
11	Carnide	14 768	2,2%
12	Castelo	773	0,1%
13	Charneca	9 572	1,4%
14	Coração de Jesus	5 379	0,8%
15	Encarnação	3 072	0,5%
16	Graca	8 604	1.3%
17	Lapa	10 656	1.6%
18	Lumiar	35 390	5.3%
19	Madalena	526	0.1%
20	Mártires	401	0.1%
21	Marvila	47 827	7.2%
21	Mercês	6 039	0.9%
22	Nossa Senhora de Fátima	18 611	2.8%
23	Pena	7 045	1.1%
25	Penha de França	17 885	2 7%
25	Prazeres	10.068	1.5%
20	Sacramento	1 167	0.2%
27	Santa Catarina	5 153	0,270
20	Santa Catarina Santa Engracia	7 626	1.1%
30	Santa Ligideia Santa Isabel	9 2/9	1,170
31	Santa Iusta	1 1 5 2	0.2%
32	Santa Justa Santa Maria de Belém	12 092	1.8%
32	Santa Maria de Delem	51 367	7 7%
33	Santa Maria dos Orivais	1 226	0.2%
34	Santa Condestával	22 186	3 304
35	Santo Condestavei	22 180	0.5%
27	Santo Estevao	5 5 2 4	0,370
20	Santos o venio	2 4 4 2	0,870
30	São Domingos do Ponfico	2 442	5 20/
40	São Francisco Vaviar	9 665	J,5%
40	São Ioão	21 060	2 204
41	São João de Brito	21 900	2,3%
42	São João de Drug	1/ 143	2,0%
43	São Jorgo do Arreiro	13 309	2,0%
44	São José	4 420	5,5%
43	São Mamada	4 4 30	0,/%
40	Sao Miguel	2 (12	1,1%
4/	São Nigolar	2 013	0,4%
48	Sao Inicolati	1 448	0,2%
49	Sau raulu	4 6 / 6	0,/%
50	Sao Sebastiao da Pedreira	/ 842	1,2%
51	Sao vicente de Fora	5 453	0,8%
52	Se	1 926	0,3%
53	Socorro	4 309	0,6%
	ΤΟΤΑL	663 394	100,0%

Tabela 6-3 – População residente em Lisboa por Freguesias (Fonte: INE)

Com base nos dados da referida tabela, relativos à distribuição da residência, em Lisboa por freguesias, determina-se o modelo de distribuição espacial dos indivíduos que residem na cidade de Lisboa (**RZ**) resultando a imagem indicada na Figura 6.4-2. Esta imagem com o padrão de distribuição espacial da população residente em Lisboa, expresso em percentagem relativamente ao total de população residente será um elemento importante na análise posterior da mobilidade residência-trabalho.



Figura 6.4-2 - Padrão de Distribuição da População Residente

Na mesma imagem ressalta que o número total de habitantes nas freguesias de grande dimensão é significativamente superior, pese o facto de terem densidades por km<sup>2</sup> muito inferiores, prevalecendo assim o efeito da sua dimensão relativamente à densidade de habitantes.

Com base na imagem de definição das áreas das freguesias, nos códigos das mesmas e na informação introduzida na Base de Dados, é construída a imagem correspondente à densidade populacional, definida como o número de habitantes por quilómetro quadrado, indicada na Figura 6.4-3. A densidade de população residente na área analisada varia entre um mínimo de 3 575 habitantes / km<sup>2</sup> para a freguesia de Santa Maria de Belém e um máximo de 46 714 habitantes / km<sup>2</sup> para a freguesia de São Miguel.



Figura 6.4-3 – Imagem com a Densidade Populacional de Lisboa (Residentes / km<sup>2</sup>)

Reclassificando a imagem da Figura 6.4-3 em 16 classes, de intervalo 3 000, obtemos no SIG uma imagem acompanhada da respectiva legenda, indicada na Figura 6.4-4.



Figura 6.4-4 - Imagem com a Densidade Populacional de Lisboa por Classes

Nesta imagem é visivel uma variação muito significativa da densidade da população residente em Lisboa para as diversas freguesias, sendo que em mais de 50% da area total, temos densidades populacionais abaixo dos 9 000 habitantes /  $\text{km}^2$ , podendo no entanto atingir em outras freguesias valores acima de 40 000 habitantes /  $\text{km}^2$ . Por outro lado verifica-se a existência de grandes zonas de muito baixa densidade populacional, inferior a 3 000 habitantes /  $\text{km}^2$ .

# 6.5 Análise da Distribuição de Emprego

Com base nos dados fornecidos pela CML, relativos à distribuição do emprego em Lisboa por freguesias, indicados na Tabela 6-4, determinou-se o modelo de distribuição espacial dos indivíduos (**TZ**) que trabalham na cidade de Lisboa para todas as freguesias.

Com essa finalidade e com base nos dados da Tabela 6-4 foi construída a imagem, indicada na Figura 6.5-1 com o padrão de distribuição espacial do emprego em Lisboa, ou seja correspondente ao contributo percentual de cada freguesia para o total de emprego. O cálculo da distribuição em termos percentuais do emprego por freguesia é um parâmetro importantes para as análises subsequentes, já que vai permitir distribuir de forma proporcional pelas várias freguesias, a população que entra diariamente em Lisboa para trabalhar.



Figura 6.5-1 - Padrão de Distribuição Espacial do Emprego para as Freguesia de Lisboa

Pode verificar-se na referida imagem uma maior distribuição percentual de empregos nas freguesias assinaladas em tons de vermelho, zonas de concentração do sector dos serviços, sendo de esperar uma movimentação elevada de indivíduos para essas zonas durante o horário laboral.

Ligando os dados armazenadas na base de dados referentes ao emprego e às áreas das respectivas freguesias foi construída uma imagem com a densidade de emprego por freguesia (**DZ**), Figura 6.5-2, obtida dividindo o número de empregos numa dada freguesia pela sua área (calculada em células).

CÓDIGO	FREGUESIA	Empregos	% Total
1	Ajuda	3 300	0,6%
2	Alcântara	14 700	2,8%
3	Alto do Pina	4 500	0,9%
4	Alvalade	6 700	1,3%
5	Ameixoeira	1 700	0,3%
6	Anjos	6 000	1,1%
7	Beato	5 400	1.0%
8	Benfica	13 200	2.5%
9	Campo Grande	13 600	2.6%
10	Campolide	10 600	2.0%
11	Carnide	4 900	0.9%
12	Castelo	200	0.0%
13	Charneca	2 200	0.4%
13	Coração de Jesus	26 200	5.0%
15	Encarnação	5 400	1.0%
16	Graca	2 900	0.6%
10	I ana	2 500	1.5%
17	Lupior	13 000	2 504
10	Madalana	5 700	2,5%
20	Mártinos	4 800	1,1 70
20	Maruite	4 800	0,9%
21	Manaîs	1/ 300	3,3%
22	Merces	1 900	0,4%
23	Nossa Sennora de Fatima	41 900	8,0%
24	Pena	12 100	2,3%
25	Penha de Franca	3 000	0,6%
26	Prazeres	11 200	2,1%
27	Sacramento	2 900	0,6%
28	Santa Catarina	3 800	0,7%
29	Santa Engracia	3 300	0,6%
30	Santa Isabel	15 400	2,9%
31	Santa Justa	10 000	1,9%
32	Santa Maria de Belém	8 500	1,6%
33	Santa Maria dos Olivais	27 100	5,2%
34	Santiago	500	0,1%
35	Santo Condestável	5 800	1,1%
36	Santo Estevão	1 900	0,4%
37	Santos o Velho	7 000	1,3%
38	São Cristóvão e São Lourenço	900	0,2%
39	São Domingos de Benfica	12 800	2,5%
40	São Francisco Xavier	3 600	0,7%
41	São João	4 200	0,8%
42	São João de Brito	20 000	3,8%
43	São João de Deus	19 200	3,7%
44	São Jorge de Arroios	40 300	7,7%
45	São José	7 500	1,4%
46	São Mamede	15 900	3,0%
47	São Miguel	1 200	0,2%
48	São Nicolau	22 700	4,3%
49	São Paulo	12 000	2.3%
50	São Sebastião da Pedreira	30 600	5.9%
51	São Vicente de Fora	1 600	0.3%
52	Sé	2 400	0.5%
53	Socorro	1 000	0.2%
	TOTAL	522 100	100.0%
I	· · · ·		, - , - , - , - , - , - , - , - , -

Tabela 6-4 – Dados sobre a distribuição do emprego em Lisboa (Fonte: CML)



Figura 6.5-2 - Densidade de Empregos por Célula para as Freguesia de Lisboa

Nesta imagem é claramente visível uma grande concentração de indivíduos, em horário laboral, nas freguesias assinaladas em tons de vermelho, onde é sabido existir igualmente uma forte concentração do sector terceário, designadamente, a Baixa e as Avenidas Novas. Por outro lado freguesias conhecidas pela sua grande concentração residencial, aparecem na imagem assinaladas em tons de azul, significando uma baixa densidade de emprego.

# 6.6 Análise do Movimento Pendular das Populações

Para estimar o tráfego telefónico que poderá ser gerado pela população presente a uma dada hora e numa dada área de serviço torna-se necessário estimar essa mesma população. Para tal é necessário conhecer a população residente, os movimentos de entrada e saída, e os movimentos internos dessa população. A título ilustrativo, será feito o cálculo da população presente em Lisboa em dia laboral, com base na análise da população residente, retirando a que sai para trabalhar fora da cidade e adicionando a população residente fora da cidade que entra para trabalhar na cidade. No primeiro caso, a população que sai de Lisboa para o exterior da cidade será subtraída em cada freguesia à população residente de forma proporcional ao seu peso, e no segundo caso a população que entra será distribuída por freguesias, de forma proporcional ao emprego existente por freguesia.

Analisando a matriz de fluxos pendulares na área metropolitana de Lisboa, publicado pelo INE, referente ao CENSOS 91, podemos retirar os valores mais significativos para o estudo pretendido e que se encontram indicados no quadro da Tabela 6-5.

Concelho	Destino Lisboa	Origem Lisboa
Alcochete	398	10
Almada	26 586	2 428
Amadora	48 705	4 339
Azambuja	713	123
Barreiro	12 402	427
Cascais	24 131	1 773
Lisboa	315 008	315 008
Loures	88 239	8 947
Mafra	1 622	186
Moita	6 342	89
Montijo	1 483	137
Oeiras	41 247	4 207
Palmela	1 286	77
Sesimbra	1 367	96
Setúbal	2 996	734
Seixal	18 261	435
Sintra	49 675	2 784
Vila Franca	13 969	1 371
Outros		2 449
TOTAL	654 430	345 620

Tabela 6-5 - Fluxos Pendulares de População na AML

Como dados importantes na tabela podem salientar-se: o total de 654 430 indivíduos que entram diariamente em Lisboa, 345 620 indivíduos que saem diariamente de Lisboa para Concelhos limítrofes, e 315 008 indivíduos que se movimentam diariamente dentro de Lisboa do local de residência para o local de trabalho. Da mesma tabela podemos extrair um conjunto de dados que nos interessa para o estudo do movimento das populações que se deslocam das zonas residenciais para as zonas de emprego, designadamente, nas seguintes situações:

## • População que se desloca para zonas de emprego

Iremos assumir, como hipótese de trabalho, que uma percentagem significativa das 339 422 pessoas que entram em Lisboa provenientes de concelhos exteriores (654 000 – 315 008) vêm trabalhar, pelo que se irão distribuir de acordo com o padrão de distribuição espacial de emprego. A este valor deverão ser adicionadas mais 315 008 indivíduos que residem em Lisboa e que trabalham em Lisboa e que se deslocam igualmente do local de residência para o local de trabalho. Deste modo, o total da população trabalhadora a adicionar ao padrão de distribuição espacial do emprego é de 654 430 indivíduos, conforme Tabela 6-6, que serão distribuídas pelos locais de trabalho, podendo deste modo estimar o acréscimo de densidade espacial de população presente em Lisboa por freguesia, em termos de pico máximo diário.

1	N <sub>entradas</sub>	População Externa que entra em Lisboa para zonas de emprego	339 422
2	N <sub>movim</sub>	População de Lisboa que se desloca para zonas de emprego em Lisboa	315 008
3	(1) + (2)	População Total que se desloca para zonas de emprego	654 430

Tabela 6-6 - População que Entra nas Zonas de Emprego em Lisboa

## • População que sai das zonas de residência

Será assumido como hipótese que a população que sai das zonas de residência corresponde à população residente em Lisboa que se desloca para zonas de trabalho, acrescido dos residentes na cidade que se deslocam para trabalhar em concelhos exteriores. Deste modo, a população total residente irá diminuir globalmente neste montante nas diversas freguesias de acordo com o padrão de distribuição de população residente anteriormente construído. As saídas do local de residência para o local de trabalho totalizam 345 620 indivíduos, conforme Tabela 6-7.

1	N <sub>movim</sub>	População de Lisboa que sai da zona de residência para zonas de trabalho	315 008
2	N <sub>saídas</sub>	População de Lisboa que sai para outros Concelhos	30 612
3	(1) + (2)	População que sai da zona habitual de residência $(3) = (1) + (2)$	345 620

Tabela 6-7 - População que sai das zonas de residência

## 1. Estimativa da População Presente em Horário Não Laboral

Nesta análise pretende-se determinar os picos horários de densidade espacial dos indivíduos nas várias freguesias de Lisboa. Com base nesta análise, poderá ser estimado a distribuição espacial das necessidades de tráfego telefónico em células GSM. Começa-se por determinar qual a população presente por freguesias entre as 22 e as 6 horas, o que corresponde aproximadamente à população residente em Lisboa. Com os dados do INE sobre a população residente construiu-se a imagem da Figura 6.6-1 correspondente à estimativa da população presente em horário não laboral.

População Residente em Lisboa por Freguesias



Figura 6.6-1 – Imagem com a População Presente em Lisboa (Horário não Laboral)

Dividindo esta imagem pelas áreas das freguesias (em células) obtém-se o número de indivíduos residentes por célula, tal como indicado na Figura 6.6-2.



Figura 6.6-2 - Número de Indivíduos Presentes por Célula (8 x 8 m) em Horário não Laboral

Por análise da imagem apresentada verifica-se uma maior concentração espacial de indivíduos nas Freguesias com predominância da componente residencial onde pode atingir o valor de 3 indivíduos por célula de 8 x 8 m no terreno.

## 1. Estimativa da População Presente em Horário Laboral

Pretende-se determinar qual a população presente em horário laboral, por freguesias, entre as 10 horas e as 18 horas, o que corresponde aproximadamente à soma / subtracção das seguintes componentes:

	N°	Oper.	Tipo de População	Padrão de
	Indivíduos	_		Distribuição
1	663 394	+	residentes habituais segundo o INE	residência
2	315 008	-	residentes deslocados para os locais de trabalho	residência
3	30 612	-	residentes que saem para outros Concelhos	residência
4	315 008	+	residentes deslocados para os locais de trabalho	trabalho
5	339 422	+	não residentes que entram em Lisboa para zonas de emprego	trabalho

Tabela 6-8 - População Presente em Horário Laboral



Figura 6.6-3 - Imagem da População Presente em Horário Laboral

Dividindo esta imagem pelas áreas das freguesias (em células) pode obtém-se o número de indivíduos presentes em horário laboral por célula, tal como indicado na Figura 6.6-4. O mesmo resultado pode ser obtido dividindo na base de dados (através de comandos SQL) o número de indivíduos existentes numa freguesia pela área da mesma, calculada em número de células. O cálculo é preferencialmente efectuado deste modo, pois reduz significativamente a necessidade de imagens intermédias sem interesse prático.



Figura 6.6-4 - Número de Indivíduos Presentes em Horário Laboral por Célula

Verifica-se na imagem que a densidade máxima de indivíduos ocorre na freguesia de S. Nicolau (Baixa) e tem o valor de aproximadamente 7,1 indivíduos por célula (8 x 8 m). Como curiosidade refira-se que a mesma freguesia tem em período não laboral apenas 0,35 indivíduos por célula, ou seja sobre um aumento em período laboral de cerca de 19 vezes.

O cálculo do número de indivíduos presentes numa dada zona é feito através da integração nessa zona da densidade de indivíduos por célula. O cálculo é feito para duas situações temporais: período laboral e período não laboral, sendo no entanto mostrado apenas para o período laboral.

Usando as metodologias já descritas, ou seja integrando a densidade da população para as coroas circulares de raios crescentes de 500 m, centradas na localização da EB, tal como indicado na Figura 6.6-5, obtêm-se os resultados que constam da Tabela 6-9. Nesta tabela estão indicados os valores para os períodos laboral e não laboral, sendo que os valores de população presente são sempre superiores no período laboral para todas as coroas circulares consideradas.



Figura 6.6-5 – Determinação da População Presente em Lisboa para Coroas Circulares

Raio da Zona	População Presente em	População Presente em	Máximo População
[m]	Horário não Laboral	Horário Laboral	Presente
500	10 180	24 702	24 702
1 000	40 769	94 306	94 306
1 500	85 017	196 224	196 224
2 000	140 514	300 104	300 104
2 500	210 240	408 101	408 101
3 000	292 631	520 182	520 182
3 500	392 796	643 497	643 497
4 000	472 223	767 740	767 740
4 500	525 333	833 016	833 016
5 000	571 645	883 134	883 134

Tabela 6-9 - Indivíduos residentes, presentes e valor máximo para as zonas indicadas

Da Tabela apresentada é construído o gráfico indicado na Figura 6.6-6 que permite interpolar os valores para uma coroa de qualquer raio definido.



## População Existente em Sectores Circulares

Figura 6.6-6 – Gráfico com a População Residente e Presente (Coroas Circulares)

## Análise da População Existente Dentro dos Sectores Circulares de Raio 500 m

O cálculo da população residente dentro de sectores circulares de 120° e de raios crescentes de 500 m, centrados na localização da antena é feito através da imagem indicada na Figura 6.6-7.



Figura 6.6-7 – Determinação da População Presente em Lisboa para um Sector

A análise anterior da população presente dentro dos sectores circulares indicados conduziu aos resultados indicados na Tabela 6-10.

Raio da Zona	População Presente em	População Presente em	Máximo População
[m]	Horário não Laboral	Horário Laboral	Presente
500	2 614	8 473	8 473
1 000	10 626	35 081	35 081
1 500	23 748	81 213	81 213
2 000	38 846	129 726	129 726
2 500	58 816	180 352	180 352
3 000	87 263	232 762	232 762
3 500	128 992	285 221	285 221
4 000	169 230	338 748	338 748
4 500	195 891	375 526	375 526
5 000	218 286	402 757	402 757

Tabela 6-10 - População Presente e Residente em Sectores Circulares

A partir dos valores da Tabela 6-10 foi construído o gráfico indicado na Figura 6.6-8.



## População Existente em Sectores de 120º

Figura 6.6-8 - Gráfico com a População Residente e Presente (Sector Circular 120°)

Com o propósito de estimar o tráfego telefónico num determinada zona de serviço em termos de comunicações móveis iremos em primeiro lugar calcular a população presente nessa mesma área. A

título ilustrativo, iremos efectuar o cálculo para uma zona de serviço, representada no mapa de cobertura, calculado no Capítulo 4, Figura 4.6-4.

Nesse sentido, e com o objectivo de estimar a população presente dentro das zonas, nas quais o sinal médio recebido é superior a -80 dBm (considerado aquí como o limiar de recepção do sinal com boa qualidade), foi contruída a imagem indicada na Figura 6.6-9, com a definição das zonas de cobertura, em formato matricial (*raster*).



Figura 6.6-9 - Imagem de Definição da Área de Análise de População Presente

Usando esta imagem como imagem de definição da zona de análise e a imagem da Figura 6.7-6 como imagem a ser processada, pelo módulo EXTRACT do IDRISI, pode ser calculado um conjunto de valores estatísticos, como sejam o total, o máximo, o mínimo, média e desvio padrão. O total na imagem é dado pelo somatório dos valores das densidades por pixel apenas dos pixels que estão dentro da zona escolhida e corresponde ao total de população presente.

A população estimada dentro da zona de cobertura, definida pelo contorno vermelho na Figura 6.7-6, é directamente obtido pela função EXTRACT-TOTAL, estando o seu valor para o período laboral e não laboral indicado na Tabela 6-11.

Área	População Presente em	População Presente em	Máximo População
$[\mathrm{km}^2]$	Horário não Laboral	Horário Laboral	Presente
2,758	27 618	87 826	87 826

Tabela 6-11 - População Presente em Horário Laboral e não Laboral na Zona de Serviço

## 6.7 Análise de Tráfego Telefónico

Em telecomunicações é importante estimar o tráfego telefónico gerado por um dado número de potenciais utilizadores. A capacidade telefónica instalada é geralmente muito inferior às necessidades que resultariam se todos os utilizadores quisessem comunicar simultaneamente, o que é suposto nunca acontecer. O cenário mais frequente é caracterizado pela existência de um grande número de utilizadores que usam a capacidade instalada de uma forma espaçada no tempo e por curtos períodos, sendo a duração média das chamadas e o seu espaçamento no tempo grandezas aleatórias.

O cálculo da probabilidade de congestionamento ou de bloqueio quando um grande número de utentes tenta aceder a um limitado número de linhas pode ser feito recorrendo à fórmula de Erlang-B [16]. A teoria que lhe está subjacente assume que, uma vez que todas as linhas estejam em uso qualquer tentativa posterior de acesso telefónico será bloqueada, forçando a uma religação.

O tráfego telefónico é geralmente medido em Erlang, em homenagem ao pioneiro de análise teórica de tráfego A. K. Erlang, podendo 1 Erlang ser definido como a ocupação de uma linha telefónica durante 1 hora. Assim por exemplo, 4 linhas usadas durante 15 minutos transportam igualmente 1 Erlang, ou em outro exemplo, uma linha que esteve em uso durante meia hora transportou 0,5 Erlang de tráfego. No dimensionamento de um sistema de comunicações, pretende-se geralmente estimar o número de canais telefónicos que assegurem um dado tráfego esperado, com uma probabilidade de bloqueio predefinida (tipicamente 1%).

Para uma dada população o tráfego telefónico gerado, medido em Erlang, é dado,

$$A_{[Erl]} = N_{pop} \cdot P_{pen} \cdot P_{ut} \cdot A_{ut[Erl]}$$
(6. 6)

onde,

 $N_{pop}$  - População dentro da área de serviço P<sub>pen</sub> - taxa de penetração

- P<sub>ut</sub> taxa de utilização
- Aut tráfego médio gerado por utilizador

Tipicamente  $A_{ut} = 0,02$  Erl, enquanto que  $P_{ut}$  é dimensionado pelo operador, sendo da ordem de grandeza de 30%, e  $P_{pen}$  depende da penetração do operador, podendo-se tomar para Portugal  $P_{pen} = 30$  %.

O planeamento celular é feito com base na morfologia da área de serviço e no tráfego expectável. Idealmente pretende-se cobrir uma dada área com células GSM iguais, sem sobreposições ou lacunas havendo apenas 3 formas de polígonos regulares possíveis: triângulo, quadrado e hexágono. A título ilustrativo da metodologia apresentada é feita uma análise das necessidades de capacidade telefónica em comunicações móveis para Lisboa. Para determinar os vários tráfegos previsíveis em toda a área de serviço (Lisboa) divide-se este numa malha de pequenos hexágonos com um raio de 500 m. Foi escolhida a forma do hexágono porque esta aproxima-se bem da forma do círculo, situação de uma EB com radiação omnidirecional. A malha de células hexagonais foi construída em MicroStation, através da repetição do padrão, e posteriormente importada para o IDRISI.

Com base na imagem com a densidade de população e aplicando ( 6. 6) obtém-se uma imagem com a densidade de tráfego por pixel (célula), Figura 6.7-1.



Densidade de Tráfego [Erlang / Pixel]

Figura 6.7-1 – Densidade de Tráfego Telefónico em Erlang por Pixel

Para obter o tráfego total (integração da densidade de tráfego) em cada célula hexagonal GSM é construída uma imagem com a definição das zonas de análise, neste caso hexágonos de raio 500 m. Para construir a referida imagem a malha de células hexagonais (construída em Microstation e importada para o IDRISI em formato vectorial) é posteriormente convertida para formato *raster* usando o comando do IDRISI de conversão de polígonos para *raster* (POLYRAS). O resultado da conversão é uma imagem com uma malha de hexágonos que tem associado a cada um o código que permite a ligação à base de dados. Na Figura 6.7-2 está apresentada a referida imagem sendo indicados apenas alguns dos códigos das zonas a título ilustrativo.

Imagem de Definição de Zonas Hexagonais de Análise



Figura 6.7-2 - Imagem com os Hexágonos de Definição das Zonas de Análise e Códigos

Integrando a densidade de tráfego para cada polígono hexagonal, recorrendo à função EXTRACT-SUM, obtemos a imagem correspondente ao tráfego em Erlang para cada célula, Figura 6.7-3.



Figura 6.7-3 – Tráfego Telefónico Estimado para Células Hexagonais (Erlang)

Da figura apresentada, correspondente ao tráfego telefónico expectável para células GSM com um raio de 500 m, conclui-se de imediato, uma clara concentração de tráfego telefónico na zona central de Lisboa (Baixa e Avenidas Novas), que pode atingir o valor de 36 Erlang.

Conhecido o tráfego expectável para as diversas células, podemos determinar o número de canais necessários para uma dada qualidade de serviço pretendida (percentagem máxima de chamadas perdidas). A probabilidade de bloqueio de chamadas (B<sub>p</sub>), na hipótese de as chamadas bloqueadas se perderem, pode ser estimada pela fórmula de Erlang [16] dada por,

$$B_{p} = \frac{A^{N_{c}} / N_{c}!}{\sum_{i=0}^{N_{c}} A^{i} / i!}$$
(6.7)

A [erl] é o tráfego oferecido,

N<sub>c</sub> é o número de canais disponíveis.

Devido à estrutura de canais do GSM,  $N_c$  é múltiplo de 8; por outro lado nem todos os canais podem ser usados para transportar tráfego telefónico (há que transportar também sinalização), o que no entanto não vai ser considerado aqui.

Aplicando (6.7) para uma percentagem de bloqueio  $B_p=1\%$  (valor normalmente usado na prática) constrói-se a relação entre as duas grandezas ( $N_c$  e A), Tabela 6-12. Em GSM o número máximo de canais  $N_c$  está geralmente limitado a 120.

N <sub>c</sub>	Α	N <sub>c</sub>	Α	N <sub>c</sub>	А	N <sub>c</sub>	Α	N <sub>c</sub>	Α	N <sub>c</sub>	А	N <sub>c</sub>	Α
1	0,0	26	17,0	51	38,8	76	61,7	102	85,9	152	133,5	202	181,7
2	0,2	27	17,8	52	39,7	77	62,6	104	87,8	154	135,4	204	183,6
3	0,5	28	18,6	53	40,6	78	63,5	106	89,7	156	137,3	206	185,5
4	0,9	29	19,5	54	41,5	79	64,4	108	91,6	158	139,2	208	187,5
5	1,4	30	20,3	55	42,4	80	65,4	110	93,5	160	141,2	210	189,4
6	1,9	31	21,2	56	43,3	81	66,3	112	95,4	162	143,1	212	191,4
7	2,5	32	22,0	57	44,2	82	67,2	114	97,3	164	145,0	214	193,3
8	3,1	33	22,9	58	45,1	83	68,2	116	99,2	166	146,9	216	195,2
9	3,8	34	23,8	59	46,0	84	69,1	118	101,1	168	148,9	218	197,2
10	4,5	35	24,6	60	46,9	85	70,0	120	103,0	170	150,8	220	199,1
11	5,2	36	25,5	61	47,9	86	70,9	122	104,9	172	152,7	222	201,1
12	5,9	37	26,4	62	48,8	87	71,9	124	106,8	174	154,6	224	203,0
13	6,6	38	27,3	63	49,7	88	72,8	126	108,7	176	156,6	226	204,9
14	7,4	39	28,1	64	50,6	89	73,7	128	110,6	178	158,5	228	206,9
15	8,1	40	29,0	65	51,5	90	74,7	130	112,5	180	160,4	230	208,8
16	8,9	41	29,9	66	52,4	91	75,6	132	114,4	182	162,3	232	210,8
17	9,7	42	30,8	67	53,4	92	76,6	134	116,3	184	164,3	234	212,7
18	10,4	43	31,7	68	54,3	93	77,5	136	118,2	186	166,2	236	214,7
19	11,2	44	32,5	69	55,2	94	78,4	138	120,1	188	168,1	238	216,6
20	12,0	45	33,4	70	56,1	95	79,4	140	122,0	190	170,1	240	218,6
21	12,8	46	34,3	71	57,0	96	80,3	142	123,9	192	172,0	242	220,5
22	13,7	47	35,2	72	58,0	97	81,2	144	125,8	194	173,9	244	222,5
23	14,5	48	36,1	73	58,9	98	82,2	146	127,7	196	175,9	246	224,4
24	15,3	49	37,0	74	59,8	99	83,1	148	129,7	198	177,8	248	226,3
25	16,1	50	37,9	75	60,7	100	84,1	150	131,6	200	179,7	250	228,3

Tabela 6-12 - Relação entre Tráfego e número de Canais para uma Probabilidade de Bloqueio de 1%
A partir da referida Tabela constrói-se um ficheiro de reclassificação em formato IDRISI. Reclassificando a imagem do tráfego estimado para diversas células GSM, de acordo com o referido ficheiro, obtém-se a imagem indicada na Figura 6.7-4, correspondente ao número de canais necessários para cada célula GSM.



Figura 6.7-4 - Número de Canais Estimados para Células Hexagonais de 1 km

Na figura apresentada, correspondente ao número de canais telefónicos necessários para células com um raio de 500 m, verifica-se uma maior necessidade de canais telefónico na zona central de Lisboa (Baixa e Avenidas Novas), que pode atingir o valor 48 canais. Temos no entanto que considerar, que o tráfego gerado não é uniforme no tempo, variando com as horas do dia, com os meses ou acontecimentos pontuais. Neste caso a estimação do tráfego gerado foi feita para o seu valor máximo, ou seja para o máximo de população presente e uma taxa de utilização máxima.

Como já foi referido anteriormente, o número de canais GSM a disponibilizar deverá ser múltiplo de 8, pelo que a imagem correspondente ao tráfego telefónico estimado para as células hexagonais é reclassificada com os valores da Tabela 6-13.

Tráfego [Erlang]	Tráfego [Erlang]	N <sub>c</sub> [N.º de Canais]
0,1	3,1	8
3,1	8,9	16
8,9	15,3	24
15,3	22,0	32
22,0	29,0	40
29,0	36,1	48

Tabela 6-13 - Tabela de Reclassificação de Tráfego Telefónico em Canais GSM

Dessa reclassificação resulta a imagem indicada na Figura 6.7-5, correspondente à estimativa do número de canais GSM que deverão ser disponibilizados para as diversas células hexagonais de 1 km, a fim garantir a cobertura desejada.



Figura 6.7-5 – Estimativa de Canais GSM para Células Hexagonais de 1 km

A análise da imagem apresentada indica que as zonas de maior concentração de serviços, Baixa e Avenidas Novas têm nitidamente uma maior necessidade de canais para garantir o nível de cobertura desejado, chegando ao valor de 48 canais em 4 das células analisadas. Por outro lado, o número de canais necessários diminui nas zonas periféricas e de baixa concentração de serviços, para as quais podem ser necessários apenas 8 canais.

Com esta imagem pode-se ter uma primeira estimativa da rede celular necessária, a partir da qual se pode refinar a implantação das células ou microcélulas quando necessário, em função do plano de reutilização de frequências definido pelo operador de telecomunicações móveis GSM.

A título ilustrativo, faz-se uma estimativa (aplicando a metodologia anteriormente descrita) do tráfego telefónico e do número de canais necessários para a zona de cobertura calculada no Capítulo 4, indicada na Figura 6.7-6, referente à EB do Campo Pequeno. Esta zona de cobertura foi determinada por aplicação do modelo de Okumura-Hata implementado no SIG no Capítulo 4, e corresponde aos pontos do espaço geográfico para os quais o sinal previsto é superior a -80 dBm.



Figura 6.7-6 - Imagem da Densidade de Tráfego com Indicação da Zona de Cálculo

Verifica-se pela análise da imagem apresentada que a zona de serviço representada situa-se numa zona de tráfego médio e inclui partes de várias freguesias com diferentes densidades de tráfego. O tráfego expectável varia entre 0,0004 e 0,0022 Erlang para quadrículas de 8 x 8 m. Aplicando a metodologia anteriormente descrita os resultados obtidos para a zona de serviço indicada são os da tabela:

Área	População Presente	Tráfego Gerado	N.º de Canais	N.º de Canais a
$[\mathrm{km}^2]$	em Horário Laboral	[Erlang]	Calculados	Disponibilizar
2,758	87 826	79	95	96

Tabela 6-14 - Resultados da Estimativa de Tráfego para a Zona de Cobertura Prevista

O número de canais a disponibilizar para servir a população presente na área de serviço indicada deverá ser 96, pois é o primeiro múltiplo de 8 acima dos 95 canais calculados, sendo que deste modo a probabilidade de bloqueio será ligeiramente inferior a 1%.

O planeamento do sistema de comunicações móveis, no que diz respeito à sua capacidade e nível de qualidade pretendido (valor de B<sub>p</sub>), poderá agora ser optimizado, quer aumentando o número de canais em uso, quer reduzindo à área de cobertura. Sendo o número de canais geralmente limitado, devido à limitação do número de frequências atribuídas aos diversos operadores, a solução passa normalmente pela redução da área de cobertura.

Com base no cálculo da população presente dentro da nova área de cobertura determinada, é possível voltar a estimar o tráfego telefónico para a EB e respectivo o número de canais necessários, sendo que o rigor dos resultados obtidos depende fundamentalmente da qualidade da informação sócio-económica disponível para a área em estudo e da sua resolução espacial.

## **CAPÍTULO 7**

## **Conclusões e Trabalhos Futuros**

A propagação de ondas electromagnéticas é um fenómeno fortemente dependente das características da superfície terrestre, pelo que se torna indispensável para o seu estudo uma boa caracterização do espaço geográfico envolvente. Com base na utilização de Imagem Satélite, Fotografia Aérea, Ortofotos, Cartografia de Traço e Modelos Digitais do Terreno foi possível efectuar uma classificação precisa dos ambientes de propagação, permitindo desse modo escolher os modelos de propagação mais adequados para cada situação particular.

Os procedimentos desenvolvidos para a georeferenciação de medidas no SIG e para a inserção automática dos seus valores na Base de Dados, potenciam a realização de intensas campanhas de medida e respectivo tratamento estatístico possibilitando a construção de modelos de propagação mais precisos.

A implementação no SIG do modelo de propagação de Okumura-Hata revelou uma boa funcionalidade e exactidão de resultados no que respeita à previsão de sinal e obtenção de mapas de cobertura. Os resultados obtidos no SIG através da implementação do modelo de Okumura-Hata, sem a aplicação de qualquer afinação, apresentam diferenças médias entre previsão e medidas de sinal de -3,2 dBm com um desvio padrão de 18,1 dB (valores comparáveis aos obtidos pelo programa externo de cálculo), fornecendo uma boa aproximação para o projecto de implantação de uma EB.

As técnicas desenvolvidas para a comparação geoestatística das medidas de campo com os valores de previsão de sinal revelaram-se adequadas, funcionais e de fácil utilização pelo que poderão ser uma ferramenta importante para a afinação de outros modelos de propagação de natureza empírica ou semi-empírica.

O cálculo da população presente numa determinada zona geográfica, definida por qualquer tipo de área ou contorno, permitiu uma boa estimativa do tráfego telefónico previsível para a estação base do Campo Pequeno, sendo que a validade dos resultados obtidos depende fundamentalmente da qualidade e do detalhe espacial da informação sócio-económica disponível para a área em estudo.

As metodologias usadas permitiram uma análise sistemática e integrada dos elementos essenciais para a fase de projecto de uma ou várias estações de base, designadamente, a estimação dos mapas de cobertura e do tráfego telefónico gerado pelos utilizadores presentes numa dada área de serviço. As ferramentas desenvolvidas permitem também uma análise pontual e flexível de qualquer das variáveis em jogo geralmente necessário em processos de optimização ou racionalização de recursos.

Como trabalho futuro poderá efectuar-se uma melhor caracterização do espaço geográfico envolvente, recorrendo a novas cartografias, que incluam dados sobre a altura exacta dos edifícios, existência de arvoredo nas ruas, tipo de edifícios, geometria exacta e materiais de construção usados de forma a permitir implementar outros modelos mais elaborados de previsão de sinal, designadamente a previsão de sinal para o interior dos edifícios.

A realização a curto prazo de um novo Censo Populacional em Portugal no ano de 2001 aportará certamente, um enorme volume de informação de natureza demográfica e sócio-económica, mais rica, mais fiável, actual e de maior resolução espacial, o que potenciará a realização de estimações de tráfego telefónico com maior exactidão e detalhe geográfico. Esta maior resolução espacial poderá conduzir a zonas de análise inferiores a 100 m no terreno, mais adequados para o estudo e dimensionamento de micro-células nas redes GSM.

Futuramente a estimação do tráfego telefónico poderá incluir as situações de aglomeração pontual de utilizadores em zonas de lazer, desportivas ou outras, de modo a calcular picos de tráfego não previstos no projecto inicial e que possam degradar a qualidade do serviço prestado pelo operador de telecomunicações móveis.

Podem igualmente ser desenvolvidas ferramentas baseadas em SIG que automatizem o planeamento celular e a escolha dos melhores locais para a colocação das antenas, com base em multicritérios, designadamente factores de decisão ponderados e possíveis condicionantes de natureza geográfica, paisagística ou legal que possam existir.

## REFERÊNCIAS

- [1] Eastman, J., User's Guide Idrisi for Windows, Clark University, USA, 1995
- [2] Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T and Fukuda, K., Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service, Rev. Elec. Commun. Lab., Vol. 16, Set.-Oct. 1968
- [3] Microstation SE, Bentley Systems Inc., USA, 1998
- [4] MGE Terrain Annalist, Microstation 95, Intergraph, USA, 1998
- [5] IGeoE, Sistemas de Referenciação, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa, 1997
- [6] GeoExplorer II, Trimble Navigation Limited, USA
- [7] Casaca, J., Geodesia e Cartografia, IST, Lisboa, Portugal, 1998
- [8] Macario, R.C.V., Personal & Mobile Radio Systems, Peter Peregrinus, London, UK, 1991
- [9] Correia, L., Comunicações Móveis, AEIST, Lisboa, Portugal
- [10] Hata, M., *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. VT-29, No. 3, Aug. 1980
- [11] Recommendations and Reports of the CCIR, *Statistical Distribuitions in Radio-Wave Propagation*, ITU, Geneva, 1986
- [12] Salema, C., Feixes Hertzianos, AEIST, Lisboa, Portugal, 1998
- [13] COST 231 Working Group on UHF Propagation, Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900- and 1800 MHz Bands, COST 231 TD(91)73, The Hague, The Nederland, Sep. 1991
- [14] Oliveira, P. e Chaves, J., Comparação de Modelos de Propagação para Micro-Células Urbanas em GSM 900 e 1800 MHz, Trabalho Final de Curso, DEEC, IST, Lisboa, Maio 1999
- [15] Parsons, J.D., The Mobile Radio Propagation Channel, Pentech Press, UK, London, 1992
- [16] Lee, W.C.Y., Mobile Communications Design Fundamentals, John Wiley & Sons, USA, New York, N.Y., 1993
- [17] Yacoub, M.D., Foundations of Mobile Radio Engineering, CRC Press, Boca Raton, USA, Florida, 1993
- [18] Clara, A. e Ferreira, J., Avaliação de Modelos de Propagação para Micro-Células Urbanas não Regulares em GSM 900 MHz, Trabalho Final de Curso, DEEC, IST, Lisboa, Setembro 1998