



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Modelo Empírico de Propagação para Redes Sem Fios IEEE 802.16-2004

João Gabriel Rodrigues de Oliveira

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Ramo Automação e Electrónica)
(2º ciclo de estudos)

Orientador:
Prof. Dr. Fernando J. S. Velez
Departamento de Engenharia Electromecânica
Universidade da Beira Interior
Covilhã, Portugal

Covilhã, Outubro de 2010

Para os meus Pais

“Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.”

Ricardo Reis

Agradecimentos

Ao terminar esta dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores ramo de Automação e Electrónica, gostaria de endereçar alguns, e merecidos, agradecimentos a todos que directa ou indirectamente me ajudaram na realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, às duas pessoas mais importantes da minha vida, pelo sacrifício, pelo apoio e amparo, pela oportunidade, pela compreensão, pela vontade e capacidade de me ensinarem os valores pelos quais hoje me rejo. Obrigado Pai e Mãe.

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando J. S. Velez pela oportunidade, disponibilidade, por todos os meios que me colocou à disposição, pelo tempo dispensado, pelo empenho e ajuda na realização dos ensaios experimentais, pela compreensão nos momentos mais difíceis e por todo o conhecimento e rigor científico e metodológico que me transmitiu ao longo da realização deste trabalho e ao longo da minha formação académica.

Um enorme obrigado ao Mestre José Riscado, em representação do laboratório do STIG/UBI (Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica da Universidade da Beira Interior), sem a sua ajuda tudo seria mais difícil. Pela constante disponibilidade, paciência e pelo seu altruísmo em relação a este trabalho.

Não poderia também, deixar de escrever uma palavra de apreço a todos os companheiros da equipa do IT-DEM/Covilhã, pelos bons momentos, pelo apoio e auxílio sempre disponibilizado. Obrigado Orlando Cabral, Daniel Robalo, Norberto Barroca, João Ferro e Luís Borges, pela força e amizade. Aos "camaradas" Gerardo Rocha e Helder Matos, do Laboratório CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pela amizade construída nestes últimos anos na Covilhã, pela companhia nas noites passadas na UBI e por todos os momentos vividos fora dela.

Aos meus amigos/companheiros de vida, que comigo cresceram e conviveram, Ricardo Pádua, António Lobo, Paulo Presa e outros, às pessoas que se tornaram especiais neste meu percurso académico, Rui Vaz, Gonçalo Caldeira, Daniel Vicente, Pedro Galante e restantes companheiros, levo-vos no coração.

Por fim, uma palavra especial dirigida a ti, Catarina, pelo que representas para mim, pela ajuda e incentivo, pelos momentos, pelo companheirismo, pela presença, pela disponibilidade e pela crítica.

Um grande bem-haja a todos,
João Gabriel Rodrigues de Oliveira

Resumo

Esta dissertação focalizou-se na necessidade das operadoras móveis e sem fios em conceber metodologias de planeamento de redes WiMAX fixo e móvel que permitam com um potencial elevado de predição e de optimização dos sistemas implementados. Pretendeu-se com este trabalho abordar aspectos de optimização do planeamento celular para o sistema WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), instalado na cidade da Covilhã, com base em medições de cobertura obtidas através de trabalho experimental com o recurso a um analisador de espectros e a um GPS e a simulações na ferramenta de planeamento de redes sem fios Winprop™.

As simulações pretenderam verificar o impacto da elevação da antena da estação base situada no telhado da Faculdade de Ciências da Saúde. As simulações permitiram criar cartas de zonas de LoS (*Line of Sight*), além de outros parâmetros de cobertura e de rede. No tratamento dos dados simulados, foi utilizado o ArcGIS™, de forma a relacionar aos dados informação geográfica e pontos de referência das cartas geradas.

Os resultados obtidos revelaram um aumento das zonas de linha de vista, comparativamente à altura inicial da antena da estação de base, esta melhoria abrange todos os restantes aspectos de cobertura, aumentando a cobertura celular, principalmente para sudeste e nordeste da localização da estação base. Tendo em conta, o objectivo de realizar campanhas experimentais na célula, estas alterações forneceram mais zonas de medição, sem grandes variações de sinal, visto que, se o sinal variar bruscamente, torna os resultados finais mais díspares em posições geográficas próximas.

Os resultados experimentais para os modelos abordados, por exemplo, COST 231 Hata, COST 231 Walfisch Ikegami, Erceg modificado e ECC-33, não foram satisfatórios. No entanto, os resultados apresentados pelo modelo de *Friis* são encorajadores, apresentando um erro quadrático médio reduzido. Obtém-se um expoente de propagação $\gamma=2.65$ para zonas de linha de vista, $\gamma=2.85$ em não linha de vista e $\gamma=2.67$ num ambiente misto, com todas as medições. Pode-se afirmar que, no caso misto, o modelo de *Friis* modificado apresenta um expoente de propagação $\gamma=2.67$, com desvio padrão de 0.061 e um erro quadrático médio de 3.611, para uma amostra de 2220 pontos de medição.

Palavras-Chave

WiMAX, IEEE 802.16, teste de cobertura, SIG, modelo empírico de propagação

Abstract

This thesis addresses the need the mobile and wireless communications operators have to conceive WiMAX radio and network planning methodologies, allowing for a high prediction and optimization capability. The intention is to focus on cellular planning and optimization for WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) installed in Covilhã. A measurement approach was used for the determination of the coverage by means of experimental work based on measurements with a spectrum analyzer and a GPS, as well as simulations in the Winprop™ cellular planning tool.

Simulations verified the impact of the antenna height for the Base Station (BS) antenna placed on roof the Health Sciences Faculty. These simulations enabled to distinguish between LoS (Line of Sight) and Non Line of Sight (NLoS) regions, as well other radio/coverage and network parameters. ArcGIS was used to process the simulation results, relating Geographic Information Systems data with reference points onto the generated maps.

From the results, one verifies that LoS coverage increases when the antenna height increases from 15 to 21 metres. This improvement includes an increase on the range of cellular coverage, mainly on southeast and northwest from the BS. This analysis allow for identifying broader zones for the measurements, where the received signal may be steadier, facilitating an increase on the confidence.

Experimental results for the considered models, e.g., COST 231 Hata, COST 231 Walfisch Ikegami, modified Erceg and ECC-33, have not been satisfactory. However, the modified Friis model is promising, with a low mean square error. The propagation exponent is $\gamma=2.65$ for LoS regions, $\gamma=2.85$ for NLoS ones and $\gamma=2.67$ for a mixed environment, which incorporates all the measurements. With a sample of 2200 measurement points, it is possible to conclude that the modified Friis propagation exponent with $\gamma=2.67$ should be considered, with standard deviation 0.061 and mean square error 3.611.

Keywords

WiMAX, IEEE 802.16, coverage field trials, GIS, empirical propagation model

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de Acrónimos	xxi
Lista de Símbolos.....	xxv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação e Abordagem.....	1
1.2 Estrutura do Trabalho	3
Capítulo 2.....	5
WiMAX.....	5
2.1 IEEE 802.16-2004 no contexto das redes sem fios IEEE 802.16.....	5
2.2 Camada PHY e camada MAC da norma IEEE 802.16	12
2.2.1 Camada PHY (<i>Physical Layer</i>).....	13
2.2.1.1 OFDM	18
2.2.1.2 OFDMA.....	18
2.2.2 Camada MAC.....	19
2.2.2.1 QoS na Norma IEEE 802.16.....	21
2.2.2.2 Fluxos de Serviço.....	21
2.2.2.3 Classes de Serviço do WiMAX.....	22
2.3 Propagação NLoS vs Propagação LoS.....	23
2.3.1 SOFDMA	25
2.3.2 Sub-Canalização.....	25
2.3.3 Técnicas de correcção de erros	26
2.3.4 Controlo de Potência.....	27
2.4 Topologias de Rede	27
2.4.1 Topologia Ponto-a-Ponto	28
2.4.2 Topologia Ponto-Multiponto.....	28
2.4.3 Topologia <i>Mesh</i>	29
2.5 Tipos de Antenas	31
2.5.1 Tecnologias SISO e MIMO	31

2.5.3	Tecnologia de Antenas Adaptativas.....	32
2.6	Sumário e Conclusões	33
Capítulo 3.....		35
Modelos de Propagação		35
3.1	Introdução.....	35
3.2	Modelos para Outdoor	36
3.2.1	Caracterização de cenários	36
3.2.2	Classificação dos modelos	37
3.2.3	Modelos para terreno aberto.....	38
3.2.3.1	Modelo de <i>Friis</i> modificado.....	38
3.2.3.2	Modelo de <i>Egli</i>	39
3.2.3.1	Modelo de <i>Longley-Rice</i>	39
3.2.4	Modelos para zonas urbanas ou sub-urbanas.....	39
3.2.4.1	Modelo de propagação SUI.....	40
3.2.4.2	Modelo de Hata.....	42
3.2.4.3	Modelo COST-231 Hata	42
3.2.4.4	Modelo COST-231 Walfisch-Ikegami.....	43
3.2.4.5	Modelo de Erceg Modificado	46
3.2.4.6	Modelo ECC-33.....	47
3.2.4.7	Modelo LUI.....	48
3.2.5	Modelos para vegetação	49
3.3	Sumário e Conclusões	50
Capítulo 4.....		51
Ferramentas Winprop™ e ArcGIS™.....		51
4.1	Winprop™	51
4.1.1	Introdução.....	52
4.1.2	Bases de Dados	52
4.1.2.1	Bases de Dados Topográficos.....	53
4.1.2.2	Bases de Dados Urbano.....	54
4.1.2.3	Planeamento de Rede Combinado	54
4.1.3	Modelos de Propagação no WinProp™.....	55
4.1.3.1	<i>Dominant Path</i>	57
4.1.4	Definição de Parâmetros para Simulação.....	58
4.1.5	Resultados Obtidos	61
4.1.5	Antena BS a 15 metros de altura.....	62
4.1.5	Antena BS a 21 metros de altura.....	63
4.2	ArcGIS™	64
4.2.1	Introdução.....	64
4.2.2	Tratamento de Dados	65

4.2.3	Cartas com os Resultados de Cobertura Obtidos	69
4.3	Sumário e Conclusões	76
Capítulo 5	.....	79
Medições de Campo e Modelo Empírico		79
5.1	Metodologia das Campanhas Experimentais.....	79
5.2	Campanha Experimental e Modelo	83
5.3	Sumário e Conclusões	87
Capítulo 6	.....	89
Conclusões		89
6.1	Propostas de Trabalho Futuro.....	90
Anexo A	.....	91
Especificações do material utilizado		91
A.1	Micro Base Station BreezeMAX 3000	91
A.2	Especificações Analisador de Espectros FSH8	93
A.3	Especificações Antenas GP3500-10.....	94
A.4	Especificações GPS.....	95
Anexo B	.....	97
Comparação entre IEEE 802e-2005 e 3GPP-LTE		97
Anexo C	.....	99
Cenários de utilização do WiMAX.....		99
C.1	Redes Privadas.....	99
C.1.1	<i>Backhaul</i> de Redes Celulares	99
C.1.2	<i>Wireless Service Provider Backhaul</i>	100
C.1.3	Redes de Serviços Bancários	100
C.1.4	Redes de Serviços de Educação	101
C.1.5	Redes de Segurança Pública	102
C.1.6	Conectividade num <i>Campus</i>	103
C.2	Redes Públicas.....	104
C.2.1	Wireless Service Provider Access Network	104
C.2.2	Conectividade Rural.....	105
Anexo D	.....	107
Conceitos de Propagação		107
D.1	Propagação em espaço livre.....	108
D.2	Ruído-térmico.....	109
D.2.1	Cálculo da relação portadora-ruído térmico.....	109
D.3	Aspectos elementares da propagação	110
D.3.1	Atenuação relacionada com a distância	110

D.3.2	Efeito <i>Doppler</i>	111
D.3.2.1	Desvanecimento lento	113
D.3.2.2	Desvanecimento rápido	113
D.3.3	Difracção	115
D.3.3.1	Elipsóides de <i>Fresnel</i>	116
D.3.3.2	Princípio de <i>Huygens</i>	117
D.3.3.3	Difracção em lâmina	118
D.4.5	Reflexão	120
D.4.6	Dispersão	120
D.4.7	Refracção	121
D.5	Sumário e Conclusões	121
Anexo E	.....	123
Resultados obtidos Winprop™	.....	123
Anexo F	.....	139
Scripts em MatLAB™	.....	139
F.1	Script AnalyzeValues	139
F.2	Script Time	140
Referências.....		141

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 - ESQUEMA DA ABORDAGEM FEITA PARA ESTA DISSERTAÇÃO.	2
FIGURA 2.1 - EVOLUÇÃO DA NORMA IEEE 802.16 [GEM07].	7
FIGURA 2.2 - NORMALIZAÇÃO GLOBAL PARA REDES SEM FIOS [PRV10].	12
FIGURA 2.3 - CAMADAS PHY E MAC DA NORMA IEEE 802.16 [ROBA08].	13
FIGURA 2.4 - PERFIS DE RAJADA, ASSOCIAÇÃO DINÂMICA DO TIPO DE MODULAÇÃO [ROBA08].	14
FIGURA 2.5 - FORMA DE ONDA BPSK [GASW09].	15
FIGURA 2.6 - FORMA DE ONDA QPSK [GASW09].	15
FIGURA 2.7 - DIAGRAMAS DAS CONSTELAÇÕES DAS MODULAÇÕES BPSK, QPSK, 16-QAM E 64-QAM.	16
FIGURA 2.8 - ZONA DE FRESNEL (LoS) [WIF04].	24
FIGURA 2.9 - PROPAGAÇÃO NLoS.	24
FIGURA 2.10 - TOPOLOGIA PTP.	28
FIGURA 2.11 - TOPOLOGIA PTM.	28
FIGURA 2.12 - TOPOLOGIA MESH.	30
FIGURA 2.13 - SISO, TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE DADOS.	32
FIGURA 2.14 - MIMO, TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE DADOS.	32
FIGURA 2.15 - EXEMPLO DE BS COM CAPACIDADE AAS [CONN10].	32
FIGURA 3.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS EM AMBIENTES OUTDOOR E INDOOR.	36
FIGURA 3.2 - PARÂMETROS DO MODELO COST-231 WALFISCH-IKAGAMI [WIF08].	44
FIGURA 3.3 - ÂNGULO DE ORIENTAÇÃO PARA A RUA [WIF08].	45
FIGURA 4.1 - BASE DE DADOS TOPOGRÁFICOS DO CONCELHO DA COVILHÃ.	54
FIGURA 4.2 - CENÁRIO DE PROPAGAÇÃO NUM AMBIENTE URBANO [WINP09].	56
FIGURA 4.3 - CENÁRIO PARA UMA PREDIÇÃO DE TERRENO [WINP09].	57
FIGURA 4.4 - ESTRUTURA DE ÁRVORE CONSTRUÍDA ATRAVÉS DE ALGORITMO [WWWL05].	57
FIGURA 4.5 - FUNÇÃO PARA AS PERDAS DE INTERACÇÃO [WWWL05].	58
FIGURA 4.6 - INTRODUÇÃO DA BASE DE DADOS.	59
FIGURA 4.7 - CONFIGURAÇÃO DOS ESQUEMAS DE MODULAÇÃO.	59
FIGURA 4.8 - CONFIGURAÇÃO DA INTERFACE AR.	60
FIGURA 4.9 - CONFIGURAÇÃO DOS DADOS RELATIVOS À CÉLULA.	60
FIGURA 4.10 - ESCOLHA DAS VARIÁVEIS A SIMULAR.	61
FIGURA 4.11 - ESCOLHA DO MODELO DE PROPAGAÇÃO.	61
FIGURA 4.12 - CARTA DE LoS, COM $H_{BS} = 15$ METROS.	62
FIGURA 4.13 - CARTA DA POTÊNCIA DE SINAL, COM $H_{BS} = 15$ METROS.	62
FIGURA 4.14 - ATENUAÇÃO DO SINAL, COM $H_{BS} = 15$ METROS.	63
FIGURA 4.15 - CARTA DE NLoS, COM $H_{BS} = 21$ METROS.	63
FIGURA 4.16 - CARTA DA ATENUAÇÃO DO SINAL, COM $H_{BS} = 21$ METROS.	63
FIGURA 4.17 - POTÊNCIA DE SINAL, COM $H_{BS} = 21$ METROS.	64
FIGURA 4.18 - CONFIGURAÇÃO DA COR DE FUNDO DA IMAGEM RESULTANTE DO WINPROP™.	66
FIGURA 4.19 - RESULTADO APÓS TRATAMENTO DA COR DE FUNDO.	66

FIGURA 4.20 - CRIAÇÃO DE CONTORNO DAS ZONA DE LOS E NLOS.....	67
FIGURA 4.21 - CONVERSÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DOS DADOS ADQUIRIDOS EXPERIMENTALMENTE.	67
FIGURA 4.22 - PONTOS DE MEDIÇÃO, APÓS TRANSFORMADO O SEU SISTEMA DE COORDENADAS.	68
FIGURA 4.23 - PONTOS DE MEDIÇÃO EM CONDIÇÕES DE NLOS.	68
FIGURA 4.24 - CARTA DE CONDIÇÕES DE LOS E NLOS, COM H_{BS} A 15 METROS.	69
FIGURA 4.25 - CARTA DE CONDIÇÕES DE LOS E NLOS, COM H_{BS} A 21 METROS.	69
FIGURA 4.26 - CARTA DA ATENUAÇÃO, COM H_{BS} A 15 METROS.	70
FIGURA 4.27 - CARTA DA ATENUAÇÃO, COM H_{BS} A 21 METROS.	70
FIGURA 4.28 - CARTA DA POTÊNCIA DE SINAL, COM H_{BS} A 15 METROS.	71
FIGURA 4.29 - CARTA DA POTÊNCIA DE SINAL, COM H_{BS} A 21 METROS.	71
FIGURA 4.30 - CARTA EXPANDIDA DAS CONDIÇÕES DE LOS E NLOS, COM H_{BS} A 15 METROS.	72
FIGURA 4.31 - CARTA EXPANDIDA DAS CONDIÇÕES DE LOS E NLOS, COM H_{BS} A 21 METROS.	72
FIGURA 4.32 - CARTA EXPANDIDA DA COBERTURA DA BS, COM H_{BS} A 21 METROS.	73
FIGURA 4.33 - CARTA EXPANDIDA, DA COBERTURA DA BS, COM H_{BS} A 21 METROS.	73
FIGURA 4.34 - MAPA EXPANDIDO, DA POTÊNCIA DE SINAL, COM H_{BS} A 15 METROS.	74
FIGURA 4.35 - CARTA EXPANDIDA, DA POTÊNCIA DE SINAL, COM H_{BS} A 21 METROS.	74
FIGURA 4.36 - CARTA EXPANDIDA DA ATENUAÇÃO DO SINAL, COM H_{BS} A 15 METROS.	75
FIGURA 4.37 - CARTA EXPANDIDA DA ATENUAÇÃO DO SINAL, COM H_{BS} A 21 METROS.	75
FIGURA 5.1 - METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	79
FIGURA 5.2 - ANTENA RECEPTORA INSTALADA.	80
FIGURA 5.3 - INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DO TIPO DE ATENUAÇÃO E PRÉ-AMPLIFICADOR.	80
FIGURA 5.4 - EQUIPAMENTO IEEE 802.16-2004 INSTALADO NA FCS-UBI.	81
FIGURA 5.5 - ELEVÇÃO DA ANTENA DA BS.	82
FIGURA 5.6 - HISTOGRAMA DOS DADOS RECOLHIDOS.	83
FIGURA 5.7 - TRAJECTO DA EXPEDIÇÃO EXPERIMENTAL 16-07-10 (EXTRAÍDO DO GOOGLE EARTH).	84
FIGURA 5.8 - COMPARAÇÃO DOS TODOS OS DADOS MEDIDOS COM A PREDIÇÃO DO MODELO DE FRIIS.	85
FIGURA 5.9 - PREDIÇÃO DOS MODELOS EMPÍRICOS VS VALORES MEDIDOS, EM LOS.	86
FIGURA 5.10 - PREDIÇÃO DO MODELO DE FRIIS VS VALORES MEDIDOS, LOS.	86
FIGURA 5.11 - PREDIÇÃO DO MODELO DE FRIIS VS VALORES MEDIDOS, LOS.	87
FIGURA A.1 - CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO WiMAX BREEZEMax 3000 [ALVA06].	91
FIGURA A.2 - CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO WiMAX BREEZEMax 3000 [ALVA06].	92
FIGURA A.3 - CARACTERÍSTICAS RÁDIO DO EQUIPAMENTO WiMAX BREEZEMax 3000 [ALVA06B].	92
FIGURA A.4 - RITMOS DE TRANSMISSÃO PARA CADA MODULAÇÃO, SISTEMA BREEZEMax 3000 [ALVA06B].	93
FIGURA A.5 - ANALISADOR DE ESPECTROS PORTÁTIL FSH8 DA RODHE&SCHWARZ [RoSc08]	93
FIGURA A.6 - ANTENA GP3500-10 DA WiMo [WiMo10].	94
FIGURA A.7 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO ANTENA GP3500-10 DA WiMo [WiMo10].	95
FIGURA C.1 - APLICAÇÃO CELULAR DE BACKHAUL [WiFo05].	99
FIGURA C.2 - APLICAÇÃO DE WSP BACKHAUL [WiFo05].	100
FIGURA C.3 - APLICAÇÃO DE REDES DE SERVIÇOS BANCÁRIOS [WiFo05].	101
FIGURA C.4 - APLICAÇÃO EM SERVIÇOS EDUCATIVOS [WiFo05].	102

FIGURA C.5 - APLICAÇÃO EM REDES DE SEGURANÇA PÚBLICA [WiFo05].	102
FIGURA C.6 - APLICAÇÃO EM COMPLEXOS [WiFo05].	103
FIGURA C.7 - APLICAÇÃO DE REDES WIMAX ATRAVÉS DE UM WSP [WiFo05].	104
FIGURA C.8 - APLICAÇÃO EM ZONAS RURAIS DE REDES WIMAX [WiFo05].	105
FIGURA D.1 - EXEMPLIFICAÇÃO DO TERMO CANAL [WiFo08].	107
FIGURA D.2 - EXEMPLO DO EFEITO DE DOPPLER [RAPP02].	111
FIGURA D.3 - PROPAGAÇÃO MULTI-PERCURSO.	113
FIGURA D.4 - DESVANECIMENTO DE RAYLEIGH PARA UM MÓVEL A VELOCIDADE PEDESTRE [PrGr58].	114
FIGURA D.5 - EXEMPLO DE DIFRACÇÃO.	115
FIGURA D.6 - REPRESENTAÇÃO DA ZONA DE FRESNEL [Wiki10].	116
FIGURA D.7 - PRINCÍPIO DE HUYGENS [EFIS10].	117
FIGURA D.8 - EXEMPLIFICAÇÃO DO PRINCÍPIO DE HUYGENS [EFIS10].	118
FIGURA D.9 - GEOMETRIA DA DIFRACÇÃO EM LÂMINA [RAPP02].	118
FIGURA D.10 - CAMPO ELÉCTRICO DIFRACTADO POR DIFRACÇÃO EM LÂMINA[RAPP02].	119
FIGURA D.11 - EXEMPLO DE SINAL REFLECTIDO.	120
FIGURA D.12 - EXEMPLO DE DISPERSÃO.	120
FIGURA E.1 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA COBERTURA DA CÉLULA, COM H_{BS} A 15 METROS.	125
FIGURA E.2 - CARTA EXPANDIDA (A4) DAS CONDIÇÕES DE LOS E NLOS, COM H_{BS} A 15 METROS.	126
FIGURA E.3 - CARTA EXPANDIDA (A4) DOS RITMOS DE TRANSMISSÃO, COM H_{BS} A 15 METROS.	127
FIGURA E.4 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA POTÊNCIA MÁXIMA RECEBIDA, COM H_{BS} A 15 METROS.	128
FIGURA E.5 - CARTA EXPANDIDA (A4) DOS ESQUEMAS DE MODULAÇÃO, COM H_{BS} A 15 METROS.	129
FIGURA E.6 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA ATENUAÇÃO DO SINAL, COM H_{BS} A 15 METROS.	130
FIGURA E.7 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA POTÊNCIA DE SINAL, COM H_{BS} A 15 METROS.	131
FIGURA E.8 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA COBERTURA DA CÉLULA, COM H_{BS} A 21 METROS.	132
FIGURA E.9 - CARTA EXPANDIDA (A4) DAS CONDIÇÕES DE LOS E NLOS, COM H_{BS} A 21 METROS.	133
FIGURA E.10 - CARTA EXPANDIDA (A4) DOS RITMOS DE TRANSMISSÃO, COM H_{BS} A 21 METROS.	134
FIGURA E.11 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA POTÊNCIA MÁXIMA RECEBIDA, COM H_{BS} A 21 METROS.	135
FIGURA E.12 - CARTA EXPANDIDA (A4) DOS ESQUEMAS DE MODULAÇÃO, COM H_{BS} A 21 METROS.	136
FIGURA E.13 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA ATENUAÇÃO DO SINAL, COM H_{BS} A 21 METROS.	137
FIGURA E.14 - CARTA EXPANDIDA (A4) DA POTÊNCIA DE SINAL, COM H_{BS} A 21 METROS.	138

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 - CLASSES DE SERVIÇOS DA TECNOLOGIA 802.16E-2005 [WiFo08].	8
TABELA 2.2 - TABELA COMPARATIVA: FAMÍLIA DE NORMAS IEEE 802.16 [ANGM07].	9
TABELA 2.3 - REQUISITOS DA SUB-FAMÍLIA IEEE 802.16M [PRVE10].	9
TABELA 2.4 - TIPOS DE ACESSOS POSSÍVEIS COM A NORMA 802.16 [YAGH03].	10
TABELA 2.5 - COMPARAÇÃO ENTRE WiMAX "FIXO" E WiMAX MÓVEL [PRVE10].	10
TABELA 2.6 - CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO WiMAX BREEZEMAX 3000 DA ALVARION [ALVA06].	11
TABELA 2.7 - CANAIS UTILIZADOS NA NORMA IEEE 802.16-2004 [ROBA08].	14
TABELA 2.8 - CARACTERÍSTICAS DA CAMADA PHY DA NORMA 802.16-2004.	17
TABELA 2.9 - CARACTERÍSTICAS DAS INTERFACES AR DA CAMADA PHY DA NORMA IEEE 802.16-2004.	17
TABELA 2.10 - CARACTERÍSTICAS DA CAMADA MAC DA NORMA IEEE 802.16-2004.	20
TABELA 2.11 - CLASSES DE SERVIÇO SUPORTADAS NO WiMAX [WiFo05], [ANGM07].	23
TABELA 3.1 - CONSTANTES DO MODELO SUI [IEEE03].	40
TABELA 3.2 - CLASSIFICAÇÃO DO MODELO SUI [ANDE03].	41
TABELA 3.3 - PARÂMETROS DE ERCEG [ANGM07].	47
TABELA 4.1 - RESUMO DOS TIPOS DE AMBIENTE, BASE DE DADOS E RESPECTIVOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO [WINP09].	53
TABELA 4.2 - DESCRIÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE CÉLULA [WINP09].	55
TABELA 4.3 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.	59
TABELA 5.1 - DADOS ESTATÍSTICOS TOTAIS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS.	84
TABELA 5.2 - VALORES DE ERRO NO MODELO DE <i>FRIIS</i> , EM CONDIÇÕES LOS E NLOS.	87
TABELA A.1 - ESPECIFICAÇÕES DA ANTENA GP3500-10 DA WIMO [WIMO10].	94
TABELA A.2 - ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO DE GPS USADO.	95
TABELA B.1 - EVOLUÇÃO DA NORMA 3GPP UMTS [GEMÿ07].	97
TABELA B.2 - COMPARAÇÃO ENTRE IEEE 802.16E-2005 E 3GPP-LTE [3GPP09].	98
TABELA D.1 ESPECTRO DE RADIOFREQUÊNCIAS [GASW09].	107
TABELA D.2 - VALORES TÍPICOS PARA O DESVIO DE DOPPLER EM SISTEMAS WiMAX [ANGM07].	112

Lista de Acrónimos

AAS	<i>Advanced Antenna System</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>
BbB	<i>Burst by Burst</i>
BE	<i>Best Effort</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Base Station</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access Technology</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CCIR	<i>Comitté Consultatif International pour la Radio</i>
CPE	<i>Customer-Premise Equipment</i>
CNP	<i>Combined Network Planning</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DL	<i>Downlink</i>
DP	<i>Dominant Path</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting-Terrestrial</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
ertPD	<i>Extended Real-Time Polling Service</i>
FCS-UBI	<i>Faculdade de Ciências da Saúde - Universidade da Beira Interior</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IGeoE	<i>Instituto Geográfico do Exército</i>

IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
ITU-R	<i>International Telecommunications Union - Radiocommunications</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
MAC	<i>Media Access Control layer</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MPDUs	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
MPEG	<i>Motion Picture Experts Group</i>
MS	<i>End-user devices in 802.16j</i>
MSDUs	<i>MAC service data units</i>
nrtPS	<i>Non Real-time Polling Service</i>
ODU	<i>Output Data Unit</i>
NLoS	<i>Non Line of Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OLoS	<i>Obstructed Line of Sight</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PDA	<i>Pocket Data Assistant</i>
PDU	<i>Decoded packet unit</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PtM	<i>Ponto-Multiponto (Point-to-Multipoint)</i>
PtP	<i>Ponto-a-Ponto (Point-to-Point)</i>
RDP	<i>Rural Dominant Path</i>
RF	<i>Rádiofrequência</i>
rtPS	<i>Real-Time Polling Service</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
SA	<i>Smart Antennas</i>
SCM	<i>Single Carrier Modulation</i>

SIG	<i>Sistemas de Informação Geográfica</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SLF	<i>Super Low Frequency</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRS-FEC	<i>Strong Reed Solomon Forward Error Correction</i>
STC	<i>Space Time Coding</i>
STIG	<i>Serviço Tranfronteiriço de Informação Geográfica</i>
SOFDM	<i>Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
SUI	<i>Stanford University Interism</i>
3G	<i>Third Generation</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time division multiple access</i>
UBI	<i>Universidade da Beira Interior</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UHF	<i>Ultra Hight Frequency</i>
UL	<i>Uplink</i>
ULF	<i>Ultra Low Frequency</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLf	<i>Very Low Frequency</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WAN	<i>Wireless Area Network</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Networks</i>

Lista de Símbolos

B	<i>Factor correcção da irregularidade do terreno</i>
γ	<i>Expoente de propagação</i>
γ_{chuva}	<i>Atenuação específica devido à chuva</i>
$\gamma_{nevoeiro}$	<i>Atenuação específica devido ao nevoeiro</i>
γ_{neve}	<i>Atenuação específica devido à neve</i>
$\Delta\Phi$	<i>Diferença de fase entre o campo</i>
Δf	<i>Varição de frequência</i>
Δh	<i>Diferença entre a altura dos edifícios e a altura do receptor</i>
ΔPL_f	<i>Factor correcção em relação à frequência</i>
ΔPL_{hMS}	<i>Altura do receptor</i>
$\Delta PL_{\theta MS}$	<i>Directividade da antena do receptor</i>
Δt	<i>Intervalo de tempo</i>
θ	<i>Ângulo de desfasamento</i>
λ	<i>Comprimento da onda</i>
u	<i>Difracção de Fresnel-Kirchoff</i>
w	<i>Largura da rua</i>
Ω	<i>Factor de onda guiada</i>
A_0	<i>Atenuação em espaço livre</i>
A_{bm}	<i>Média das perdas de percurso</i>
A_0	<i>Atenuação em espaço livre</i>
a_{hm}	<i>Factor de correcção para a dimensão da área urbana</i>
$a(h_r)$	<i>Factor de correcção da antena do receptor</i>
b_h	<i>Altura efectiva da antena da estação base</i>
b_{rf}	<i>Largura de banda efectiva de ruído</i>
C/N	<i>Relação portadora-ruído térmico</i>
c	<i>Velocidade de propagação no vazio</i>
d	<i>Distância percorrida</i>
d_{bp}	<i>Distância à interface entre ambientes</i>
d_{min}	<i>Distância mínima</i>
E_0	<i>Valor de campo no espaço livre</i>
E_d	<i>Força do campo eléctrico</i>
$F(v)$	<i>Integral de Fresnel</i>
f	<i>Frequência</i>
f_D	<i>Frequência Doppler</i>
G_c	<i>Factor de ganho de altura da estação base</i>

G_E	<i>Ganho de antena de emissão</i>
G_R	<i>Ganho de antena de recepção</i>
G_b	<i>Ganho da antena emissora</i>
G_{dB}	<i>Ganho de difracção</i>
G_m	<i>Ganho da antena receptora</i>
G_t	<i>Factor de ganho da antena receptora</i>
h	<i>Altura dos edifícios entre emissor e receptor</i>
h_b	<i>Altura da antena emissora</i>
h_m	<i>Altura da antena receptora</i>
h_t	<i>Altura efectiva da antena receptora</i>
K_B	<i>Constante de Boltzman</i>
K_a	<i>Factores de correcção de altura da antena emissora</i>
K_f	<i>Factor de correcção para a densidade de edifícios</i>
L	<i>Atenuação</i>
L_0	<i>Propagação em espaço livre</i>
L_{msd}	<i>Factor de difracções múltiplas</i>
L_{ori}	<i>Factor de orientação com a rua</i>
L_{rts}	<i>Factor de difracção e espalhamento do último obstáculo</i>
N	<i>Ruído aos terminais da antena</i>
N_f	<i>Factor de ruído do receptor</i>
n_0	<i>Potência do ruído térmico</i>
P_E	<i>Potência emitida</i>
P_R	<i>Potência recebida</i>
R_x	<i>Receptor</i>
r	<i>Raio</i>
T	<i>Temperatura observada pela antena</i>
T_r	<i>Temperatura equivalente de ruído do receptor</i>
T_x	<i>Emissor</i>
t_j	<i>Atenuação de transmissão</i>
v	<i>Velocidade média do móvel</i>
X_f	<i>Correcção para a frequência</i>
X_h	<i>Altura do terminal móvel acima do solo</i>

Lista de Software

ArcGIS™	O ArcGIS™ da ESRI é uma ferramenta de tratamento de dados geográficos. Permite a criação, gestão, integração e análise de dados geográficos.
FSH4View™	O FSH4View™ (Rohde&Schwarz™ Test and Measurement Division) é um software que permite a aquisição e a análise de medições feitas através do analisador de espectros conectado a um PC via Ethernet (USB o LAN).
GE-Graph 2.2.2	GE-Graph foi desenvolvido para gerar ficheiros *.kml 2D e 3D no Google Earth™. A informação pode ser inserida na aplicação ou copiada de ficheiros Excel. Aplicação freeware.
Google Earth™	Google Earth™ é um ambiente virtual que representa o globo terrestre, com detalhados mapas e toda informação geográfica a eles associada. O programa foi conhecido inicialmente como EarthViewer 3D, e foi criado pela Keyhole, Inc, que foi adquirida em 2004 pela Google™.
GPS TrackMaker®	O GPS TrackMaker® é um programa para Windows® 98SE/2000/ME/XP/Vista que permite a comunicação entre dispositivos GPS e um computador. Permitindo visualizar toda a informação adquirida, guardá-la e configurá-la.
MATLAB™	Trata-se de um software interactivo concebido para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos, implementação de algoritmos e permite o interface com outras linguagens, incluindo C, C++, e FORTRAN™.
Microsoft Excel®	Microsoft Excel® é um ambiente gráfico que permite a elaboração de cálculo, elaboração de gráficos e criação de macros.
SPSS Statistics 17.0	SPSS é um software aplicativo científico, acrónimo de <i>Statistical Package for the Social Sciences</i> . Um programa de apoio a tomada de decisão que inclui: aplicação analítica, <i>Data Mining</i> , <i>Text Mining</i> e estatística.
Winprop™ 2008	O Winprop™ é uma ferramenta de engenharia de planeamento de redes móveis e sem fios. Permite a simulação de propagação em cenários e normas definidos pelo utilizador, e calcular várias variáveis do sinal. Além disso, possui outras duas ferramentas para criação de diagramas de radiação e criação e tratamento de dados geográficos, incluindo dados geográficos urbanos em 3D.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo descreve-se a motivação e abordagem para a realização desta dissertação. Apresentam-se os objectivos, assim como a sua estrutura e organização.

1.1 Motivação e Abordagem

Os sistemas sem fios de banda larga (BWA - *Broadband Wireless Access*) permitirão estender o conceito de redes locais sem fios com IP (*Internet Protocol*) para redes de área metropolitana. Estas WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*) poderão suportar mobilidade restrita ou mobilidade elevada, podendo vir a tornar-se competidoras directas com os sistemas moveis 3G e futuros, num contexto de interoperabilidade. O WiMAX é o nome dado pela WiMAX Forum para as tecnologias IEEE 802.16 e pretende dar resposta à necessidade crescente de disponibilizar sistemas BWA à escala global.

O WiMAX possui actualmente duas normas principais, a IEEE 802.16-2004 (versão fixa e com um grau médio de portabilidade e que utiliza OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a IEEE 802.16e-2005 (utilizando OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), com suporte de mobilidade. O problema de planeamento celular para a IEEE 802.16-2004 assemelha-se ao planeamento celular clássico, sendo os aspectos de cobertura e reutilização de frequências abordados de uma forma muito semelhante. No entanto, no IEEE 802.16e (com suporte de *handovers*) o problema de reutilização de recursos é mais complexo dado que existe a possibilidade de sub-canalização na ligação descendente (no IEEE 802.16-2004 já era possível na ligação ascendente) e as tramas são diferentes, o que resulta na possibilidade de aplicar reutilização fraccionária, ou seja, aplicação de reutilização superiores no anel exterior das células. Para além disso, os algoritmos de escalonamento de pacotes (*packet scheduling*) utilizados na camada MAC (controlo de acesso ao meio) terão um forte impacto no próprio planeamento e as suas funcionalidades poderão ser exploradas para otimizar o planeamento do sistema celular de uma forma importante. Outro aspecto importante do WiMAX móvel é o suporte de uma nova classe de serviço, que suporta, por exemplo, VoIP (voz sobre IP). No futuro, o IEEE 802.16m (*Advanced Air Interface*) permitirá ritmos de transmissão superiores e permitirá uma evolução da interface ar do WirelessMAN - OFDMA com vista à convergência com redes móveis como a IMT - *Advanced*, que está a ser desenvolvida pela ITU-R (*International Telecommunications Union - Radiocommunications*).

Os operadores de redes móveis e sem fios têm a necessidade de conceber metodologias de planeamento de redes WiMAX fixo e móvel que permitam com rigor e com

um potencial elevado de optimização dos sistemas implementados. Têm que se considerar diferentes tipos de ambiente, tipos de relevo, condições de procura de tráfego, tendo em conta a possibilidade de se recorrer a diferentes classes de serviço e a protocolos MAC que permitam optimizar os resultados de planeamento em termos de capacidade de sistema, cobertura e custo/benefício.

Pretende-se com este trabalho abordar aspectos de optimização do planeamento celular para WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) fixo/portátil, realimentando o processo de planeamento radioelétrico e de rede com medições de cobertura obtidas através de trabalho experimental com recurso a um analisador de espectros e um GPS (*Global Positioning System*). O ponto de partida baseou-se na experiência forte que a equipa de I&D do Laboratório de Telecomunicações da Covilhã (WE-MOVE@Covilhã) possui na área do planeamento do IEEE 802.16-2004.

Como estes tipos de sistema são bastante recentes, e atendendo ao equipamento disponível no Laboratório de Telecomunicações da Covilhã, recorre-se a campanhas com equipamento real e a simulações através da ferramenta de planeamento Winprop™, Figura 1.1. Ambicionou-se consolidar esse trabalho, através do tratamento de novos resultados experimentais, nos quais se incluem novas medidas de cobertura através do sistema WiMAX IEEE 802.16-2004 já implementado [Roba08], [Cost09].

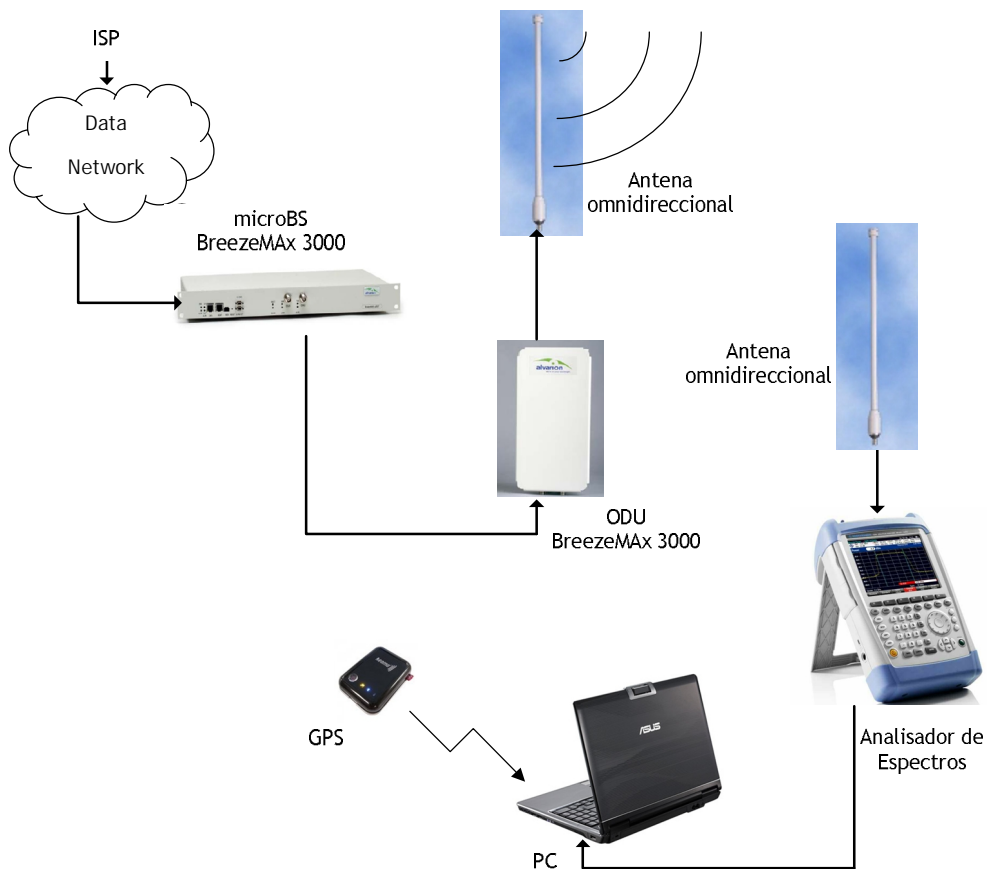


Figura 1.1 - Esquema da abordagem feita para esta dissertação.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é constituída por 6 Capítulos e seis anexos. O presente Capítulo serve de introdução, sendo os seguintes descritos da seguinte forma:

- O Capítulo 2 faz uma breve descrição da norma IEEE 802.16, mais especificamente da IEEE 802.16-2004. Apresentam-se conceitos e terminologias, assim como as principais características da camada física e MAC da norma.
- No Capítulo 3 descrevem-se e analisam-se alguns modelos empíricos de propagação, tendo em conta o cenário base deste trabalho.
- O Capítulo 4 apresenta a ferramenta de simulação utilizada, o WinProp™, analisando-se os resultados obtidos na zona da cidade da Covilhã a partir da sua utilização, e ainda a ferramenta de informação geográfica, ArcGIS™, que serviu para tratar os dados resultantes da simulação.
- No Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais, o cenário onde foram efectuados, analisam-se os resultados e descreve-se toda a metodologia utilizada.
- Por último, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugere propostas de trabalho futuro.

No fim desta dissertação apresenta-se seis anexos com informação auxiliar e aspectos relevantes relacionados com a elaboração desta dissertação, sendo descritos da seguinte forma:

- O Anexo A apresenta as características técnicas do material utilizado nesta dissertação.
- O Anexo B aborda conceitos e mecanismos de propagação gerais.
- O Anexo C descreve alguns cenários de aplicação da norma IEEE 802.16.
- O Anexo D faz uma breve comparação entre a norma IEEE 802.16e-2005 e a norma 3GPP-LTE.
- O Anexo E apresenta os resultados simulados no Winprop™ em tamanho A4.
- O Anexo F apresenta os scripts desenvolvidos em MatLAB™ para o tratamento de dados.

Capítulo 2

WiMAX

Neste capítulo, faz-se uma breve introdução da tecnologia WiMAX, os seus conceitos fundamentais, camadas física e MAC, topologias de rede, antenas e outros conceitos aplicados na elaboração experimental desta dissertação.

2.1 IEEE 802.16-2004 no contexto das redes sem fios IEEE 802.16

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é o nome comercial dado à norma IEEE 802.16 para redes metropolitanas sem fios. Sendo igualmente conhecida como IEEE WirelessMAN ou ainda "*Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*".

Esta norma tem como proposta inicial disponibilizar o acesso de banda larga sem fios para novas localizações cobrindo distâncias superiores, sem a necessidade de investimento elevados em infra-estruturas (como ocorre com uma rede de acesso banda larga "cablada") e sem as limitações de distância das tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line*).

Nesta dissertação trabalhou-se com o sistema WiMAX que se encontra instalado na Faculdade de Ciências da Saúde-UBI (FCS-UBI), na Covilhã, que está a operar a 3.5 GHz com uma largura de banda de 3.5 MHz, com base no perfil físico IEEE 802.16-2004 OFDM associado a uma topologia Ponto-Multiponto (PtM).

O sistema WiMAX é essencialmente constituído por duas partes:

- o Uma estação de base WiMAX (BS, acrónimo de *Base Station*) que controla e gere as conexões. Envia dados em canais *downlink* diferentes para cada subscritor. A estação base pode cobrir múltiplos sectores, com a ajuda de antenas sectoriais.
- o Um receptor WiMAX (SS, acrónimo de *Subscriber Station*), que é um terminal que comunica com a BS. O *uplink* é PtP numa configuração de rede PtM, embora numa configuração de rede *mesh* seja indiferente. Todas as SS no mesmo sector e no mesmo canal de frequência recebem a mesma informação.

O WiMAX permite fornecer serviços *wireless* de duas formas:

- o *Line of Sight* (LoS), em que uma antena fixa é apontada à BS, fornecendo uma ligação mais estável e robusta. Tipicamente em condições LoS podem-se utilizar frequências mais elevadas.
- o *No Line of Sight* (NLoS), usando o espectro de frequências mais baixo, entre 2 a 11 GHz, permitindo evitar falhas de transmissão devido a obstáculos físicos.

Uma estação de base WiMAX pode enviar/receber dados a/de receptores até uma distância de 50 km, atingindo os seus valores máximos em ligações PtP (Ponto-a-Ponto). A célula associada a cada estação de base tem usualmente um raio de 6 a 9 km, o que permite uma cobertura entre 100 a 200 km². A tecnologia WiMAX foi desenvolvida tendo em vista certos requisitos, tais como, uma arquitectura flexível (PtP, PtM e cobertura omnipresente), a segurança e privacidade na interface de acesso a rede, a qualidade de serviço, a implementação do sistema WiMAX e o seu custo, a portabilidade, a mobilidade, a cobertura, a interoperabilidade, a capacidade e operação em condições NLoS.

A norma IEEE 802.16-2004 tem as seguintes características técnicas [AnGM07]:

- o *Duplexing TDD/FDD*, os sistemas WiMAX podem ser configurados em FDD (*Frequency Division Duplex*) ou em TDD (*Time Division Duplex*). Em FDD, a comunicação é full-duplex e é efectuada em 2 canais em frequências diferentes, um para upload e outro para download. Normalmente a frequência mais baixa é a da estação móvel pois implica menor potência da fonte. Em TDD o canal é dividido em *slots* de tempo para upload e download, sendo também uma comunicação full-duplex. Como utiliza apenas um canal, a taxa de transmissão diminui e a largura de banda necessária também.
- o *Modulação*, o WiMAX apresenta três modos de operação, todos na camada física (PHY), os quais são: *single carrier*, 256'OFDM, ou 2048'OFDMA. O modo mais comumente utilizado é o 256'OFDM.
- o *Cobertura*, a norma IEEE 802.16-2004 também suporta tecnologias que permitem a expansão de cobertura, incluindo as tecnologias de "*smart antennas*" ou antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), assim como as tecnologias *mesh*. A utilização de técnicas avançadas de múltiplo acesso, OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), codificação e modulação aumentam o desempenho na ausência de linha de vista. Os ganhos superiores resultantes permitem maior penetração nos obstáculos a longa distância.
- o *Débito Binário*, com um esquema de modulação robusto, o WiMAX entrega elevadas taxas de débito binário a longo alcance e uma grande eficiência espectral tolerante às reflexões de sinal. A velocidade de transmissão dos dados varia entre 1 Mbps e 75 Mbps, dependendo das condições de propagação. O WiMAX utiliza esquemas de modulação e codificação adaptativa que permite que uma BS (*Base Station*) negocie o débito binário e o alcance do sinal (mais alcance menos débito e vice-versa variando a ordem da modulação).
- o *Escalabilidade*, a grande flexibilidade do WiMAX permite a utilização de várias frequências (licenciadas ou livres) e larguras de banda de canal, necessárias para a aplicação ou impostas pela entidade reguladora de atribuição do espectro.
- o *Qualidade de Serviço (QoS)*, a norma IEEE 802.16-2004 apresenta qualidade de serviço que permite a transmissão de voz e vídeo, que requerem redes de baixa latência. O controlo do acesso ao meio, MAC (*Medium Access Control*) da norma IEEE 802.16-2004 fornece um elevado volume de serviços num padrão equivalente aos

serviços hoje oferecidos pelos serviços de ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e de *Cable Modem*, tudo dentro da mesma BS.

- o Segurança, as características de privacidade e encriptação estão previstos na norma IEEE 802.16-2004, permitindo transmissões seguras incluindo os procedimentos de autenticação.

A norma IEEE 802.16 tem uma cobertura máxima de 50 km, taxas de transferência médias de 75 Mbps e máxima de 268 Mbps, pode ainda suportar centenas de utilizadores. As emendas à norma IEEE 802.16, possibilitarão que uma única estação base ofereça BWA tanto para terminais fixos como móveis. Essas correções irão preencher a lacuna entre as elevadas taxas de dados das redes locais sem fios, WLAN (*Wireless Local Area Network*), e a elevada mobilidade celular das redes de área metropolitanas, MAN (*Metropolitan Area Network*). A Figura 2.1 apresenta a evolução temporal da norma IEEE 802.16.

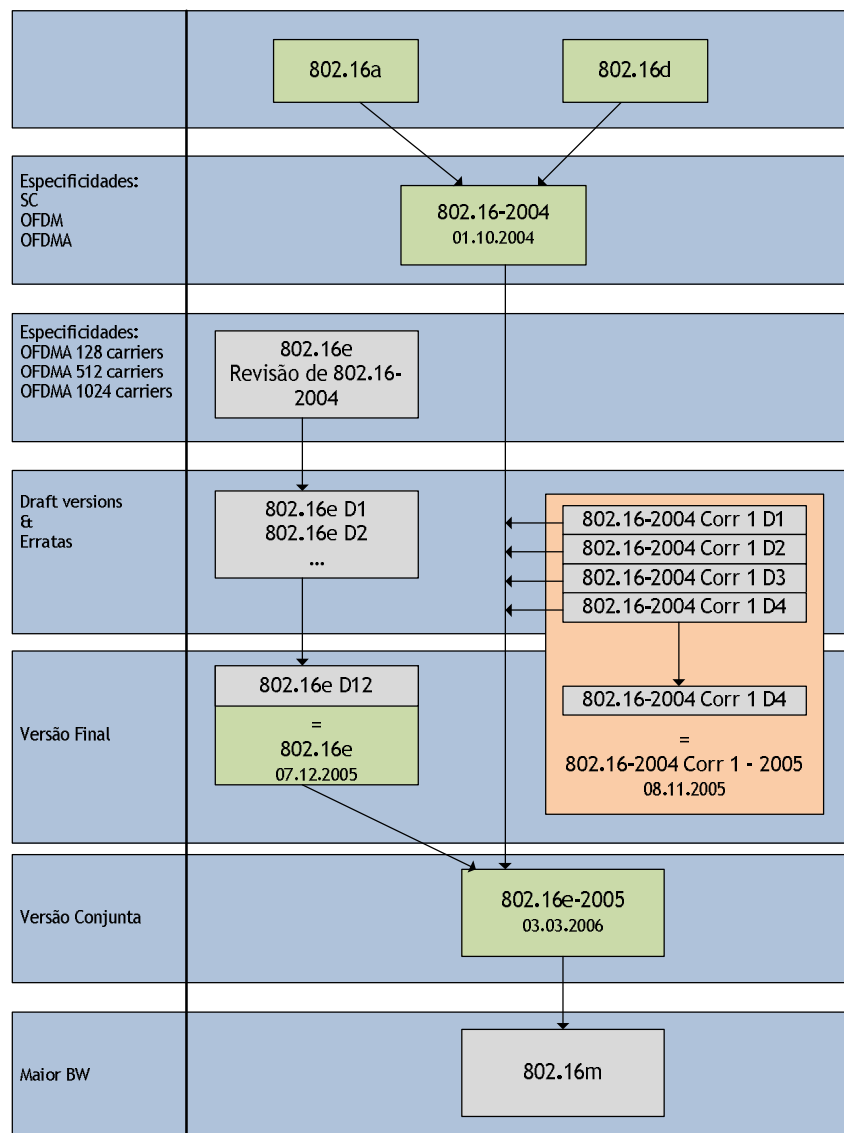


Figura 2.1 - Evolução da norma IEEE 802.16 [GeMü07].

As sub-famílias de normas que constituem a norma IEEE 802.16 são:

- o IEEE 802.16a - projectada para utilizar as frequências mais baixas (2-11GHz). Foi especificada com o objectivo de competir com as tecnologias como xDSL e *cable modems*. Podem obter-se taxas de transmissão até 75 Mbps, um alcance máximo de 50 km e suporta ambientes NLoS e emprega antenas fixas.
- o IEEE 802.16b - trata aspectos relativos à qualidade de serviço.
- o IEEE 802.16c - especifica aspectos de interoperabilidade, protocolos e especificação de testes de conformidade.
- o IEEE 802.16-2004 - trata-se de uma actualização da norma IEEE 802.16, que consolida as revisões das normas IEEE 802.16a e IEEE 802.16c numa única norma, substituindo o IEEE 802.16-2004 ou 802.16a/REVd como a norma base. Entre as alterações, destacam-se o suporte de antenas MIMO, o que aumenta a fiabilidade e o alcance em multi-percurso.
- o IEEE 802.16e-2005 - conhecido como WiMAX móvel, adiciona especificações de mobilidade (WMAN's móveis). Aspectos como largura de banda limitada (um máximo de 5 MHz), velocidade mais lenta e antenas menores possibilitam uma mobilidade veicular (até 150 km/h). É compatível com as especificações da norma IEEE 802.16. Em frequências inferiores a 3.5 GHz pode oferecer raios de cobertura compreendidos entre 2 a 5 km, em ambiente urbano. Desta especificação, surgiram algumas revisões como: 802.16f-2005, 802.16g-2007, 802.16k-2007, 802.16h, 802.16i, 802.16j (especificação para utilização de *relays*) e 802.16Rev2. Na Tabela 2.1, apresentam-se algumas das aplicações desta especificação.

Tabela 2.1 - Classes de serviços da tecnologia 802.16e-2005 [WiFo08].

Classe	Tipo de Aplicação	Largura de Banda	Latência ¹	Efeito Jitter ²			
1	Jogos interactivos	Baixo	50-85 kbps	Baixo	<150mseg	Baixo	<100mseg
2	VoIP/Vídeo-conferência	Baixo	4-384 kbps	Baixo	<150mseg	Baixo	<50mseg
3	Media Streaming	Baixo/Alto	5kbps-2Mbps	N/A		Baixo	<100mseg
4	Mensagens instantâneas & Web browsing	Moderada	10kbps-2Mbps	N/A			N/A
5	Media downloads	Alta	>2Mbps	N/A			N/A

¹ Latência é o requisito estimado do atraso que um pacote leva desde a sua fonte ao destino.

² Jitter é requisito estimado da variação do atraso no envio de pacotes sucessivos de dados.

Tabela 2.2 - Tabela comparativa: família de normas IEEE 802.16 [AnGM07].

	<i>IEEE 802.16</i>	<i>IEEE 802.16-2004</i>	<i>IEEE 802.16e-2005</i>
Data de Aprovação	Dezembro 2001	Junho de 2004	Dezembro 2005
Frequências	10-66 GHz	2-11 GHz	2-6 GHz
Arquitetura MAC	PtP e <i>mesh</i>	PtP e <i>mesh</i>	PtP e <i>mesh</i>
Esquemas de Transmissão	Portadora única	Portadora única, 256' OFDM ou 2048' OFDM	Portadora única, 256' OFDM ou SOFDM (com 128, 512, 1024 ou 2048 sub-portadoras)
Modulação	QPSK, 16-QAM e 64-QAM	QPSK, 16-QAM e 64-QAM	QPSK, 16-QAM e 64-QAM
Mobilidade	Fixa	Fixa e Mobilidade Pedestre	Mobilidade, <i>roaming</i> regional
<i>Duplexing</i>	TDD e FDD	TDD e FDD	TDD e FDD
Largura de Banda de Canal	20, 25 e 28 MHz	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75 MHz	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75 MHz
Aplicação do Canal	LoS	LoS e NLoS	LoS e NLoS
Ritmos de Transmissão	32-134.4 Mbps	1-75 Mbps	1-75 Mbps
Raio típico da Célula	2-5 km	5-10 km	2-5 km

De forma a complementar as informações anteriormente dadas, a Tabela 2.2 apresenta as principais características e diferenças entre as mais importantes sub-famílias de normas que constituem a IEEE 802.16.

- o IEEE 802.16m - pretende elevar o débito binário máximo para 1Gbps e possivelmente fundi-la com a 4G. À semelhança da IEEE 802.16e, irá suportar tecnologia MIMO e manter a compatibilidade com as normas já existentes. Na Tabela 2.3, apresentam-se os requisitos desta especificação.
- o IEEE 802.16p, é a norma mais recente, IEEE 802.16p abrange serviços necessários para M2M (*Machine-to-Machine*), visa conectar dispositivos com capacidade de comunicação sem fios ou cablada de baixo consumo [IEEE10].

Tabela 2.3 - Requisitos da sub-familia IEEE 802.16m [PrVe10].

Parâmetros	Requisitos
Largura de Banda	Entre 5-20 MHz escaláveis
Duplexing	<i>Full duplex</i> e <i>Half duplex</i> FDD, TDD
Ritmos de Transmissão	Downlink: >8.0 bps/Hz e Uplink: >2.8 bps/Hz
Mobilidade	Até 350 km/h

As Tabelas 2.4 e 2.5, apresentam um resumo dos tipos de acesso dos sistemas WiMAX, relacionando a norma que possibilita cada acesso e uma comparação entre WiMAX “fixo” e móvel.

Tabela 2.4 - Tipos de acessos possíveis com a norma 802.16 [Yagh03].

Tipo de acesso	Dispositivos	Localidade/Velocidade	Handover	802.16-2004	802.16e
Fixo	CPEs <i>indoor</i> e <i>outdoor</i>	Simples/ Estacionário	Não	Sim	Sim
Pedestre	CPEs <i>indoor</i> , placas PCMCIA	Múltipla/ Estacionário	Não	Sim	Sim
Portátil	Placas PCMCIA ou mini-placas	Múltipla/ Velocidade pedestre	<i>Hard</i> <i>handover</i>	Não	Sim
Mobilidade simples	Placas PCMCIA ou mini-placas, PDA ou <i>smartphones</i>	Múltipla/ Baixa velocidade veicular	<i>Hard</i> <i>handover</i>	Não	Sim
Mobilidade total	Placas PCMCIA ou mini-placas, PDA ou <i>smartphones</i>	Múltipla/ Alta velocidade veicular	<i>Soft</i> <i>handover</i>	Não	Sim

Tabela 2.5 - Comparação entre WiMAX “fixo” e WiMAX móvel [PrVe10].

Parâmetro	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005
Definição	Permite BWA no alcance da BS, não permite <i>handover</i> .	Permite <i>handover</i>
Nome standard	802.16d	802.16e
Data de Aprovação	Junho de 2004	Dezembro de 2005
Bandas de Frequência	2-66GHz	2-6 GHz (Licenciada)
Características chave	Aplicável em LoS e NLoS Largura de banda de canal seleccionáveis entre 1.25 e 20 MHz	Permite acesso <i>wireless</i> a velocidades veiculares Nesta velocidade, os ritmos de transmissão são inferiores a velocidades pedestres
Aplicação	Acesso Fixo e Nómada	Acesso nómada e móvel PC data cards
Dispositivos de Acesso	Antenas direccionais Modems <i>indoor</i>	Laptops e <i>gadgets</i> móveis com chip integrado para WiMAX

Na realização do trabalho experimental para esta dissertação, utilizou-se o equipamento WiMAX BreezeMax 3000 da Alvarion (Anexo A). Este sistema, foi instalado e configurado pela equipa do Laboratório de Telecomunicações do IT-Covilhã, servindo para diversos estudos e aplicações, como anteriormente referido [Roba08], [Cost09].

Tabela 2.6 - Características do equipamento WiMAX BreezeMax 3000 da Alvarion [Alva06].

Item	Descrição		
Frequência	Unidade/Banda	<i>Uplink</i> [MHz]	<i>Downlink</i> [MHz]
	AU-ODU-3.5a	3399.5-3453.5	3499.5-3553.5
	AU-ODU-3.5b	3450-3500	3550-3600
Modo de Operação	FDD, <i>Full Duplex</i>		
Largura de Banda Canal	1.75 e 3.5 MHz		
Modulação	OFDM, 256FFT, BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM		
FEC	Códigos Convolucionais: 1/2, 2/3, 3/4		
Resolução da Frequência Central	0.125 MHz		
Potência Máx. Entrada AU-ODU	-50 dBm antes da saturação, -17 dBm antes de <i>damage</i>		
Potência de Saída AU-ODU	AU-ODU: 28 dBm +/-1 dBm máxima AU-ODU-HP: 34 dBm +/-1 dBm máxima Gama de controlo de potência: 13 dBm máximo suportado pela unidade, em 3.6 GHz A potência mínima da ODU é 18 dBm		

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) definiu um conjunto de normas complementares para redes sem fios, Figura 2.2. Essa normalização inclui a norma IEEE 802.15 para as redes pessoais PAN (*Personal Area Network*), também conhecida por *bluetooth*, a IEEE 802.11 para as redes locais LAN (*Local Area Network*), ou Wi-Fi, a IEEE 802.16 para as redes metropolitanas MAN, ou WiMAX, e a IEEE 802.20 para as redes geograficamente distribuídas WAN (*Wide Area Network*), como a 3GPP-LTE (Anexo B) Cada norma representa uma tecnologia otimizada para mercados e modelos distintos, sendo projectada para complementar as demais. Um bom exemplo, do referido anteriormente, é a proliferação de redes locais sem fios domésticas, empresariais e hotspots comerciais baseados na norma IEEE 802.11. Essa proliferação de WLANs, predominantemente *indoor* está a impulsionar a procura de ligações de banda larga de Internet, procura essa a que a norma IEEE 802.16 pode responder, oferecendo ligações outdoor por parte dos fornecedores de serviço de comunicação. Para os operadores e fornecedores de serviço, os sistemas construídos com base na norma IEEE 802.16, representam o terceiro anel da Figura 2.2, são de fácil implantação, capazes de ligar residências, empresas e universidades ao núcleo das redes de telecomunicações em todo o mundo.

No Anexo C, apresentam-se alguns cenários de aplicabilidade da norma 802.16.

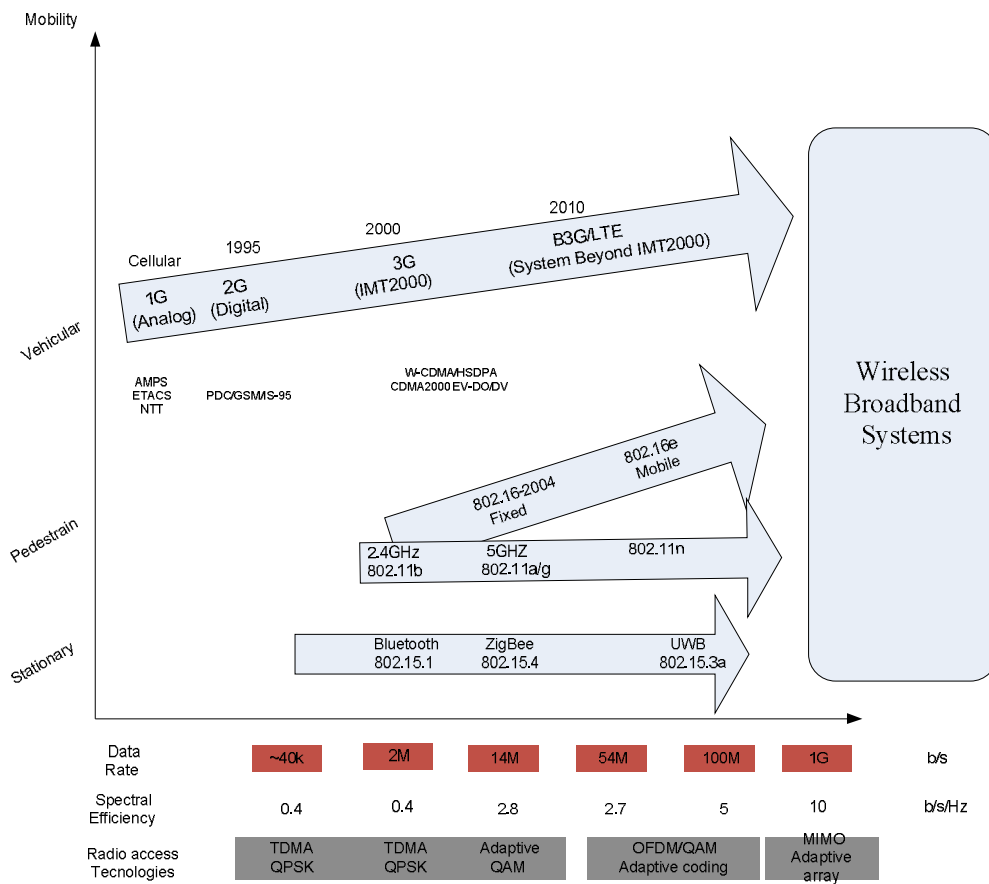


Figura 2.2 - Normalização global para redes sem fios [PrVe10].

2.2 Camada PHY e camada MAC da norma IEEE 802.16

A norma IEEE 802.16 define o fornecimento de acesso às redes metropolitanas na forma de acesso "fixo sem fios". Neste contexto, o *backbone* da BS é garantido por um ISP público, cada BS tem capacidade para fornecer acesso a centenas de estações subscritoras fixas, as quais podem ser tanto *hotspots* WiFi (*Wireless Fidelity*) públicos como redes empresariais.

As BSs devem utilizar a camada MAC como definido na norma IEEE 802.16 e atribuir largura de banda nos canais de *uplink*, UL (sentido de transmissão ascendente, da SS para a BS) e *downlink*, DL (sentido de transmissão descendente, da BS para a SS) ou os utilizadores, de acordo com as suas necessidades, utilizando a camada PHY da norma IEEE 802.16 que se adequa à faixa de frequência em utilização [AnGM07].

Neste Capítulo, apresentam-se resumidamente as especificações das camadas PHY e MAC definidas no WiMAX com base na norma IEEE 802.16 e na norma IEEE 802.16-2004, Figura 2.3.

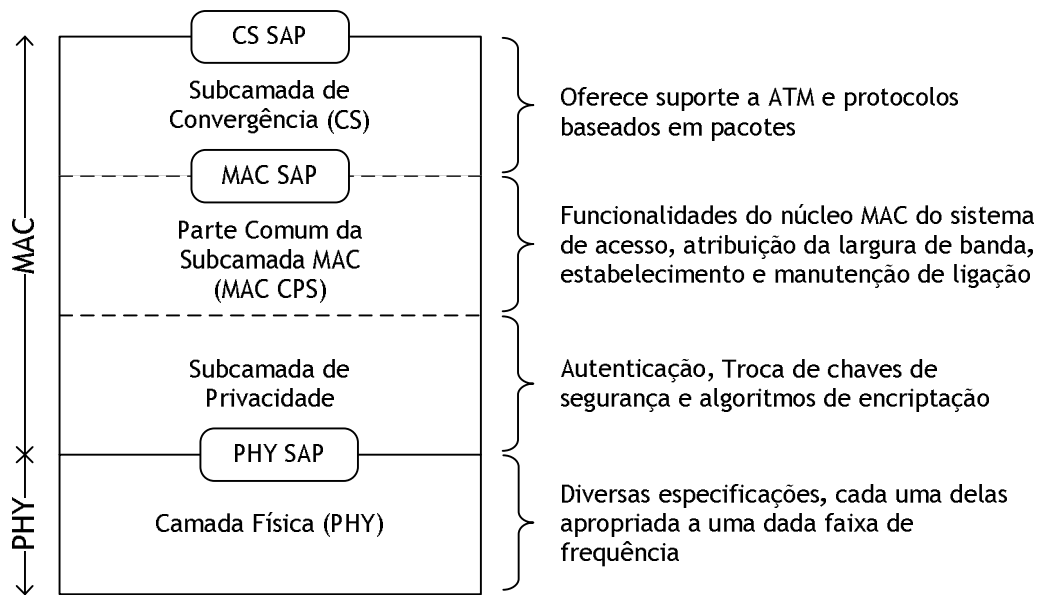


Figura 2.3 - Camadas PHY e MAC da norma IEEE 802.16 [Roba08].

2.2.1 Camada PHY (*Physical Layer*)

O WiMAX foi projectado para suportar ritmos de transmissão elevados, a relativamente grandes distâncias, garantindo elevado nível de segurança. Para que o WiMAX seja uma realidade, na camada PHY, os investigadores (IEEE 802.16) basearam-se em tecnologias como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), o TDD (*Time Division Duplexing*), o FDD (*Frequency Division Duplexing*), o QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

A finalidade da camada PHY é o transporte físico, eléctrico ou radioeléctrico dos dados. Este transporte de dados em redes sem fios pode ser feito através do ar, infravermelhos ou laser. No desenvolvimento da camada PHY assumiu-se a propagação em ambientes LoS, pois como já foi referido antes, em bandas de frequência elevadas (10-66 GHz) é difícil a propagação em ambientes NLoS. Posto isto, o tipo de modulação escolhida foi a SCM (*Single Carrier Modulation*) com FEC (*Forward Error Correction*), a base da especificação da interface ar, denominada "WirelessMAN-SC".

Nas arquitecturas PtP, a BS basicamente transmite um sinal TDM (*Time Division Multiplexing*) para cada SS, estando a estas associado um *slot* temporal, em série. No sentido UL, a transmissão é feita através de TDMA (*Time Division Multiple Access*).

Com tráfego em rajada oferece os modos de operação TDD (o UL e o DL compartilham um canal, mas não transmitem simultaneamente) e FDD (o UL e o DL operam em canais separados, algumas vezes simultaneamente). Essa característica permite a interoperabilidade da norma IEEE 802.16 com sistemas celulares e outros sistemas sem fios. Há disponibilidade de suporte para utilizadores FDD *half-duplex* (que é uma opção mais barata já que a transmissão e a recepção não são simultâneas), que foi adicionada com complexidade

reduzida. Ambas as alternativas, TDD e FDD, oferecem suporte a perfis adaptativos de tráfego em rajada, Figura 2.4, nos quais as opções de modulação e codificação podem ser associadas dinamicamente rajada a rajada (*burst by burst*, abreviando-se na literatura como BbB).

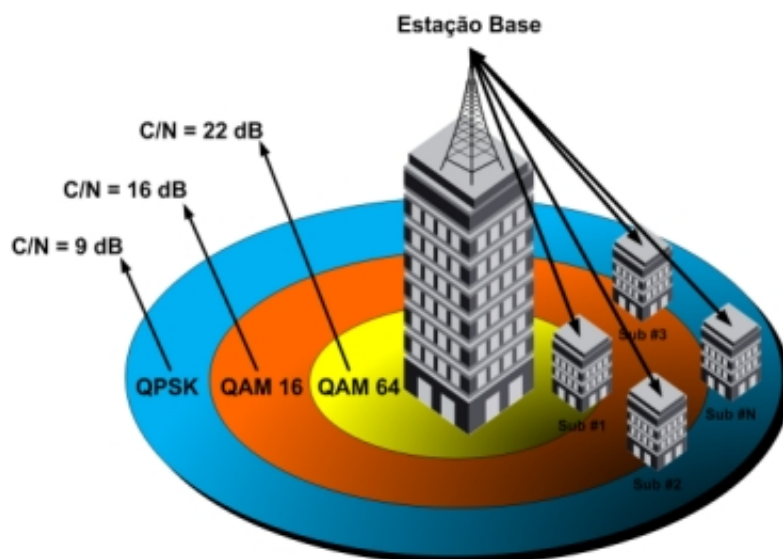


Figura 2.4 - Perfis de rajada, associação dinâmica do tipo de modulação [Roba08].

Se a potência do sinal diminui em função da distância relativamente à BS, a relação portadora-ruído, SNR, diminui igualmente. Por essa razão, a norma IEEE 802.16 emprega três esquemas de modulação diferentes, dependendo da distância a que a SS se encontra em relação à BS. Para utilizadores na região próxima da BS, utiliza-se a modulação 64-QAM. No caso de utilizadores situados a uma distância média, utiliza-se a modulação 16-QAM e para utilizadores distantes, utiliza-se a modulação QPSK. O tipo de modulação é adaptado consoante as condições da ligação, melhorando a transmissão de dados, rentabilizando o uso de largura de banda. A Tabela 2.7, apresenta determinados valores de ritmo de transmissão para cada modulação e largura de banda do canal para a norma IEEE 802.16-2004.

Tabela 2.7 - Canais utilizados na norma IEEE 802.16-2004 [Roba08].

Largura de banda do canal [MHz]	Ritmo de transmissão [Mbps]		
	QPSK	16-QAM	64-QAM
3.5	3.3	6.5	9.8
5	4.6	9.3	13.9
7	6.5	13.1	19.6
10	9.3	18.7	18.0
20	18.7	37.5	52.6

Estes valores vêm definidos consoante o fabricante dos equipamentos, no equipamento utilizado nesta dissertação, esses valores são apresentados no Anexo A.

A modulação é o processo de translação da informação para uma frequência superior. A modulação digital pode ser feita através da fase, frequência, ou amplitude de uma portadora, ou utilizar uma combinação de ambas técnicas. Uma das técnicas mais comuns de modular uma portadora é BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), onde a informação é modulada alterando a fase de uma portadora-referência. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de uma forma de onda modulada pelo esquema de modulação BPSK. Cada *bit* corresponde a uma fase entre 0 graus ou uma fase turno de 180 graus. Neste exemplo, se uma fase sofre uma translação de 0 graus representa a codificação do *bit* "0", se sofre uma translação de 180 graus representa a codificação do *bit* "1",.

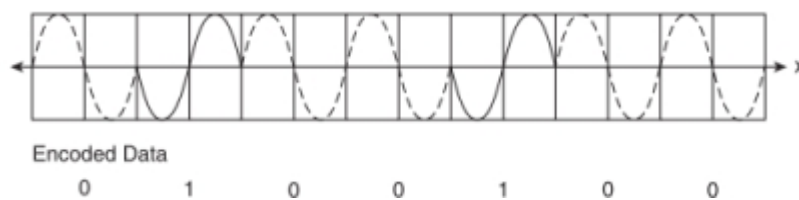


Figura 2.5 - Forma de onda BPSK [GaSW09].

Neste caso, é modulado apenas um *bit* de cada vez, mas no caso do esquema de modulação QPSK, já se usa quatro formas de onda possíveis, que permite incluir dois *bits* por símbolo, como exemplifica a Figura 2.6.

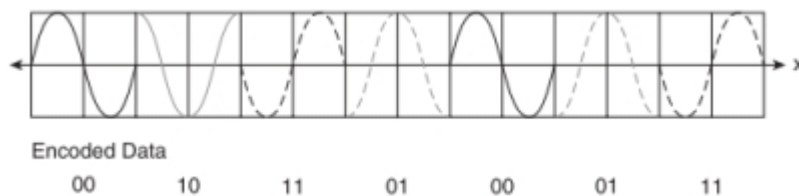


Figura 2.6 - Forma de onda QPSK [GaSW09].

Em esquemas de modulação de ordem superior, aumenta-se o número de *bits* por cada símbolo (em 16-QAM existem quatro *bits* e em 64-QAM seis *bits*), usando-se tanto a fase como a amplitude. Estas técnicas permitem mais informação a ser transmitida, embora tenha como desvantagem uma maior susceptibilidade ao ruído e interferência, aumentando a ocorrência de erros na recepção de dados.

Os esquemas de modulação podem ser representados através de diagramas de constelação, Figura 2.6, que representa a forma de onda modulada. A Figura 2.7 apresenta os diagramas das constelações das modulações utilizadas na norma IEEE 802.16-2004.

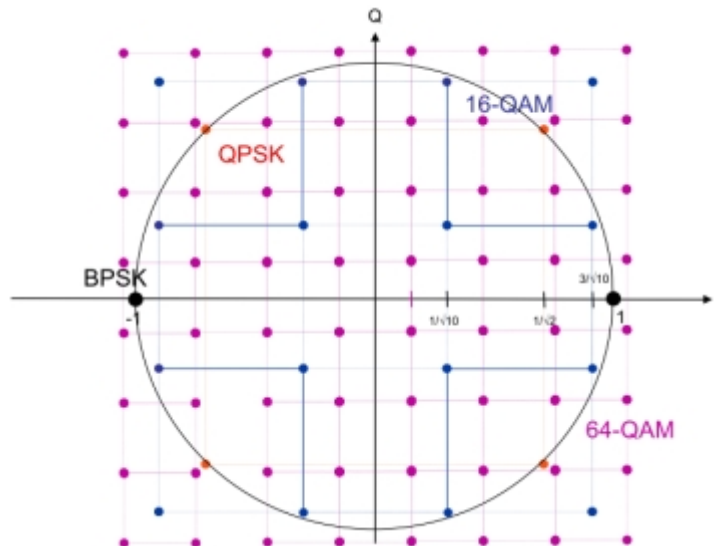


Figura 2.7 - Diagramas das constelações das modulações BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM.

O projecto da norma IEEE 802.16-2004 cobre as bandas de frequência licenciadas e não licenciadas. A norma oferece quatro especificações para a interface ar, definidas para garantir a interoperabilidade, as quais são mencionadas a seguir:

- o WirelessMAN-SCa - utiliza o formato de modulação de portadora única (*Single Carrier Modulation*).
- o WirelessMAN-OFDM - projectada para operação sem linha de vista em frequências abaixo de 11 GHz, utiliza a modulação OFDM, com uma transformada de 256 sub-portadoras. Além das funcionalidades especificadas na WirelessMAN-SCa, esta especificação suporta a topologia *mesh* e sub-canalização na ligação UL, que representam importantes ferramentas para a optimização da cobertura do sistema.
- o WirelessHUMAN - interface ar utilizada com bandas não licenciadas, sendo por isso denominada *High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network*. Especifica a operação nas faixas de 5 GHz e 6 GHz, utiliza DFS (*Dynamic Frequency Selection*) para detectar e evitar interferências. Nos outros aspectos é similar a interface ar WirelessMAN-OFDM.
- o WirelessMAN-OFDMA - suporta operação NLoS em frequências abaixo de 11 GHz e baseia-se no esquema de múltiplo acesso denominado OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Trata-se de uma extensão da técnica de modulação OFDM que permitir compartilhar o canal por múltiplos utilizadores. Para além das funcionalidades especificadas na WirelessMAN-SCa, suporta sub-canalização nas ligações UL e DL.

Em seguida, apresentam-se as Tabelas 2.8 e 2.9, com as principais características da camada PHY e um resumo das interfaces ar que compõem a especificação da camada PHY da norma

IEEE 802.16-2004, definindo a sua aplicação, opções adicionais e o mecanismo de *duplexing*, respectivamente.

Tabela 2.8 - Características da camada PHY da norma 802.16-2004.

Características	Benefícios
256'OFDM FFT	Construído para oferecer suporte ao endereçamento multi-percurso para LoS e NLoS (<i>outdoor</i>).
Modulação adaptativa e códigos para correcção de erro (por rajada)	Garante uma ligação RF robusta enquanto maximiza a taxa de transmissão (bits por segundo) para cada utilizador.
<i>Duplexing</i> TDD e FDD	Uma ou outra pode ser utilizada cobrindo um vasto conjunto de regulamentações vigentes em todo o mundo.
Canais com tamanhos flexíveis	Oferece a flexibilidade necessária para operar globalmente em diferentes bandas de frequência com requisições de canais variáveis.
Projectado para oferecer suporte a sistemas de antenas inteligentes	Antenas inteligentes (SA - <i>Smart Antennas</i>) estão a tornar-se cada vez mais acessíveis e como os custos têm reduzido, a sua capacidade para suprimir interferências e aumento no ganho do sistema as tornarão importantes para a expansão da BWA.

Tabela 2.9 - Características das interfaces ar da camada PHY da norma IEEE 802.16-2004.

Designação	Aplicação	Topologia	LoS/NLoS	Opções	Duplexing
WirelessMAN-SC	10 - 66 GHz(bandas licenciadas)	PtP	LoS	-	TDD FDD
WirelessMAN-SCa	2 - 11 GHz(bandas licenciadas)	PtP	NLoS	AAS, ARQ, STC	TDD FDD
WirelessMAN-OFDM	2 - 11 GHz(bandas licenciadas)	PtM	NLoS	AAS, ARQ, Mesh, STC	TDD FDD
WirelessHUMAN	2 - 11 GHz(bandas não licenciadas)	PtM	NLoS	AAS, ARQ, Mesh, STC	TDD
WirelessMAN-OFDMA	2 - 11 GHz(bandas licenciadas)	PtM	NLoS	AAS, ARQ, STC	TDD FDD

2.2.1.1 OFDM

Esta tecnologia baseia-se num método matemático denominado FFT (*Fast Fourier Transform*), que permite que vários canais acumulem grande parte da sua energia sem perder as suas características individuais (ortogonalidade), ou seja, sem interferirem entre si. A tecnologia OFDM fornece ao operador um meio eficiente para se ultrapassar os condicionalismos da propagação NLoS (permite a utilização de uma modulação apropriada para cada sub-canal) e condicionalismos provocados por multi-percurso. De facto, o OFDM permite que sistemas IEEE 802.16 operem com grandes espalhamentos temporais (*delay spread*) de sinal, típicos de ambientes NLoS onde tais sistemas serão implementados. Pelo facto de o OFDM ser composto de múltiplas portadoras de banda estreita (baixa taxa de transmissão, longo período), desvanecimento selectivo está localizado num subconjunto de portadores, fácil de equalizar. Interferência inter-simbólica é reduzida significativamente, pois a taxa completa de transmissão (portadora única) é dividida em taxas menores, com símbolos de maior duração.

Uma sequência de bits transmitida a uma taxa de R bits/s é multiplexada em N sub-canais, resultando na transmissão de R/N bits/s sobre cada sub-portadora. Essa estratégia tem como benefício imediato a possibilidade de utilização de equalizadores simplificados nos receptores. Uma vantagem importante é o aumento da eficácia na utilização de técnicas de codificação e correcção de erros, possibilitado pela transmissão a taxas reduzidas em cada sub-portadora.

As sub-portadoras disponíveis podem ser divididas em vários grupos designados sub-canais. A limitação da norma IEEE 802,16-2004 encontra-se no não suporte à sub-canalização em DL [VAHR09], apenas suportando, de uma forma condicionada em UL. A norma define 16 sub-canais, onde 1, 2, 4, 8, ou todos os conjuntos podem ser atribuídos a uma SS, no *uplink*. Isto tem como vantagem, as SS utilizarem menos largura de banda (na razão de 1/16) atribuída pela BS, o que poderá permitir ganhos em termos de cobertura e no tempo de vida útil bateria do dispositivo subscritor. Nota que uma razão de 1/16, no factor de sub-canalização proporciona um ganho de 12 dB no *link budget*.

A tecnologia OFDM é usada em:

- o WLAN, na norma IEEE 802.11a,b,g,n;
- o WMAN, em WiMAX (IEEE 802.16);
- o Sistemas de difusão (DVB-T, DVB-C, DVB-S);
- o xDSL e ADSL;
- o LTE.

2.2.1.2 OFDMA

A tecnologia OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) surge de uma melhoria da tecnologia OFDM para permitir acesso múltiplo, dividindo um sinal em vários sub-

canais, sendo cada um deles atribuído a um utilizador diferente. Os diferentes sub-canais podem então ser combinados a partir de várias portadoras e cada utilizador pode ser analisado independentemente da distância relativamente à BS, dos requisitos de potência e da interferência. Podem ser utilizadas várias modulações para cada uma das portadoras do sistema, para que este possa fornecer as melhores coberturas e débito binário. As estruturas de sub-canais possibilitam técnicas mais eficientes de transmissão, como o FDD e o TDD, sendo mais robusto no combate à interferência e capaz de suportar ritmos de transmissão elevados. A tecnologia OFDMA também possibilita o aumento do ganho de potência por canal, permitindo uma melhor cobertura, células com raio maior, a utilização de antenas e amplificadores de menor potência, reflectindo-se na redução dos custos de implementação do sistema.

2.2.2 Camada MAC

A camada MAC (*Medium Access Control*) do WiMAX assegura várias medidas de QoS (*Quality of Service*). O protocolo MAC do WiMAX foi projectado para aplicações de acesso a banda larga sem fios PtP. Com WiMAX, o acesso e os algoritmos de atribuição de largura de banda acomodam centenas de terminais por canal e múltiplos utilizadores finais podem repartir esses terminais. Os utilizadores finais querem cada vez mais serviços de mais variada natureza, desde dados e voz, Ethernet, conectividade IP e VoIP (*Voice over IP*). Para sustentar estes serviços, a camada MAC adopta tanto tráfego em rajada como contínuo. As sub-camadas de convergência mapeiam o tráfego específico da camada de transporte para a camada MAC; isto é suficientemente flexível para transportar qualquer tipo de tráfego. O protocolo MAC da norma IEEE 802.16 atende à necessidade de se ter ritmos de transmissão elevados, tanto para o sentido ascendente como para o sentido descendente da ligação. A camada MAC IEEE 802.16 oferece vários tipos de serviço e suporte às várias especificações da camada física.

No que toca à eficiência do mecanismo de transporte de dados, este é regulado no interface entre a camada MAC e a camada física, a camada MAC regista os pacotes de informação das camadas superiores (MSDUs, acrónimo de *MAC Service Data Units*) e organiza-os em MPDUs (acrónimo de *MAC Protocol Data Unit*) para que sejam transmitidos [IEEE09].

A camada MAC é responsável pela atribuição da largura de banda a cada utilizador (SS), tanto em *downlink* quer em *uplink*, um utilizador apenas tem algum controlo da largura de banda quando tem múltiplas sessões ou conexões com a BS, sendo que quando isto acontece a BS atribui a esse SS uma determinada largura de banda e cada SS distribui-a pelas conexões. Todo o restante trabalho de sincronização é feito pela BS, no caso do *downlink* a BS atribui largura de banda a cada SS, baseando-se na classe de serviço pretendida pela SS, em caso de *uplink* a largura de banda é atribuída segundo os requisitos feitos por cada SS. Em função da qualidade do serviço, nomeadamente QoS, e parâmetros de tráfego associada a um

serviço, uma ou mais desses mecanismos podem ser utilizadas pela SS (a BS aloja largura de banda destinada a esses requisitos por parte das SS).

Para além das tarefas básicas de atribuição de largura de banda e transporte de dados, a camada MAC inclui uma sub-camada de privacidade que oferece autenticação ao acesso à rede e ao estabelecimento da ligação para evitar a perda de serviços, inclui ainda troca de chaves de segurança e encriptação para assegurar a privacidade dos dados. Para acomodar a procura da camada física e a diferentes requisitos de serviços oferecidos, entre as frequências de 2-11 GHz, o projecto IEEE 802.16-2004 actualizou a camada MAC de modo a oferecer um mecanismo de requisição de repetição automática, ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) e de suporte à topologia *mesh*. Esta característica permite uma variedade de percursos entre o núcleo da rede e qualquer SS. A Tabela 2.10, apresenta uma associação entre as principais características da camada MAC do protocolo IEEE 802.16-2004 de forma resumida, assim como, os benefícios introduzidos por essas características.

Tabela 2.10 - Características da camada MAC da norma IEEE 802.16-2004.

Características	Benefícios
Escalonamento TDM/TDMA para UL/DL	Utilização eficiente da largura de banda
Escalável para centenas de utilizadores	Possibilita uma distribuição efectiva de custos oferecendo suporte aos utilizadores de modo a oferecer ao mercado um caso de negócio robusto
Orientado à ligação	Garante QoS por ligação e encaminhamento de pacotes mais rápido
QoS	Baixa latência para serviços sensíveis ao atraso (voz TDM, VoIP)
Oferece suporte às classes: UGS, rtPS, nrtPS e BE	Transporte de dados optimizado para o tráfego VBR e hierarquização de dados
Requisição de retransmissão automática, ARQ	Melhora o desempenho extremo-a-extremo ocultando os erros induzidos pela camada RF dos protocolos das camadas superiores
Modulação adaptativa	Permite taxas de dados mais elevadas de acordo com as condições do canal, o que melhora a capacidade do sistema
Segurança e criptografia	Protege a privacidade do utilizador
Largura de banda sob procura	Atribuição de capacidade por trama
Controlo de potência automático	Garante a melhor relação portadora-ruído através de ajustes no sinal transmitido.

2.2.2.1 QoS na Norma IEEE 802.16

Na especificação interface ar da norma IEEE 802.16 a definição de QoS está associada a conceitos como a classificação, o escalonamento em fluxos de serviço e o estabelecimento de serviço considerando as classes de serviço UGS, rtPS, nrtPS e BE.

Segundo a norma, os pedidos de QoS incluem as seguintes funções:

- o Função de configuração e registo para pré-configuração da SS com base nos fluxos de serviço com QoS e parâmetros de tráfego;
- o Função de sinalização para o estabelecimento dinâmico de fluxos de serviço com QoS e parâmetros de tráfego;
- o Utilização de escalonamento de pacotes na camada MAC e parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do UL;
- o Utilização de parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do DL;
- o Agrupamento das propriedades de um fluxo de serviço em classes de serviço, de modo que as entidades das camadas superiores e as aplicações externas requisitem os fluxos de serviço de acordo com os parâmetros de QoS desejados, garantindo uma consistência global.

2.2.2.2 Fluxos de Serviço

Um Fluxo de Serviço é um serviço de transporte da camada MAC responsável pela transmissão unidireccional dos pacotes provenientes da SS (*uplink*) ou da BS (*downlink*). Um fluxo de serviço é caracterizado por um conjunto de parâmetros de QoS tais como a latência, o atraso e as garantias de débito binário. Com o propósito de normalizar a operação entre a SS e a BS, esses parâmetros incluem detalhes de como a SS solicita *mini-slots* para UL e o comportamento esperado do escalonador de UL da BS.

Os fluxos de serviço são parcialmente caracterizados pelos seguintes atributos:

- o Identificador do Fluxo de Serviço, SFID - um SFID é assinalado para todos os fluxos de serviço existentes e serve como o principal identificador na SS e na BS para certo fluxo. Um fluxo de serviço tem no mínimo um SFID e um sentido associado;
- o Identificador da ligação, CID - o mapeamento para um SFID é somente realizado quando a ligação tem o(s) seu(s) fluxo(s) de serviço admitido(s);
- o *Provisioned QoS Parameter Set* - um conjunto de parâmetros de QoS fornecido por mecanismos externos aos definidos na norma IEEE 802.16 como, por exemplo, pelo sistema de gestão da rede;
- o *Admitted QoS Parameter Set* - define um conjunto de parâmetros de QoS para os quais a BS (e possivelmente a SS) reserva recursos. O principal recurso reservado é a largura de banda, mas outros recursos também podem ser reservados por exemplo, memória para viabilizar a activação do fluxo;

- *Active QoS Parameter Set* - especifica um conjunto de parâmetros de QoS que define o serviço a ser actualmente disponibilizado para o fluxo de serviço. Somente um fluxo de serviço activo pode encaminhar pacotes.
- *Authorization Module* - uma função lógica dentro da BS que aprova ou rejeita cada mudança nos parâmetros de QoS e classificadores associados a um fluxo de serviço. Para tal, define um "envelope" que limita os possíveis valores dos conjuntos de parâmetros *AdmittedQoSParamSet* e *ActiveQoSParamSet*.

É importante pensar em três tipos de fluxos de serviço:

- Aprovisionado - conhecido pelo fornecimento, por exemplo, do sistema de gestão da rede. Os conjuntos de parâmetros *Admitted QoS Parameter Set* e *Active QoS Parameter Set* para este tipo de fluxo são ambos nulos;
- Admitido - este tipo de fluxo de serviço possui recursos reservados pela BS para o seu conjunto de parâmetros *Admitted QoS Parameter Set*, mas esses parâmetros não estão activos (o *Active QoS Parameter Set* é nulo). Os fluxos de serviço admitidos podem ter sido provisionado ou sinalizado por algum outro mecanismo;
- Activo - este tipo de fluxo de serviço apresenta recursos comprometidos pela BS para o seu conjunto de parâmetros *Active QoS Parameter Set*. Por exemplo, a BS pode estar a enviar mapas contendo concessões não solicitadas para a transmissão de um fluxo de serviço UGS (*Unsolicited Grant Service*). O conjunto de parâmetros *Active QoS Parameter Set* deste fluxo não é nulo.

2.2.2.3 Classes de Serviço do WiMAX

O WiMAX define cinco classes de serviço, as quais devem ser tratadas de forma diferenciada pelo mecanismo de escalonamento da camada MAC. As classes de serviço do WiMAX são:

- UGS (*Unsolicited Grant Service*), é designado para suporte de transmissão de dados em tempo real. Consiste em pacotes de dados de tamanho fixo, enviados em intervalos periódicos, tais como os sinais E1 e VoIP.
- rtPS (*Real-Time Polling Service*), é designado para suporte de transmissão de dados em tempo real. Consiste em pacotes de dados de tamanho variável que são enviados em intervalos periódicos, tais como ficheiros *Motion Picture Experts Group* (MPEG) de vídeo.
- nrtPS (*Non Real-time Polling Service*), é designado para suporte de transmissão de dados que suportam atrasos. Consiste em pacotes de dados de tamanho variável para o qual é requerido um débito binário mínimo, tal como ligações *File Transfer Protocol* (FTP).

- o BE (*Best Effort*), é designado para suporte de transmissão de dados para os quais não é requerido um nível de serviço mínimo, podendo ser tratado numa base de espaço disponível.
- o ertPS (*Extended real-time Polling Service*), foi projectada para suportar aplicações em tempo real, como VoIP com supressão de silêncio, que tem uma taxa de dados variável, porém requerem taxas de dados e atraso garantidos. Esta classe de serviço está somente definida na norma IEEE 802.16e, e não na norma IEEE 802.16-2004.

A Tabela 2.11, apresenta as classes de serviço de forma resumida, assim como os parâmetros de QoS e exemplos de aplicação.

Tabela 2.11 - Classes de serviço suportadas no WiMAX [WiFo05], [AnGM07].

Classe de Serviços	Parâmetros de QoS	Exemplos de Aplicação
UGS (<i>Unsolicited Grant Service</i>)	Taxa máxima sustentada Tolerância máxima à latência Tolerância a <i>Jitter</i>	VoIP sem supressão de silêncio
rtPS (<i>Real-Time Polling Service</i>)	Taxa mínima reservada Taxa máxima sustentada Tolerância máxima à latência Prioridade de tráfego	<i>Streaming</i> áudio e vídeo, MPEG (<i>Motion Picture Experts Group</i>) <i>encoded</i>
nrtPS (<i>Non Real-Time Polling Service</i>)	Taxa mínima reservada Taxa máxima sustentada Prioridade de tráfego	FTP (<i>File Transfer Protocol</i>)
BE (<i>Best Effort</i>)	Taxa máxima sustentada Prioridade de tráfego	<i>Web browsing</i> , Transferência de dados
ErtPS (<i>Extended real-time Polling service</i>)	Taxa mínima reservada Taxa máxima sustentada Tolerância máxima à latência Tolerância a <i>Jitter</i> Prioridade de tráfego	VoIP com supressão de silêncio

2.3 Propagação NLoS vs Propagação LoS

A tecnologia WiMAX oferece um avanço em termos de cobertura tanto em condições de LoS ou NLoS, garante grandes distâncias de cobertura (até 50 km) em condições LoS, e uma célula de raio típico de 8 km, sob condições de NLoS [WiFo04]. O canal de rádio de um sistema de comunicação sem fios é descrito como sendo LoS ou NLoS. Numa ligação LoS, o sinal de rádio é transmitido sobre um caminho directo e desobstruído entre emissor e o receptor. Uma ligação LoS requer que o primeiro elipsóide de *Fresnel*, que é uma linha

imaginária entre o emissor e o receptor, esteja totalmente livre sem nenhum tipo de obstrução, Figura 2.8. Deste modo, a abertura do primeiro elipsóide de *Fresnel*, que depende da frequência de operação e das distâncias para os obstáculos, impõe um limite mínimo à altura da antena emissora. A operação em frequências abaixo de 11 GHz implica a transmissão em ligações de radiofrequência com comprimentos de onda suficientemente longos para tornar desnecessária a condição de linha de vista directa para a operação. Adicionalmente, a recepção de sinais em multi-percurso é possível nessa banda de frequências, o que pode ser aproveitado para aumentar ainda mais o desempenho na recepção.

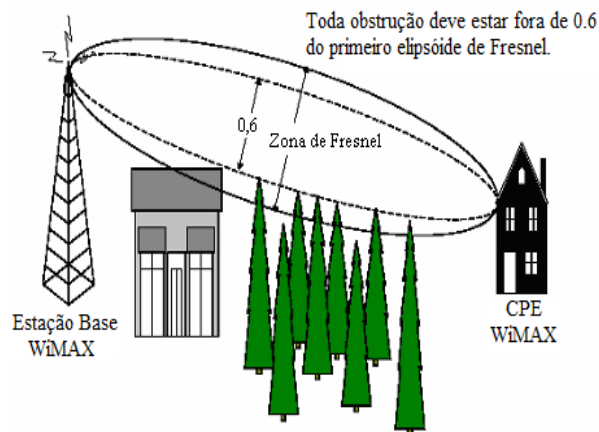


Figura 2.8 - Zona de Fresnel (LoS) [WiFo04].

Na Figura 2.8, o campo dentro da elipse é chamado de primeiro elipsóide de *Fresnel*. Quanto mais limpo de obstruções o primeiro elipsóide de *Fresnel*, melhor será o sinal. A obstrução do primeiro elipsóide de *Fresnel*, como no caso da existência de vegetação, pode prejudicar o sinal. Um corte na zona de *Fresnel* de até 20% permite o tráfego aceitável, mas se o primeiro elipsóide de *Fresnel* for comprometida com mais de 20%, o sinal fica mais fraco não permitindo uma comunicação eficiente entre o emissor e o receptor.

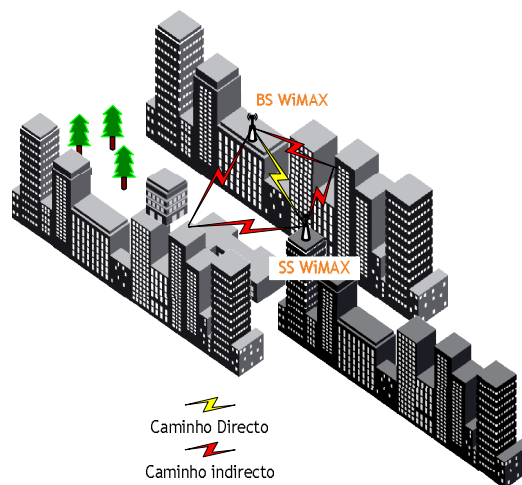


Figura 2.9 - Propagação NLoS.

Numa ligação NLoS, Figura 2.9, o sinal localiza o receptor através de reflexões, difusão e difracção. Os sinais que chegam aos receptores consistem em componentes do caminho directo, reflexão múltipla de caminhos, energia difundida e caminhos diferentes de propagação. Estes sinais diferem expansões de atrasos, atenuação, polarizações e estabilidade relativa para o caminho directo.

De entre as várias vantagens deste tipo de ligação destacam-se, os requisitos de planeamento e as restrições à altura das antenas, que frequentemente não permitem uma ligação LoS, e os custos de instalação.

A tecnologia NLoS e as características próprias do WiMAX tornam possível o uso *indoor* da CPE (embora seja mais utilizado *outdoor*). Daqui surge dois desafios principais: ultrapassar as perdas devido à penetração em edifícios e cobrir distâncias razoáveis com as potências de transmissão mais baixas possíveis e ganhos nas antenas que estão associados normalmente a CPE's interiores. A tecnologia WiMAX resolve, ou atenua, alguns destes problemas resultantes das condições NLoS através de:

- o Tecnologia OFDM, OFDMA e SOFDMA;
- o Sub-canalização;
- o Antenas direccionais;
- o Diversidade na transmissão e recepção;
- o Modulação adaptativa;
- o Técnicas de correcção de erros;
- o Controlo de potência.

Nos subcapítulos seguintes serão explicados sucintamente cada um dos mecanismos de atenuação às condições de NLoS, com excepção da tecnologia OFDM, OFDMA e os aspectos da modulação adaptativa e de sub-canalização que já foram abordados em pontos anteriores.

2.3.1 SOFDMA

Esta tecnologia adiciona uma vantagem ao OFDMA, permite escalar o tamanho da FFT conforme a largura de banda do canal, para manter o espaçamento entre portadoras constante, mesmo em canais de diferentes larguras de banda. Este espaçamento constante resulta numa melhor eficácia espectral em canais mais largos e numa redução de custos em canais mais estreitos.

2.3.2 Sub-Canalização

Um problema bastante comum em redes sem fios baseadas em topologia ponto-multiponto é o desequilíbrio de cobertura entre as ligações DL e UL. De facto, em vários cenários práticos, as estações subscritoras sofrem restrições quanto ao consumo da potência e à potência máxima de transmissão, resultando numa tendência natural para que a cobertura

seja limitada pelo UL. Para minimizar o problema do desequilíbrio de cobertura entre as ligações, a norma IEEE 802.16-2004 adopta a técnica de sub-canalização, que consiste num cenário hipotético onde a potência máxima de transmissão da SS corresponde a 25% da potência máxima da BS.

Para compensar este desequilíbrio, é adoptada a técnica de sub-canalização, de modo que a informação é transmitida em apenas 25% das sub-portadoras disponíveis, o que permite elevar a potência efectiva num factor quatro vezes nas sub-portadoras seleccionadas. Como consequência, do aumento da cobertura por meio da sub-canalização é a redução no débito binário máxima suportada pela ligação.

O WiMAX fixo baseado em OFDM-PHY permite, como descrito no subcapítulo 2.2.1.1, uma forma limitada de sub-canalização no sentido ascendente, a norma define 16 sub-canais, onde 1, 2, 4, 8 ou todos os conjuntos podem ser nomeados para uma estação subscritora, no sentido ascendente. A sub-canalização no UL no WiMAX fixo permite a estação subscritora transmitir utilizando só uma fracção, tão baixo quanto 1/16 da largura da banda atribuída isto através da estação base que fornece melhorias no *link budget* que podem ser utilizadas para aumentar a gama de desempenho e/ou melhoram o tempo de vida da bateria das estações subscritoras. Um factor de 1/16 de sub-canalização fornece um aumento de 12 dB ao *link budget*. Porém, WiMAX móvel baseado em OFDMA-PHY permite a sub-canalização em ambos sentidos ascendente, UL e o descendente, DL, e aqui, os sub-canais formam uma unidade de recurso de frequência mínima atribuída pela estação base. Então, sub-canais diferentes podem ser atribuídos a diferentes utilizadores como um mecanismo de acesso múltiplo. Este tipo de esquema de acesso múltiplo é chamado de OFDMA.

2.3.3 Técnicas de correcção de erros

O WiMAX incorpora técnicas de correcção de erros de modo a reduzir os requisitos do sistema em relação ao SNR. Codificação convolucional, SRS FEC (*Strong Reed Solomon Forward Error Correction*) e algoritmos de intercalação são exemplos de técnicas associadas à detecção e correcção de erros, melhorando a qualidade do sinal recebido. Estas técnicas facilitam a recuperação de tramas com erros que podem ter sido perdidas devido a desvanecimento selectivo ou erros de *burst*. O ARQ (*Automatic Repeat Request*) é utilizado para corrigir erros que não podem ser corrigidos através do FEC, fazendo com que a informação errada seja reenviada. Isto, melhora substancialmente o desempenho em termos de BER³ (*Bit Error Rate*).

³ BER, é a taxa de erro de bits, é a relação entre o número de bits com erro e o total de bits enviados numa transmissão durante um intervalo de tempo.

2.3.4 Controlo de Potência

Os algoritmos de controlo de potência são utilizados para melhorar o desempenho do sistema em geral, sendo implementados nas BS's, enviando informações de controlo de potência para cada SS, que regula o nível de potência de transmissão para que o nível de potência recebido na BS esteja a um nível pré-determinado. Num ambiente em que o desvanecimento se altera dinamicamente, este nível de desempenho pré-determinado, significa que a SS transmite apenas a potência necessária para que a potência recebida esteja dentro dos requisitos exigidos pela BS. Sem este desempenho significaria que a SS transmitiria sempre supondo o pior caso possível. O controlo de potência reduz o consumo de potência da CPE e a potencial interferência com outras BS's próximas. Para LoS, a potência de transmissão da SS é aproximadamente proporcional à distância da BS, enquanto para NLoS é muito dependente das possíveis obstruções existentes.

2.4 Topologias de Rede

A topologia de rede descreve o modo como todos os dispositivos estão ligados entre si, bem como se processa a troca de informação entre eles. Garantindo a redução de custos e aumento da eficiência do sistema através da combinação de recursos outrora dispersos.

A escolha da topologia mais adequada a um determinado sistema é feita através da análise dos seus objectivos e necessidades.

A norma IEEE 802.16-2004 possui como vantagem a possibilidade de comunicação de utilizador para utilizador num ambiente sem linha de vista directa, NLoS. A norma IEEE 802.16-2004 foi projectada para suportar vários tipos de topologia de redes. As topologia mais populares são a ponto-a-ponto, a ponto-multiponto e a topologia *mesh*. Os tipos de topologia de rede podem ser caracterizados em quatro tipo:

- Ponto-a-Ponto;
- Ponto-Multiponto;
- NLoS Ponto-Multiponto;
- *Mesh*.

Neste estudo, utilizamos equipamentos NLoS devido à dificuldade de se estabelecerem ligações com linha de vista, tanto em virtude da pouca altura das construções existentes na cidade da Covilhã, como em virtude da muita vegetação que compõe grandes pontos da região.

2.4.1 Topologia Ponto-a-Ponto

Na topologia PtP (Ponto-a-ponto), Figura 2.10, como o próprio nome o diz, trata-se de uma ligação entre dois pontos distintos, sendo utilizadas duas antenas que garantem a ligação. A topologia PtP atende isoladamente a um único utilizador interligado, por exemplo para servir uma solução de *last mile* para servir utilizadores a partir de um ponto de acesso de uma rede multi-serviços. Esta topologia é menos escalável, visto que, há pouca facilidade de adição de novos nós na rede. Existe, no entanto, uma maior largura de banda nesta solução.

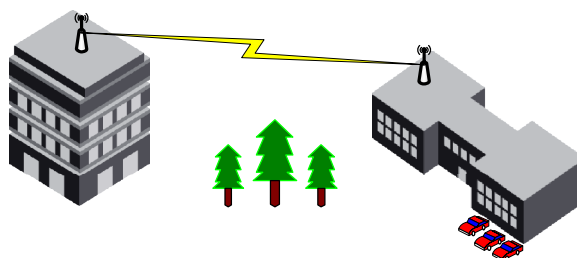


Figura 2.10 - Topologia PtP.

2.4.2 Topologia Ponto-Multiponto

Na topologia PtM (Ponto-Multiponto), Figura 2.11, a rede desenvolvida permite suportar vários utilizadores, limitando ao mínimo o número de *routers*, *switches* e outros equipamentos que são necessários para o funcionamento de uma rede cablada.

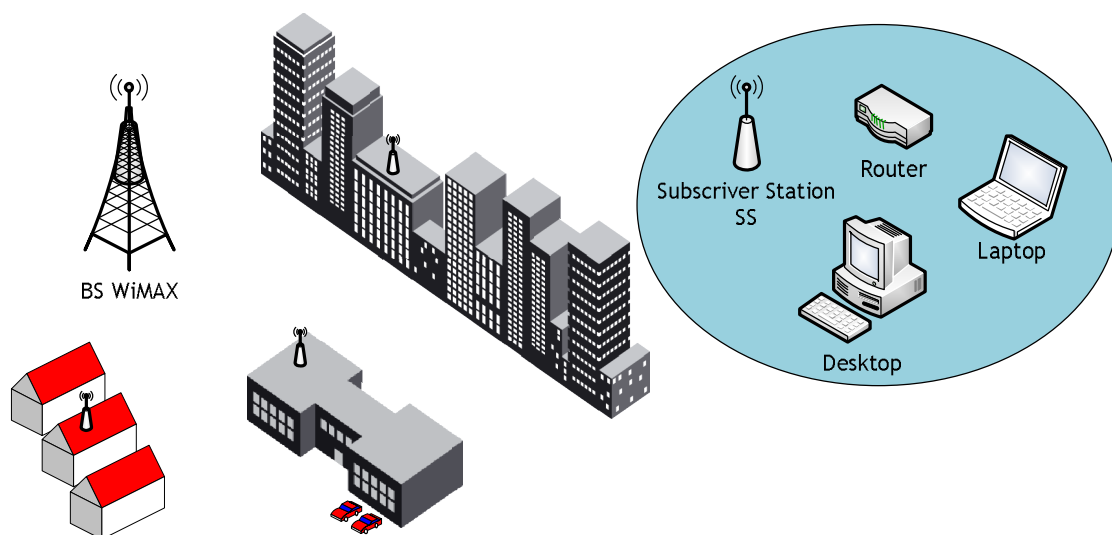


Figura 2.11 - Topologia PtM.

Na topologia PtM, servem-se vários utilizadores simultaneamente a partir de uma estação base, posicionada estrategicamente. Esta estação base cobre uma área aonde será oferecido

o serviço aos utilizadores, reduzindo os custos e oferecendo uma maior facilidade no caso de adição de nós (utilizadores ou CPE's), mas com menor largura de banda. São formadas células que podem utilizar antenas do tipo omnidireccional (360°) ou sectorial. O ângulo de abrangência da antena sectorial pode ser de 30°, 60°, 90° ou 120°, dependendo da área de cobertura. Estas células podem ser configuradas para trabalhar com várias antenas posicionadas sequencialmente formando sectores consecutivos e proporcionando uma grande área de cobertura do sinal.

As antenas omnidireccionais apresentam uma maior facilidade de utilização, isto porque elas não precisam de ser direccionadas uma com as outras, o que ocorre com as antenas sectoriais. Estas antenas são utilizadas tanto nas estações base emisoras como nas receptoras. O seu funcionamento não permite ligações com alcance elevado, podendo no entanto ser instalados amplificadores externos para aumentar a sua capacidade de ligação. No DL todas as estações subscritoras que estão num determinado sector e utilizam um dado canal de frequência recebem a mesma transmissão, ou parte dela. A estação base é o único emissor a operar neste sentido e, portanto, não necessita de coordenação com outras estações excepto no caso TDD, onde o tempo é dividido em períodos para transmissão no UL e períodos para transmissão no DL.

A estação base realiza uma difusão para todas as estações subscritoras de um sector e estas estações verificam o endereço de destino nas mensagens recebidas e processam somente as mensagens destinadas a elas. As mensagens podem ser enviadas para todos os utilizadores por difusão (*broadcast*) mas também podem ser enviadas individualmente ou para grupos de estações subscritoras (*multicast*).

No outro sentido, as estações subscritoras compartilham o UL conforme a procura. Dependendo da classe de serviço utilizada, a estação subscritora pode ter o direito de transmitir continuamente ou o seu direito para transmitir pode ser dado pela estação base após receber uma requisição do utilizador. Dentro de cada sector, os utilizadores aderem a um protocolo de transmissão que controla a contenção entre utilizadores e habilita o serviço a ser emitido adaptado aos requisitos de atraso e largura de banda de cada aplicação do utilizador.

2.4.3 Topologia *Mesh*

A topologia *mesh* é muito semelhante com à topologia PtM, mas existe uma diferença entre as duas. A diferença está no modo de operação entre as duas topologias. Enquanto na tecnologia PtM o tráfego ocorre entre a estação base e os utilizadores e vice-versa, na topologia *mesh* o tráfego pode ser encaminhado através de outros utilizadores como também pode ocorrer directamente entre utilizadores, onde cada utilizador funciona como uma estação ou nó repetidor.

Com esta capacidade de comunicação por nós, cria-se uma rede com vários caminhos alternativos, evitando-se assim os pontos de congestionamento, aprimorando ainda mais o desempenho da rede com a adição de novos utilizadores. A Figura 2.12 apresenta o funcionamento da topologia *mesh*. A topologia *mesh* oferece redundância e maior fiabilidade, mas é a topologia mais cara de se construir porque cada nó ou utilizador da rede requer um *router*.

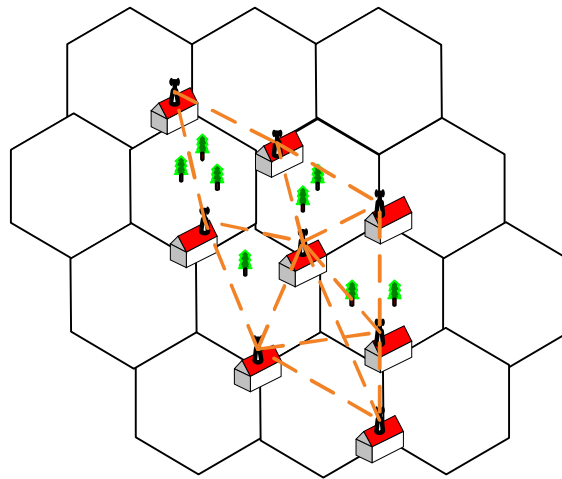


Figura 2.12 - Topologia *mesh*.

Na topologia *mesh* existem três termos importantes: os vizinhos, a vizinhança e a vizinhança estendida. As estações com as quais o nó possui ligações directas recebem a denominação de “vizinhos”. Os vizinhos de um nó formam a “vizinhança”. Os vizinhos de um nó são aqueles distantes de um salto (uma ligação) do nó. A “vizinhança estendida” contém, adicionalmente, todos os vizinhos da vizinhança.

Utilizando o planeamento distribuído, todos os nós, incluindo a estação base *mesh*, coordenarão as suas transmissões com os nós até dois saltos na vizinhança (vizinhos dos vizinhos) e realizarão a difusão do seu planeamento (recursos disponíveis, solicitações e concessões) para todos os vizinhos. Opcionalmente, o planeamento pode ser estabelecido por requisições e por concessões directas, não coordenadas entre dois nós. Os nós, irão certificar-se de que a transmissão resultante não causará colisões com o tráfego programado de dados e de controlo de nenhum outro nó até dois saltos na vizinhança. Não há diferença no mecanismo utilizado para determinação do planeamento no DL e no UL.

Utilizando o planeamento centralizado, os recursos são concedidos de uma maneira centralizada. Uma estação base *mesh* reunirá solicitações de recursos de todas as estações subscritoras *mesh* dentro de um certo alcance, determinará a quantidade de recursos concedidos para cada ligação na rede, tanto no DL quanto UL, e comunicará às estações subscritoras *mesh* na sua área de alcance. As mensagens de concessão não contêm o

planeamento real mas cada nó deve calculá-lo utilizando o algoritmo pré-determinado com os parâmetros dados.

Os sistemas com a topologia *mesh* utilizam tipicamente antenas omnidireccionais, mas podem também utilizar antenas sectoriais. No limite da área de cobertura de uma rede *mesh*, onde somente é necessária uma ligação para um único ponto, podem-se utilizar até mesmo antenas altamente direccionais.

2.5 Tipos de Antenas

As antenas utilizadas em redes sem fios, são classificados em direccionais e omnidireccionais. As antenas direccionais são antenas que focalizam o sinal em uma direcção específica, enviando o sinal a uma certa zona de cobertura, a um ângulo determinado, fazendo com que estas antenas tenham um grande alcance. Estas antenas são utilizadas para se alcançarem longas distâncias, tais como de edifício para edifício. As antenas direccionais são conhecidas como:

- o Sectoriais: são antenas projectadas para dividir a área de cobertura circular em sectores, com o ângulo de abrangência que podem ser de 30°, 60°, 90° ou 120°, a fim de se facilitar a atribuição e a reutilização. Geralmente, as antenas sectoriais são utilizadas em topologia PMP.
- o Parabólicas: são antenas utilizadas principalmente em transmissões via satélite.

As antenas omnidireccionais enviam sinais em todas as direcções, 360°, sendo possível estabelecer comunicação independentemente do ponto em que se encontra. Em contrapartida, o alcance destas antenas é menor em relação às antenas direccionais.

Geralmente as antenas omnidireccionais são utilizadas em redes onde a mobilidade é requerida, no caso de comunicações móveis em redes sem fios locais a norma IEEE 802.11. Os sistemas com a topologia *mesh* utilizam antenas omnidireccionais, mas também podem utilizar as antenas sectoriais.

2.5.1 Tecnologias SISO e MIMO

O sistema de antenas SISO (*Single Input Single Output*) é utilizado quando se deseja fazer uma simples ligação entre a antena receptora e a antena emissora. Esta configuração utiliza uma antena de cada lado, podendo-se transmitir e receber o sinal mutuamente. As transmissões de TV e rádio utilizam esse sistema para comunicação. A Figura 2.13 apresenta uma emissão/recepção de dados utilizando uma antena de configuração SISO.

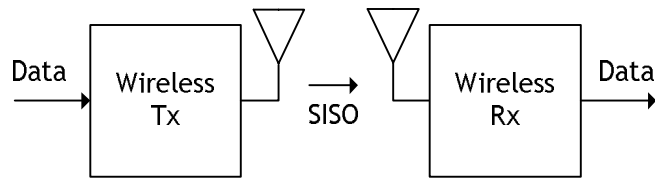


Figura 2.13 - SISO, transmissão e recepção de dados.

As antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) são utilizadas em larga escala nos sistemas WiMAX, Figura 2.14. Este tipo de antena caracteriza-se pelo facto de conseguir transmitir e receber sinais de diferentes antenas em ambos os lados da comunicação ou seja as antenas basicamente tem de “pensar”, e conseguir encontrar a melhor forma de transmitir ou receber o sinal. A utilização do MIMO também realça o débito binário aumentando o número de caminhos possíveis para o sinal. Cada antena poderá transmitir diferentes dados que poderão ser depois decodificados no receptor.

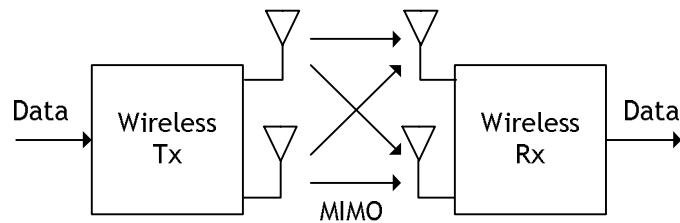


Figura 2.14 - MIMO, transmissão e recepção de dados.

Devido à necessidade de antenas que consigam trabalhar com múltiplos sinais, foi desenvolvido um tipo de antena denominada Antenas Inteligentes (*Smart Antenna*) ou ainda AAS (*Adaptive Antenna Systems*).

2.5.3 Tecnologia de Antenas Adaptativas

A AAS (*Adaptive Antenna System*) é uma tecnologia importante na norma IEEE 802.16-2004. As estações base equipadas com AAS podem criar feixes que podem ser dirigidos focando a transmissão do sinal conseguindo um grande sinal em escala. Quando está a receber ela pode focar somente na direcção do receptor. Isto ajuda a eliminar interferências de outros sinais, evitando os sinais parasitas.

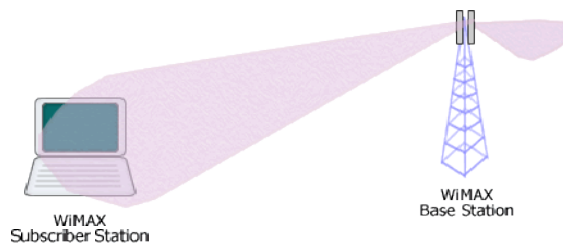


Figura 2.15 - Exemplo de BS com capacidade AAS [Conn10].

Segundo [Ande03] esta tecnologia é distinguida por três tipos:

- o Troca de Feixes (*Switched Beam*), esta é a forma mais simples de implementação de uma antena adaptativa. Num conjunto de antenas disponíveis em cada sector, cada uma com a radiação fixa, escolhe qual a melhor antena, mediante a localização da estação terminal, que assegure melhor potência de sinal.
- o Direcção de Feixe (*Beam Steering*), este tipo de AAS tem a capacidade de direccionar o feixe à estação terminal de forma a maximizar o ganho.
- o Combinação óptima da relação $S/(I+N)$ (*Optimum Combining*), é o tipo de AAS mais complexo de implementar. Utiliza um filtro espacial para ajustar a antena de forma adaptativa através do *feedback* periódico recebido do terminal. Este filtro espacial linear tem a vantagem de suprimir o ruído e a interferência.

2.6 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo foi apresentada uma abordagem inicial e resumida da norma IEEE 802.16 (WiMAX) e dos seus conceitos básicos, para o acesso de banda larga sem fios. A evolução das sub-famílias que a constituem ficou também ilustrada, assim como, as suas principais características. Enquadrou-se a norma em função das suas características. As características do WiMAX são compatíveis com a actual procura de banda larga, o que permite desenvolver sistemas de banda larga sem fios com interoperabilidade, permitindo maior flexibilidade de acesso. Descreveram-se as camadas PHY e MAC, com base nas normas IEEE 802.16 (norma base) e IEEE 802.16-2004. Foram descritas várias características e funções da camada MAC, como ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), o mecanismo de requisição de largura banda, controlo de QoS (*Quality of Service*) e fluxos e classes de serviço. O Capítulo aborda ainda a tecnologia OFDM e OFDMA e sub-canalização. Foram abordados aspectos gerais da qualidade de serviço, em redes de banda larga sem fios. Abordaram-se também as cinco classes de serviços do WiMAX, pode verificar-se que a norma permite a transmissão de dados sem fios em banda larga atendendo às necessidades crescentes de aplicações de voz, dados e vídeo, e oferecendo qualidade de serviço. O WiMAX suporta algoritmos de escalonamento de pacotes que oferecem garantias de qualidade nas cinco classes de serviço.

Caracterizou-se camada PHY do WiMAX salientando-se os seguintes pontos:

- o A camada PHY permite dois modos de atribuição de largura de banda o TDD (*Time Division Duplex*) e FDD (*Frequency Division Duplex*), *half-duplex* e *full-duplex*;
- o Os tipos de modulação suportados e a possibilidade de um esquema de modulação adaptativa, consoante o valor da relação portadora-ruído, SNR;
- o O canal descendente, utiliza TDM (*Time Division Multiplexing*) e o canal ascendente utiliza TDMA (*Time Division Multiple Access*);

A camada PHY minimiza os efeitos da propagação multi-percurso com a OFDM, e adequa o esquema de modulação à qualidade da ligação rádio através da modulação adaptativa.

Apresentou-se o OFDMA como uma técnica de acesso múltiplo, baseada na sub-canalização, que prevê operações de fluxos de diversos utilizadores nos canais descendentes e ascendentes da ligação. O WiMAX adopta esta técnica de sub-canalização para minimizar o problema de desequilíbrio de cobertura entre as ligações. O WiMAX "fixo" baseado em OFDM-PHY que apenas permite uma forma limitada de sub-canalização no UL.

Apresentaram-se as topologias de rede utilizadas em redes WiMAX, avaliando-se qual a topologia que mais se adapta a uma determinada implementação. Conclui-se que a topologia PtP é menos escalável, devido a dificuldade de adição de novos nós na rede, tem uma largura de banda superior. A topologia PtM envolve custos reduzidos e tem maior facilidade de adição de novos nós na rede, mas com menor largura de banda. Por último, a topologia *mesh* oferece redundância e maior fiabilidade, mas é a solução mais cara de se construir. Referiram-se também os tipos de antenas utilizados na norma WiMAX e tecnologias SISO, MIMO e AAS.

Capítulo 3

Modelos de Propagação

Para qualquer dimensionamento de um sistema de comunicações sem fios é importante fazer a escolha apropriada do modelo de propagação a usar, pois oferecerá uma estimativa do sinal recebido em determinado ponto de receção, verificando-se, assim a cobertura da rede. Neste Capítulo abordam-se modelos de propagação, consoante o tipo de cenário e suas limitações. O Anexo D apresenta conceitos básicos de propagação.

3.1 Introdução

No Anexo D, refere-se que um sinal transmitido num meio aéreo pode sofrer atenuações de diversos fenómenos. Por isso, a estimação da atenuação é um importante passo para o planeamento de sistema de rádio móvel, sendo necessários métodos rigorosos de predição de modo, a proporcionar valores confiáveis de cobertura para determinada zona geográfica. Os modelos de propagação têm como finalidade a estimação do sinal recebido num determinado ponto de receção, estando a ele associado uma distância relativamente a estação base. Com os modelos de propagação é possível otimizar a correlação entre a potência do sinal e a estimação do mesmo, num determinado ponto de receção, minimizando a média de erro e o desvio padrão.

Como já referido, a aplicabilidade de um sistema de banda larga sem fios têm um vasto leque de ambientes e cenários, cada um deles, específico e singular, o que leva ao aparecimento de diversos modelos para predição de sinal otimizados para determinado cenário.

O planeamento de sistemas de redes sem fios pode ser dividido em dois grandes tipos de ambiente:

- o *Outdoor*, onde o sinal se propaga em ambiente aberto, usualmente um raio de célula na ordem dos quilómetros (macrocélulas) ou nas centenas de metros (microcélulas);
- o *Indoor*, onde a propagação se realiza num meio fechado, normalmente associado a raios de célula na ordem das dezenas de metros (picocélulas).

A Figura 3.1, apresenta um organigrama ilustrando a classificação dos modelos utilizados nos dois tipos de ambiente, explicados em seguida. Neste documento descreve-se apenas os modelos para ambientes *outdoor*, por ser esse o cenário em teste.

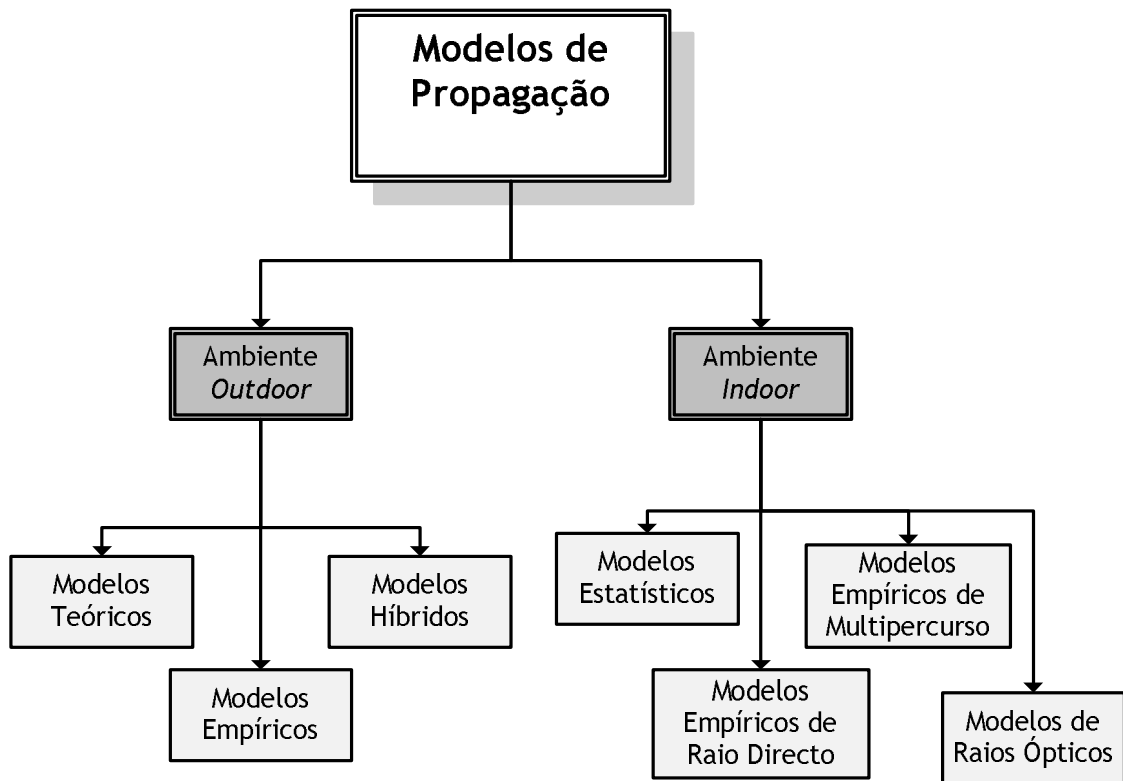


Figura 3.1 - Classificação dos modelos utilizados em ambientes *outdoor* e *indoor*.

3.2 Modelos para Outdoor

Este tipo de modelos têm como finalidade estimar o sinal recebido em espaço aberto, normalmente associado a macrocélulas e microcélulas. Existem inúmeros modelos para este tipo de cenário, que contemplam ligações em condições de LoS e NLoS entre emissor e receptor.

3.2.1 Caracterização de cenários

Neste tipo de tema, não é possível definir um modelo genérico que circunscreva determinadas condições de cenário e frequência. Apesar disto, podemos distinguir três tipos de cenário. A classificação de cada cenário considera diversos aspectos, entre eles, o relevo do terreno, a densidade de vegetação, a densidade e altura dos edifícios, a existência de áreas abertas, a existência de superfícies aquáticas, entre outros. Os cenários podem, então, ser classificados como:

- Rural;
- Suburbano;
- Urbano.

Como é intuitivo nos cenários rurais regista-se uma maior quantidade de áreas abertas e uma menor densidade de edifícios, o que é benéfico para a propagação do sinal e respectiva estimação ou predição do mesmo. No entanto, em contrapartida, normalmente nestas áreas geográficas existe uma maior densidade de vegetação que, por sua vez, conduz a mais um factor de atenuação na propagação do sinal.

Os cenários suburbanos são caracterizados por uma mistura de cenário rural e urbano. Neste caso, o terreno é ocupado por uma maior densidade de construções, no entanto prevalece, de certa forma, a existência de áreas abertas.

No caso de um cenário urbano, a enorme densidade de edifícios vai provocar a existência de inúmeros raios reflectidos, causando desvanecimento. A atenuação do sinal por reflexão, difracção, dispersão ou refracção varia de acordo com os materiais de construção. A existência de ruas conduz a fenómenos de propagação guiada. Devido a estas características neste tipo de cenário, a tarefa de avaliação de um modelo de propagação com base em medidas reais torna-se extremamente complicada, podendo ocorrer desvios significativos entre a predição do sinal e a realidade.

3.2.2 Classificação dos modelos

Os modelos de propagação para este tipo de ambiente podem ser divididos em três grandes categorias:

- Modelos empíricos;
- Modelos teóricos;
- Modelos híbridos.

Os modelos empíricos, como o próprio nome indica, são baseados em testes experimentais, conduzindo a correlações simples entre a atenuação e a distância, ou seja, a curvas e equações que melhor se ajustam às medidas. Têm a vantagem de contabilizar todos os factores que afectam a propagação e necessitam de uma validação prévia dos locais, frequências e condições diferentes dos ambientes de medida. Costumam apresentar relativa facilidade e rapidez de computação, gerando resultados mais eficazes quando a região em análise se aproxima cada vez mais da região de medições.

Os modelos teóricos requerem a utilização de bases de dados topográficas utilizando os métodos de ligações fixas. Permitem uma fácil alteração para outros valores dos parâmetros e dependem da definição de bases de dados geográficas, mas não contabilizam todos os factores inerentes a um cenário nem têm em consideração o cenário em que o móvel se desloca. Por estas razões, a utilização deste tipo de modelos cinge-se a pequenas áreas e a ambiente internos, embora apresentem uma precisão elevada. Estes modelos teóricos podem ainda ser divididos em modelos determinísticos, os quais necessitam de um completo auxiliar

de informação geográfica a três dimensões para o cenário ser analisado (*Ray-tracing*) e em modelos estocásticos, que modelam o ambiente através de uma série de variáveis aleatórias. Os modelos híbridos contemplam as perspectivas empíricas e teóricas e têm alguma flexibilidade, podendo ser aferidos com ensaios experimentais realizados no meio envolvente específico onde vão ser aplicados.

3.2.3 Modelos para terreno aberto

3.2.3.1 Modelo de *Friis* modificado

É o modelo de propagação mais simples, publicado por Harald Friis em 1946, válido em condições de propagação em espaço livre, é dado pela fórmula de *Friis*:

$$\frac{1}{L} = \frac{P_r}{P_e G_e G_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.1)$$

Onde L é a atenuação, P_r é a potência recebida, P_e é a potência transmitida, G_e é o ganho da antena de emissão, G_r é o ganho da antena de recepção, λ é o comprimento de onda e d é a distância. Na realidade, para além da atenuação em espaço livre, é necessário considerar outros fenómenos que vão influenciar a atenuação, tais como o efeito da curvatura da Terra, as perdas por difracção e as perdas devido à existência de obstáculos, reflexões e refrações, entre outros.

Para modelar estes fenómenos, de uma forma realista, utilizam-se modelos rigorosos aplicados a cada fenómeno, modificados por parâmetros obtidos a partir de medidas de campo.

Um modelo correctamente aplicado utiliza a fórmula de *Friis* para espaço livre variando o expoente de propagação γ [MCVS05], de forma a distinguir os diferentes níveis de densidade da área edificada. O valor de γ varia entre 2 e 4 em sistemas com cobertura celular. Deste modo, a atenuação, L é dada pela equação:

$$L = 32.4 + 30\gamma + 10 \log d + \gamma_{chuva}d + \gamma_{nevoeiro}d + \gamma_{neve}d + 20 \log f \quad (3.2)$$

Onde γ é o expoente de propagação, γ_{chuva} é a atenuação específica devido à chuva, $\gamma_{nevoeiro}$ é a atenuação específica devido ao nevoeiro, γ_{neve} é a atenuação específica devido à neve. As atenuações específicas são expressas em dB/km, a distância em km e a frequência, f em GHz. No entanto, para feixes hertzianos e ligações PtP, considera-se sempre a fórmula de *Friis* original, ou seja, com $\gamma=2$.

3.2.3.2 Modelo de *Egli*

O modelo de Egli faz a predição total da atenuação de percurso até a um determinado ponto, ou receptor, e está padronizado para ligações ponto-a-ponto com linha de vista a funcionar entre 90 e 1000 MHz. Apresentou resultados bastantes similares aos observados pela fórmula de Friis (Expressão 3.1). O modelo de Egli é traduzido pela seguinte fórmula:

$$PL_{[dB]} = G_b G_m \left(\frac{h_b h_m}{d^2} \right)^2 \beta \quad (3.3)$$

Onde G_b e G_m representam o ganho da antena emissora e receptora, em dB, respectivamente, h_b é a altura da antena emissora e h_m a altura da antena receptora, em metros. A variável β representa uma função da irregularidade do terreno:

$$\beta = \left(\frac{40}{f_{[MHz]}} \right)^2 \quad (3.4)$$

Este modelo é ideal para planear sistemas ponto-a-ponto em que o emissor e o receptor estão fixos. Relativamente aos sistemas de redes móveis, este modelo mostra algumas limitações, pois baseia-se apenas em propagação sem qualquer tipo de obstáculo. [Seyb05].

3.2.3.1 Modelo de *Longley-Rice*

O modelo de *Longley-Rice* foi desenvolvido na década de 60, onde foram introduzidos os métodos de cálculo em formato computacional. Tem sido avaliado ao longo dos anos e opera entre 40 MHz e 100 GHz para distâncias do emissor ao receptor de 1 a 2000 km [Seyb05]. A antena emissora pode estar compreendida entre 0,5 e 3000 m de altura e tanto a antena emissora como a receptora suportam polarização vertical ou horizontal. Devido ao detalhe com que foi concebido, apresenta variáveis para o tipo de terreno, clima, condições de subsolo e curvatura da terra, este modelo é geralmente aplicado apenas em formato digital, no qual são introduzidos os valores dos parâmetros e posteriormente calculada a predição do sinal [Seyb05].

3.2.4 Modelos para zonas urbanas ou sub-urbanas

Para este tipo de cenários são necessários modelos que contabilizem aspectos relacionados com construção, incluindo o impacto de diferentes materiais têm na propagação do sinal e de esta ocorrer em condições de NLoS. Normalmente, este tipo de modelos, são aplicados em topologias ponto-multiponto. No entanto, devido à diversidade de construções e

características próprias de cada cenário de propagação, podendo em outras circunstâncias apresentar previsões muito afastadas das reais. Dentro destes moldes, foram escolhidos alguns que encaixassem melhor no cenário em estudo, cidade da Covilhã, e na gama de frequências utilizada. Os subcapítulos seguintes, descrevem os modelos aplicados e lembrados em [WiFo08] e [AnGM07].

3.2.4.1 Modelo de propagação SUI

O modelo *Stanford University Interim* (SUI) é um modelo desenvolvido pelo grupo de trabalho da norma IEEE 802.16 em parceria com a Universidade de *Stanford*, em que se estabeleceu um modelo para diferentes tipos de terreno de forma mais simples que o modelo físico. Para este modelo a atenuação é dada por [IEEE03]:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad (3.5)$$

Onde,

- o d é a distância entre o emissor e o receptor (para $d \geq d_0$);
- o $d_0 = 100$ metros;
- o h_b é a altura da BS acima do solo ($10\text{m} \leq h_b \leq 80\text{m}$).

A é definido por [IEEE03]

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (3.6)$$

e γ é definido por [IEEE03]

$$\gamma = \left(a - bh_b + \frac{c}{h_b}\right) \quad (3.7)$$

As constantes a , b e c , são definidas conforme o tipo de terreno, como ilustram a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Constantes do modelo SUI [IEEE03].

Constante	Tipo de terreno A	Tipo de terreno B	Tipo de terreno C
a	4.6	4.0	3.6
b	0.0075	0.007	0.0065
c	12.6	17.1	20

Os termos X_f e X_h são factores de correcção para a frequência e para a altura do terminal móvel acima do solo, respectivamente. Estas correcções são definidas por [IEEE03]:

$$X_f = 6.0 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (3.8)$$

e,

$$X_h = -10.8 \log\left(\frac{h_m}{2.0}\right) \quad \text{para os tipos de terreno A e B} \quad (3.9)$$

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h_m}{2.0}\right) \quad \text{para os tipos de terreno C} \quad (3.10)$$

Onde, h_m é a altura do terminal (equipamento receptor) em relação ao solo. O termo s é o factor de *shadowing* presente no modelo, que pode tomar valores entre 8.2 e 10.6 dB, dependendo do tipo de terreno.

O modelo IEEE 802.16 SUI define dois modelos para cada um dos três tipos de terreno, sendo assim um total de seis tipos de modelos, como mostra a Tabela 3.2, em que cada modelo não só indica quais as fórmulas de atenuação a usar, mas também referencia o tipo de atraso, efeito de *Doppler* sofrido pelo sinal e o valor do factor k do desvanecimento de *Rice*.

Tabela 3.2 - Classificação do modelo SUI [Ande03].

Modelo SUI	Tipo de terreno	Atraso ⁴	Factor k de <i>Rice</i> ⁵	Efeito <i>Doppler</i>
SUI-1	C	Baixo	Alto	Baixo
SUI-2	C	Baixo	Alto	Alto
SUI-3	B	Baixo	Baixo	Baixo
SUI-4	B	Moderado	Baixo	Alto
SUI-5	A	Alto	Baixo	Baixo
SUI-6	A	Alto	Baixo	Alto

Os diferentes modelos são dados para as diferentes situações existentes. O atraso deve-se ao facto de existir multipercurso, que pode ser notado de forma maior ou menor conforme o tipo de terreno. O factor k de *Rice* diferencia ambientes com LoS ou NLoS e o efeito *Doppler* deve-

⁴ Em geral, pode ser interpretado como a diferença de tempo, entre o momento da chegada da primeira componente de uma onda electromagnética e o momento da chegada dos últimos componentes, que caracteriza situações de multipercurso.

⁵ O factor k de *Rice*, é definido como a relação da potência de sinal na componente dominante de uma onda electromagnética em relação aos componentes mais dispersos, potência de ondas reflectidas. Determina a distribuição da amplitude do sinal recebido. O conhecimento do factor k de *Rice* é útil para determinar a taxa de erro, BER, de um canal.

se à possibilidade de existir mobilidade em cada caso. Este modelo é considerado adequado para distâncias menores.

3.2.4.2 Modelo de Hata

O modelo de Hata foi sugerido em 1968, tem sido desenvolvido através de medições ocorridas na cidade Tóquio, criando curvas com a atenuação média em relação à atenuação em propagação em espaço livre. Ou seja, basta usar essas curvas para fazer a predição do sinal, o que não oferece nenhuma fiabilidade. Então em 1983, Hata desenvolveu a fórmula seguinte para a atenuação:

- o Para ambiente urbano:

$$PL_{dB} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_t) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) - a(h_r) \quad (3.11)$$

Onde a frequência, f , situa-se entre 150 e 1500 MHz, a altura da antena da BS, h_t , está compreendida entre 30 e 200 metros e a distância, d , varia entre 1 e 20 quilómetros. O parâmetro $a(h_r)$ representa o factor de correcção da antena do receptor. Podendo ser calculado através de (3.12) e (3.13) para cidades pequenas ou médias e de grande dimensão, respectivamente, parâmetro h_r , compreende valores de 1 a 10 metros:

$$a(h_r) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_r - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (3.12)$$

$$a(h_r) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_r))^2 - 1.1, & f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log(11.75h_r))^2 - 4.97, & f \leq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (3.13)$$

- o Para ambiente suburbano

$$PL_{dB} = PL_{URBANO} - 4.78 \log(f)^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad (3.14)$$

- o Para ambiente rural

$$PL_{dB} = PL_{URBANO} - 2 \log\left(\frac{f}{28}\right)^2 - 5.4 \quad (3.15)$$

3.2.4.3 Modelo COST-231 Hata

O modelo COST-231 Hata foi desenvolvido sob os pressupostos do Modelo de Hata [AWCSB05], tendo sido aumentada a gama de frequências para valores entre os 500 MHz e os 2000 MHz. Tem como base medições efectuadas na cidade de Tóquio e foi usada uma antena

omnidireccional no receptor a três metros de altura. Pode ser aplicado em grandes e pequenas macrocélulas e não deve ser usado em microcélulas. Para além disso, este modelo restringe-se à seguinte variação de parâmetros.

- o f , 1500 a 2000 MHz.
- o h_b , 30 a 200 m
- o h_t , 1 a 10 m
- o d , 1 a 20 km

A expressão matemática que define as perdas de percurso do Modelo COST-231 Hata é dada por [AnGM07]:

$$PL_{dB} = 46.3 + 33.9 \log(f_{MHz}) - 13.82 \log(h_{b[m]}) - a_{hm} + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d_{km}) + C_{m[dB]} \quad (3.16)$$

Onde f é a frequência utilizada, d a distância (em km) entre o emissor e o receptor e h_n a altura (em metros) efectiva da antena da estação base. O parâmetro C_m tem o valor de 0 dB para cidades de dimensão média e centros suburbanos com uma densidade de árvores média, e 3 dB para centros metropolitanos. O parâmetro a_{hm} é definido para ambientes urbanos pela Expressão (3.17) e para ambientes suburbanos ou rurais pela Expressão (3.18) [AWCSB05].

$$a_{hm} = 3.2 \log(11.75 h_{t[m]})^2 - 4.97 \quad \text{para } f > 400 \text{ MHz} \quad (3.17)$$

$$a_{hm} = (1.1 \log(f_{MHz}) - 0.7) h_{t[m]} - (1.56 \log(f_{MHz}) - 0.89) \quad (4.18)$$

Onde h_t representa a altura efectiva da antena receptora. O Modelo COST-231 Hata é dos mais usados nas ferramentas de planeamento RF em redes móveis.

3.2.4.4 Modelo COST-231 Walfisch-Ikegami

Este modelo foi proposto para micro e pequenas macrocélulas, combinando os modelos de Walfisch e de Ikegami. Este modelo, de acordo com [Wölf00], é o modelo mais utilizado no planeamento de redes sem fios em meio urbano. Trata-se de um modelo empírico que contabiliza parâmetros como a altura dos edifícios entre emissor e receptor, h (se os edifícios não tiverem uma altura uniforme é feita uma média), a distância entre edifícios, b (se a distância não for homogénea é usada uma distância média) e a largura das ruas, w (usando-se uma média caso a largura das ruas não seja homogénea). Estes parâmetros estão ilustrados na Figura 3.2.

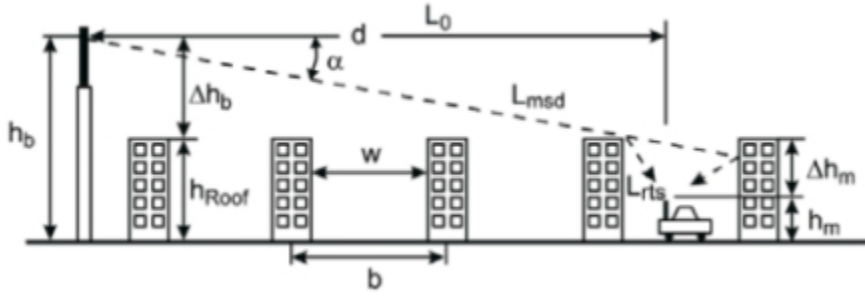


Figura 3.2 - Parâmetros do modelo COST-231 Walfisch-Ikegami [WiFo08].

Este modelo divide a análise por zonas de LoS e NLoS. Para percursos com $d \geq 0.02$ km em condições de LoS, a atenuação é igual a:

$$PL_{dB} = 42.6 + 26 \log(d_{[km]}) + 20 \log(f_{[MHz]}) \quad (3.19)$$

Em condições NLoS, a atenuação consiste em três termos [WiFo08]:

- o propagação em espaço livre, L_0 ;
- o factor de difracções múltiplas, L_{msd} ;
- o factor de difracção e espalhamento do último obstáculo, L_{rts} ;

A expressão para NLoS é:

$$PL_{dB} = \begin{cases} PL_0 + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ PL_0 & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

onde,

$$PL_0 = 32.4 + 26 \log(d_{[km]}) + 20 \log(f_{[MHz]}) \quad (3.21)$$

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log(w_{[m]}) + 10 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log(\Delta h_{[m]}) + L_{ori} \quad (3.22)$$

$$\Delta h_{[m]} = h_{roof} - h_m \quad (3.23)$$

Onde $\Delta h_{[m]}$ é a diferença entre a altura dos edifícios e a altura do receptor, e o parâmetro w é a largura da rua. O parâmetro L_{ori} representa o factor de orientação com a rua, sendo que [Wölf00] despreza este parâmetro, representado na Figura 3.3.

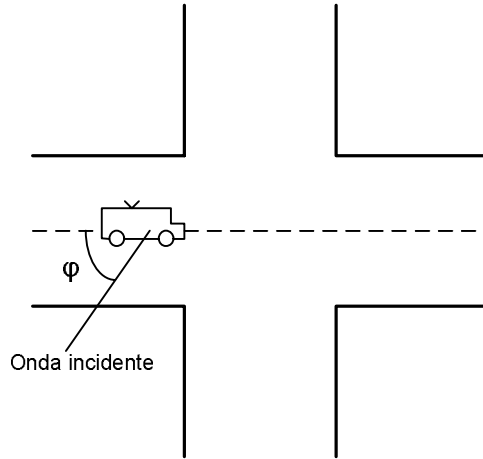


Figura 3.3 - Ângulo de orientação para a rua [WiFo08].

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (3.24)$$

O factor de perdas por difracções múltiplas, L_{msd} foi estimado pelo método de *Walfisch* [WiFo08] e é dado por:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d_{[km]}) + k_f 10 \log(f_{[MHz]}) - 9 \log(b_{[m]}) \quad (3.25)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_{b[m]} - h_{roof[m]})] & h_b > h_{roof} \\ 0 & h_b \leq h_{roof} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h_{roof} \\ 54 - 0.8(h_{b[m]} - h_{roof[m]}) & \text{para } h_b \leq h_{roof} \text{ e } d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54 - 0.8(h_{b[m]} - h_{roof[m]}) \frac{d_{[km]}}{0.5} & \text{para } h_b \leq h_{roof} \text{ e } d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_b > h_{roof} \\ 18 - 15 \frac{(h_{b[m]} - h_{roof[m]})}{h_{roof[m]}} & h_b \leq h_{roof} \end{cases} \quad (4.28)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{Para cidades de média dimensão e zonas suburbanas} \\ 1.5 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{Para áreas metropolitanas} \end{cases} \quad (3.29)$$

Os parâmetros k_d e k_a representam factores de correcção de altura da antena emissora, e o parâmetro k_f representa o factor de correcção para a densidade de edifícios existentes na área de teste. Este modelo restringe-se à seguinte variação de parâmetros.

- o f , 800 a 2000 MHz;

- o h_b , 4 a 50 m;
- o h_t , 1 a 3 m;
- o d , 0.02 a 5 km;

Este modelo apresenta resultados muito bons quando a altura da antena emissora é maior do que a altura dos edifícios, piorando nos casos, das alturas tenderem a ser iguais ou mesmo a antena dos edifícios ser mais alta que a antena emissora. A predição do sinal também piorou quando testado em terrenos mais acidentados [WiFo08]. Para terrenos desconhecidos é aconselhado o uso dos parâmetros da seguinte forma:

- o $h_{roof}=3*\{\text{número de andares}\}+\{\text{altura do telhado}^6\}$ [m];
- o $b= 20$ a 50 [m];
- o $w=b/2$;
- o $\varphi=90^\circ$.

3.2.4.5 Modelo de Erceg Modificado

Este modelo foi baseado no modelo de Erceg-Greenstein, sendo adoptado pelo grupo IEEE 802.16 para redes sem fios pois foi desenvolvido para frequências mais altas e sendo acrescentados novos factores de correcção ao modelo base, passando a ser válido para:

- o Frequência, $1900 \text{ MHz} \leq f \leq 3500 \text{ MHz}$;
- o Altura estação base, $10 \text{ m} \leq h_b \leq 80 \text{ m}$;
- o Altura terminal, $2 \text{ m} \leq h_t \leq 10 \text{ m}$;
- o Distância entre terminal e emissor, $0.1 \text{ m} \leq d \leq 8 \text{ km}$;

A atenuação é dada por [AnGM07]:

$$PL_{dB} = A_0 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta PL_f + \Delta PL_{hMS} + \Delta PL_{\theta MS} \quad (3.30)$$

Os factores de correcção ΔPL_f , ΔPL_{hMS} e $\Delta PL_{\theta MS}$ representam a correcção em relação à frequência, altura do receptor e a directividade da antena do receptor, respectivamente. Estes factores são calculados por [AnGM07]:

$$\Delta PL_{f[dB]} = 6 \log\left(\frac{f_{[MHz]}}{1900}\right) \quad (3.31)$$

$$\Delta PL_{hMS[dB]} = -10.8 \log\left(\frac{h_t}{2}\right) \quad \text{para terrenos do tipo A e B (Erceg)} \quad (3.32)$$

⁶ A altura do telhado é aconselhado a usar 3 metros se este for inclinado, no caso de ser plano considerar 0 metros.

$$\Delta PL_{hMS[dB]} = -20 \log\left(\frac{h_t}{2}\right) \quad \text{para terrenos do tipo C (Erceg)} \quad (3.33)$$

$$\Delta PL_{\theta MS[dB]} = 0.64 \ln\left(\frac{\theta}{360}\right) + 0.54 \left(\ln\left(\frac{\theta}{360}\right)\right)^2 \quad (3.34)$$

Os parâmetros de Erceg para os tipos de terreno:

- o Erceg A, terrenos montanhosos com vegetação moderada a densa;
- o Erceg B, terrenos montanhosos e pouca vegetação ou terrenos planos com vegetação moderada a densa;
- o Erceg C, terrenos planos com pouca vegetação;

A Tabela 3.3, apresenta os valores dos parâmetros de Erceg.

Tabela 3.3 - Parâmetros de Erceg [AnGM07].

Parâmetros	Erceg A	Erceg B	Erceg C
A	4.6	4.0	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20
s_a	0.57	0.75	0.59
μ_s	10.6	9.6	8.2
σ_s	2.3	3.0	1.6

3.2.4.6 Modelo ECC-33

O Modelo *Electronic Communication Committee-33* (ECC-33) é baseado no Modelo COST-231 Hata, tendo sido adaptado às cidades de topologia europeia (mais baixas do que Tóquio onde Hata desenvolveu o seu modelo). A expressão que caracteriza este modelo é dada por [EICC03], [AWCSB05]:

$$PL_{dB} = A_0 + A_{bm[dB]} - G_c - G_t \quad (3.35)$$

Em que A_0 é atenuação em espaço livre (Expressão (C.3)). O parâmetro A_{bm} representa a media das perdas de percurso, sendo calculada por:

$$A_{bm[dB]} = 20.41 + 9.38 \log(d_{[km]}) + 7.894 \log(f_{[GHz]}) + 9.56 [\log(f_{[GHz]})]^2 \quad (3.36)$$

O parâmetro G_c define o factor de ganho de altura da estação base e é obtido por:

$$G_{c [dB]} = 10 \log \left(\frac{h_b [m]}{200} \right) \left\{ 13.958 + 5.8 [\log(d_{[km]})]^2 \right\} \quad (3.37)$$

$$G_{t [dB]} = [42.57 + 13.7 \log(f_{[GHz]})] \times [\log(h_m) - 0.585] \quad (3.38)$$

O factor de ganho da antena receptora, G_t , é o factor que distingue o tipo de cidade europeia da japonesa. O parâmetro h_b , é a altura da estação receptora e h_m é a altura da estação base. Este factor é usado para zonas suburbanas, sendo que para cidades de grandes dimensões o valor de ganho é dado por:

$$G_{t [dB]} = 0.795 h_m - 1.862 \quad (3.39)$$

Em [AWCSB05], mostra que as campanhas realizados em Cambridge (Reino Unido), o Modelo ECC-33 demonstrou melhores resultados para uma frequência de 3,5 GHz do que qualquer dos outros modelos testados, SUI e COST-231 Hata.

3.2.4.7 Modelo LUI

O modelo LUI [Vare10] (*Lisbon University Institute*) expressa a atenuação média durante o percurso entre emissor e receptor em função da distância d . O modelo LUI foi tido em conta, porque no caso da gama de frequências utilizada no trabalho experimental desta dissertação, não existem muitos modelos que tenham apresentado predições fiáveis Este modelo abrange cenários *outdoor*, *indoor* ou ambos, além de efectuar a predição do sinal para UMTS, Wi-Fi e WiMAX.

$$PL(d)_{[dB]} = \left\{ \begin{array}{l} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot d_0}{\lambda} \right) + 10 \cdot \gamma_1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \cdot u(d_{bp} - d) + \\ + ENV \cdot \left[X_f + X_h + VEG \cdot A_m \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-d_{depth} \cdot \beta}{A_m} \right) \right] \right] + \\ + u[NE - 2] \cdot [W_e + W_{GE} \cdot (1 - \sin \theta)^2 - G_f] \cdot u(d - d_{bp}) + \\ + (1 - ENV) \cdot \left[\begin{array}{l} u[1 - NE] \cdot \left[10 \cdot \gamma_1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d_{bp}}{d_0} \right) + \frac{WAF_{bp}}{\sin \theta_H} + \right. \\ \left. + \frac{FAF_{bp}}{\sin \theta_V} + \sum_{f=2}^{NF} \frac{FAF(f)}{\log_{10}(10 \cdot f)} \right] + \\ \left. + 10 \cdot \gamma_2 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{bp}} \right) + \sum_{w=2}^{NW} \frac{WAF(w)}{\log_{10}(10 \cdot w)} \right] \end{array} \right] \cdot u(d - d_{bp}) \end{array} \right\} \quad (3.40)$$

No âmbito deste trabalho, o cenário alvo de estudo foi apenas *outdoor*. Deste modo, recorrendo aos parâmetros do modelo, o número de ambientes é igual a 1 ($NE=1$) e a variável

booleana para este tipo de ambiente assume também o valor 1 para qualquer distância ($ENV=1$). Perante este cenário, o modelo possui a capacidade de contabilizar ou não as atenuações causadas por uma zona de vegetação, caso o terminal esteja rodeado por esta. Assim, o cálculo da atenuação num determinado ponto, tanto em LoS como em NLoS, e sem estar obstruído por vegetação ($VEG=0$) resume-se à expressão:

$$PL(d)_{[dB]} = \left\{ 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10\gamma_1 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \cdot u(d_{bp} - d) + X_f + X_h \right\} \quad (3.41)$$

Caso o terminal de recepção esteja obstruído por vegetação, o parâmetro passa a $VEG=1$ e a parcela que o multiplica será contabilizada.

Como a distância de *breakpoint*, para este cenário, representa a distância à interface entre ambientes, admite-se que d_{bp} será sempre maior que d , logo, o resultado da função escalão $u(d_{bp} - d)$ terá sempre o valor de 1 fazendo com que a parcela que a multiplica seja sempre contabilizada para qualquer ponto a uma distância d do emissor. Este modelo, em campanhas experimentais em ambiente outdoor apresentou uma grande discrepância nos valores medidos [Vare09].

3.2.5 Modelos para vegetação

Nos casos onde a presença de áreas verdes é relevante, é importante incluir no modelo de propagação a atenuação produzida por essas áreas, pois provocam fenómenos como, difracção, dispersão, reflexão e refracção, referidos no Anexo D. Novamente, a subjectividade neste tipo de predição está presente, pois estes modelos dependem da estação do ano por interferir com o tipo de vegetação e seu volume, fazendo com que estes tipos de modelos sejam pouco fiáveis.

Estes modelos caracterizam-se no modo como a atenuação é calculada, contabilizando apenas a vegetação, sendo sempre um factor acumulativo à predição de um modelo *outdoor* para o cenário em estudo.

De acordo com [ITU-07], existem duas formas de abordar a questão da atenuação devido à vegetação: quando o terminal de recepção está fora da estrutura vegetativa e quando está dentro. Quando se encontra fora da área vegetativa, é considerado um modelo de difracção em lâmina (a lâmina representa a estrutura vegetativa) e quando o terminal se encontra no interior da área vegetativa a predição é feita através de modelos de vegetação.

Na primeira situação, é considerado um modelo de difracção por obstáculo em lâmina, em que a lâmina representa a estrutura vegetativa. Quando o terminal está dentro de uma estrutura vegetativa é necessário fazer uma predição através dos modelos de vegetação.

Na realização deste trabalho não foram incluídos este tipo de modelos na análise dos testes experimentais, devido à limitação destes, em termos de frequências mais altas, como é

o caso deste trabalho, além de a área geográfica onde foram realizados os testes, não apresentasse áreas vegetativas extensas ou profundas, que se considerasse que o receptor estivesse no interior de um bosque ou floresta. Ficam alguns exemplos de modelos para vegetação:

- o Modelo de *Weissberger* [Seyb05]. Foi calculado para frequências entre 230 MHz até 95 GHz.
- o Modelo da CCIR (*Comité Consultatif International pour la Radio*). Foi sugerido em 1986, para ligações PtP sendo destinado a frequências baixas.
- o Modelo COST-235 [Seyb05]. Baseado no modelo CCIR, inclui parâmetros relacionados com a estação do ano e destina-se a frequências baixas.
- o Modelo ITU-833 [ITU-07]. Este modelo foi sugerido após campanhas experimentais com o terminal receptor no interior de uma área vegetativa e o emissor fora dela. Nas campanhas realizadas utilizaram-se frequências até 2.2 GHz.

3.3 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo, enumeraram-se diversos modelos de propagação, quais os cenários, ambientes, frequências em que foram desenvolvidos. Os modelos dão uma estimativa de como um sinal se propaga através de um meio envolvente, servindo para antecipar com precisão o comportamento de determinado sinal, servindo para aperfeiçoar a nível do planeamento celular e predizer a cobertura de uma célula.

Todos os modelos de propagação abordados revelam limitações e subjectividade quanto à sua utilização, pois as condições de teste distinguem-se do resto de outros possíveis cenários, podendo apenas aproximar-se, ficando, desde de logo, a predição de sinal com pouca precisão.

Desde logo, é possível observar que os modelos capazes de predizer o sinal de uma portadora na faixa dos 3.5 GHz, são os modelos de Erceg Modificado e SUI. Por outro lado, conclui-se que quanto maior for a altura do emissor, maior será a cobertura alcançada e maior será a probabilidade de LoS com o terminal de recepção, mas, por outro lado, maior será a interferência entre estações base e maior será o espalhamento de atraso, um dos principais problemas na comunicação digital móvel de débitos elevados. De igual forma, a altura do receptor também é um factor relevante, embora subjectivo porque em ligações PtP, o receptor estará sempre a mesma altura e com as mesmas condições de LoS, ao contrário das redes móveis onde estas condicionantes variam ao longo do tempo.

Por fim, as características topográficas do terreno, os factores de correcção introduzidos, tendem a aperfeiçoar os modelos de propagação.

Capítulo 4

Ferramentas Winprop™ e ArcGIS™

Neste Capítulo são abordadas duas ferramentas distintas. Uma é a ferramenta de simulação e planeamento de redes, Winprop™, e outra é o sistema de informação geográfica, ArcGIS™. Na elaboração deste documento, teve-se por base simular o sistema implementado na cidade da Covilhã, de modo a adquirir e ter conhecimento de alguns parâmetros acerca do sistema WiMAX (BreezeMAX 3000 da Alvarion), tais como, predição de LoS e NLoS, tamanho da célula e cálculo da atenuação ao longo da mesma, com vista a comparar com os dados recolhidos nas campanhas experimentais (Capítulo 6). A utilização da ferramenta ArcGIS™ surgiu por necessidade de tratar a informação gerada durante as simulações fornecendo-lhe uma informação geográfica rigorosa, de modo a ser perceptível pelo engenheiro de planeamento

Estas simulações foram realizadas com intuito de testar o sistema IEEE 802.16-2004 instalado na cidade da Covilhã, para se ter uma percepção dos parâmetros de cobertura da célula. Os resultados obtidos da simulação foram essenciais para a interpretação das campanhas experimentais, fazendo a predição dos locais com condições LoS a explorar.

4.1 Winprop™

O WinProp™ é uma poderosa interface gráfica do utilizador (GUI, *Graphical User Interface*) que permite analisar a propagação de uma onda electromagnética diferentes cenários (rurais, suburbanos, urbanos, *indoor* e túneis), bem como a inclusão de objectos 3D (paredes, veículos e automóveis).

O WinProp™ é um software que não necessita de ser instalado, basta copiar os ficheiros executáveis para a raiz do disco rígido e podemos começar a utilizá-lo. Embora como se trata de um software comercial, necessita de um "Dongle", que necessita de ter instalados os seus drives.

São suportadas tecnologias (GSM, GPRS, UMTS, LTE, Wi-Fi, WiMAX e DVB-H) para simuladores (estáticos ou dinâmicos). As características dos parâmetros de simulação, são alteráveis e configuráveis pelo utilizador, permitindo obter mapas de débitos, quantidade de emissores, potências necessárias nas estações móveis e resultados estatísticos (histogramas). Neste subcapítulo será dada uma breve explicação do programa WinProp™, nomeadamente do módulo ProMan, dos modelos de propagação e cenários, e simulação do sistema que se pretendeu testar experimentalmente.

4.1.1 Introdução

O WalMan, o ProMan e o AMan fazem parte do pacote de software de planeamento de redes sem fios do WinProp™. O ProMan foi o módulo mais abordado neste trabalho, este módulo não é somente projectado para o planeamento de redes de rádio móveis celulares, pode igualmente ser usado para analisar a propagação de ondas electromagnéticas em ambientes arbitrários. Para oferecer um desempenho máximo ao utilizador, o ProMan fornece dois tipos de projecto, de propagação e de rede. Usado para a análise da propagação, o ProMan permite a implementação de emissores múltiplos e diferentes tipos de cenários:

- o Rural, baseado em bases de dados topográficos, existe diversas modalidades disponíveis de propagação (*Hata*, *Knife-Edge*, *Parabolic Equations* e *Dominant Path*). Não está só limitado aos ambientes rurais, podendo também ser utilizado nos ambientes urbanos e suburbanos não incluindo os edifícios.
- o Urbanos, baseado em base de dados de áreas urbanas, incluindo edifícios, e utiliza os modelos empíricos (*Wallfisch-Ikegami* e *COST-231*) e *Ray Tracing*.
- o *Indoor*, baseado nas paredes e objectos que estão dentro do edifício, e adicionalmente é considerado a área envolvente. Os modelos empíricos utilizados são (de *Multi-Wall*, *Motley Keenam* e *COST-231*) e *Ray Tracing*.
- o Túnel, é um módulo adicional para túneis, incluindo também secções transversais. A predição é calculada com modelo de propagação de *Parabolic Equations* ou por *Ray Tracing*.

O WinProp™ é uma ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios desenvolvida pela AWE Communications, constituída por três módulos:

- o ProMan;
- o WalMan;
- o AMan.

O *Combined Network Planning* (CNP) é uma característica especial do WinProp™, enquanto que, em ferramentas clássicas, o planeamento de redes é definido pelos modelos de propagação (macro/micro/pico), o WinProp™ oferece uma maior flexibilidade baseada na aproximação de CNP. Com a AWE's CNP, é possível que a transição entre os diferentes cenários e modelos de propagação sejam mais amenos, ou seja, é possível criar modelos de propagação em ambientes híbridos com uma análise mais detalhada [Winp09].

4.1.2 Bases de Dados

As bases de dados são os dados de entrada mais importantes para uma correcta modelação da propagação. Geralmente, existem diferentes tipos de bases de dados que

dependem do ambiente onde será feita o planeamento de rede. Para além das bases de dados de vector, o WallMan permite manipular bases de dados de pixel. Este tipo de base de dados consiste essencialmente em mapas topográficos e de edifícios. Alguns fornecedores de bases de dados oferecem bases de dados de edifício urbanos em pixel e em formato de vectorial, visto que o formato de vector é normalmente mais caro. O WinProp™ suporta os seguintes ambientes, Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo dos tipos de ambiente, base de dados e respectivos modelos de propagação [Winp09].

Tipo de Ambiente	Características	Base de dados	Modelos de propagação
Rural	Densidade baixa de edifícios	Topográficos e de clutter	<i>Hata-Okumura, Knife-Edge e Parabolic Equations</i>
Suburbano	Densidade média de edifícios	Topográficos e de clutter	<i>Hata-Okumura, Knife-Edge e Parabolic Equations</i>
Urbano	Densidade elevada de edifícios	Vector de edifícios	COST-231 Walfisch-Ikegami, <i>Ray-Tracing</i>
Urbano denso	Densidade muito elevada de edifícios	Vector de edifícios	COST-231 Walfisch-Ikegami, <i>Ray-Tracing</i>
Campus	Pequenas áreas com alguns edifícios	Edifícios	Motley-Keenan, COST-231 Multi Wall, <i>Ray-Tracing</i>
<i>Indoor</i>	No interior de edifícios	Vector de interior de edifícios	Motley-Keenan, COST-231 Multi Wall, <i>Ray-Tracing</i>
Túnel	Caminhos-de-ferro e estradas com túneis	Base de dados <i>indoor</i>	Motley-Keenan, COST-231 Multi Wall, <i>Ray-Tracing</i>

4.1.2.1 Bases de Dados Topográficos

As bases de dados topográficas (Modelo de Elevação Digital) são as bases de dados mais utilizados na análise da propagação porque a topografia tem uma influência significativa na propagação de sinal. As bases de dados topográficas são muito frequentemente também chamadas de bases de dados de terreno e estão baseadas em matrizes de pixel. Cada pixel define a altura topográfica para um determinado local, isto é o centro do pixel. Quanto melhor a grelha mais exacta é a base de dados.

Actualmente são utilizadas grelhas com dimensão de 20 metros. O WinProp™ só suporta valores de elevações em metros, as outras unidades devem ser convertidas para metros. O Proman permite a conversão de dados topográficos com diferentes formatos.

As bases de dados topográficas utilizadas neste projecto foram convertidas no software WallMan para o formato do WinProp™ a partir de um ficheiro (*.asc) obtido a partir do software ArcView™. O ficheiro (*.asc) foi extraído da carta militar nº 235 do IGeoE (Instituto Geográfico do Exército), à escala de 1/25000 a partir do software ArcView

disponível no STIG-UBI, Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica - Universidade da Beira Interior. A Figura 4.1 apresenta a base de dados topográfica do concelho da Covilhã.

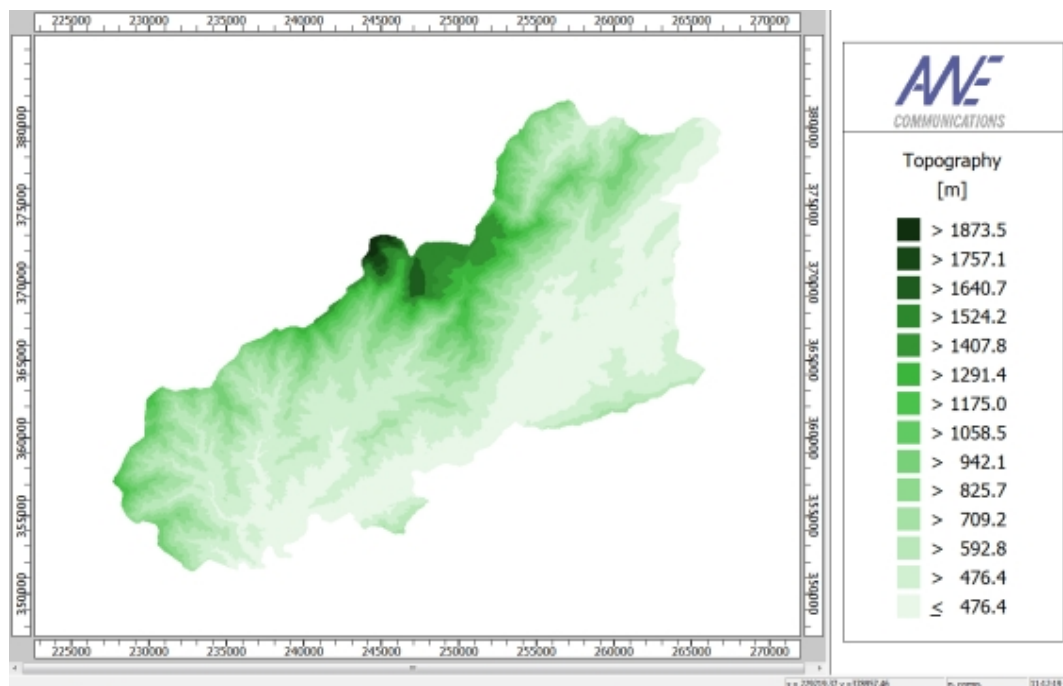


Figura 4.1 - Base de dados topográficos do concelho da Covilhã.

4.1.2.2 Bases de Dados Urbano

As bases de dados de vector urbano contêm uma descrição de cada edifício urbano ou área de vegetação num ambiente urbano. Ao contrário, das bases de dados de pixel topográficos ou de *clutter*, as bases de dados urbanos são bases de dados de vector, isto é, cada edifício é descrito por um vector (polígono) e os atributos, como por exemplo, a altura, material e tipo (edifício, vegetação) são criteriosamente descritos.

Neste trabalho, não foi possível ter acesso a uma base de dados deste tipo, havendo apenas um ficheiro com a informação geográfica da localização dos edifícios, mas que não contem qualquer informação de atributos, como altura, tipos de material, etc.

4.1.2.3 Planeamento de Rede Combinado

Como referido anteriormente, uma das características principais do WinProp™ é o planeamento de redes móveis e sem fios combinado, a partir do qual se podem combinar diferentes cenários como, por exemplo, urbano e rural, e modelos de propagação para uma análise detalhada de ambientes híbridos. Devido ao que foi referido na secção 4.1.2.2, esta característica não foi possível abordar.

4.1.3 Modelos de Propagação no WinProp™

No planeamento de sistemas de rádio móveis, são aplicados modelos de propagação para determinar e prever com maior rigor, as características de propagação para qualquer configuração arbitrária (cenário). As predições são necessárias para um planeamento de cobertura adequado, a determinação dos efeitos de multi-percurso, são a base para um elevado nível do processo de planeamento de rede. O WinProp™ tem vários modelos de propagação para o WiMAX, mas aquele que melhor resultados obteve em [Comi08] foi o *Dominant Path*, optando-se pela sua utilização neste trabalho

Para os diferentes ambientes, é necessário fazer a distinção dos modelos de propagação em termos do fenómeno de propagação física dominante e de especificação da base de dados utilizada, descrevendo o cenário considerado. A Tabela 4.2, apresenta [Winp09] uma avaliação e descrição dos diferentes tipos de célula.

Tabela 4.2 - Descrição dos diferentes tipos de célula [Winp09].

Tipo de célula	Raio Típico da Célula	Localização Típica da Antena da BS
Macrocélula	1 a 30 km	No exterior, montado acima do nível médio do topo do telhado, a altura de todos os edifícios circundantes está abaixo da altura da antena da BS.
Microcélula	Até 1 km	No exterior, montado acima do nível médio do topo do telhado, a altura de todos os edifícios circundantes está abaixo da altura da antena da BS.
Picocélula (<i>indoor</i>)	Até 500 m	Indoor ou exterior (montado abaixo do nível do topo do telhado)

Para células grandes e pequenas, a antena da BS é geralmente instalada acima do nível médio do topo do telhado dos edifícios circundantes. Assim, a atenuação é determinada principalmente pela difracção nos telhados, isto é, os raios principais propagam-se sobre os edifícios. Pelo contrário, nas microcélulas, as antenas da BS são instaladas a baixo nível do topo do telhado dos edifícios circundantes. Neste caso, a propagação é determinada pela difracção ao redor e reflexão em edifícios, o que conduz a efeitos de ondas guiadas nas ruas. São aplicadas picocélulas para fornecer cobertura *indoor* ou para cobrir áreas exteriores muito pequenas. Em qualquer caso, a antena da BS de uma picocélula é instalada dentro de um edifício ou bem abaixo do nível do topo do telhado no exterior.

Os modelos de propagação usados pelo WinProp™ podem ser distinguidos em:

- o Modelos Rurais
 - o Modelo Hata-Okumura, já abordado no Capítulo anterior.
 - o Método da Equação Parabólica, este método utiliza uma avaliação numérica da equação parabólica para calcular a intensidade de campo numa área macrocelular baseada em dados do terreno. Este modelo é muito preciso

porque são implicitamente considerados os diferentes mecanismos de propagação (propagação no espaço livre, reflexão e difracção). Devido ao algoritmo sofisticado, o tempo de cálculo é bastante longo, em comparação com os modelos empíricos.

- o Modelos Urbanos
 - o Modelo COST-231 Wlafisch-Ikegami, abordado no Capítulo anterior.
 - o *Ray-Tracing*, o canal de rádio móvel em ambientes urbanos é caracterizado multipercursos de propagação (*multipath*). Os mecanismos de propagação dominantes nestes cenários são reflexão, difracção, zonas de sombra por obstáculos discretos e as ondas guiadas em ruas. Com uma abordagem de raios ópticos é possível considerar estes efeitos num modelo propagação. Como comprimentos de onda menores, isto é frequências elevadas, é considerado, a propagação de onda torna-se semelhante à propagação da luz. O critério utilizado para esta abordagem de modelação é que o comprimento de onda deveria ser muito menor em comparação com a extensão dos obstáculos considerados, isto é os edifícios para ambientes urbanos. Nas frequências utilizadas para redes de comunicação móveis este critério é suficientemente cumprido.

A Figura 4.2, ilustra um cenário de propagação num ambiente urbano típico.

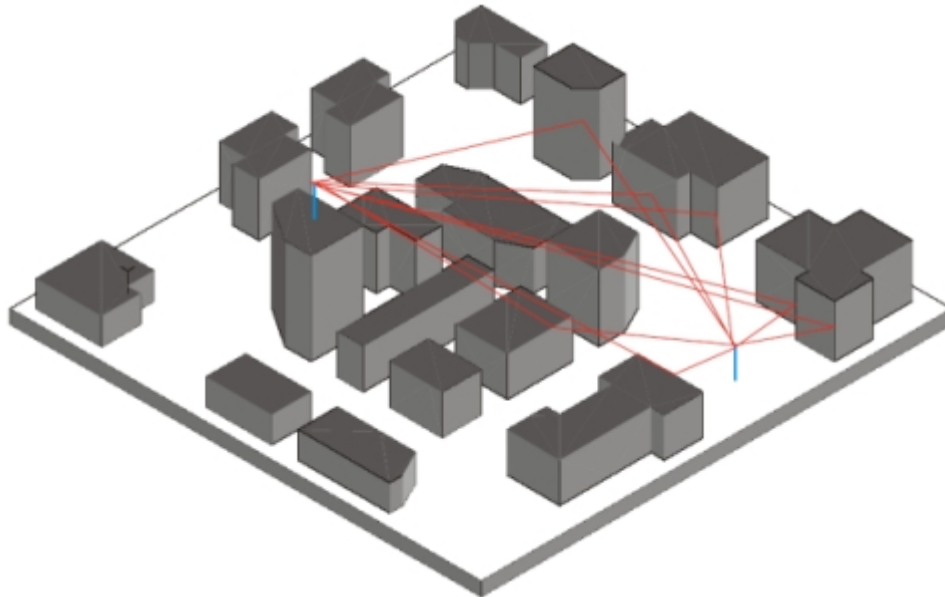


Figura 4.2 - Cenário de propagação num ambiente urbano [Winp09].

Como já referido, o modelo de propagação utilizado no trabalho de simulação foi o *Dominant Path* que é explicado na secção seguinte.

4.1.3.1 Dominant Path

O RDP (*Rural Dominant Path*) é um modelo que é adaptado às predições de encenações rurais, ou em áreas onde somente as bases de dados topográficos estão disponíveis. O algoritmo para a pesquisa do percurso dominante trabalha completamente na modalidade 3D. O modelo *Dominant Path* focaliza no percurso dominante entre o emissor, T_x e receptor, R_x , pois este percurso é responsável pela maior parte da energia. O algoritmo do modelo é subdividido em dois passos. Primeiro determina os vários percursos dominantes (geometria), e depois, faz predição das atenuações ao longo desses percursos.

A Figura 4.3 apresenta um cenário onde o emissor T_x fica situado em qualquer ponto, o percurso dominante de T_x para R_x tem que conduzir, por cantos convexos, ao receptor.

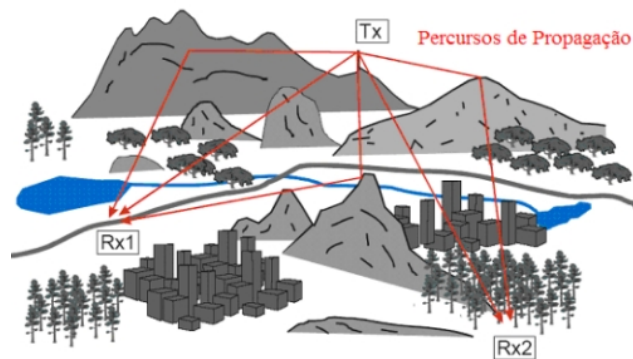


Figura 4.3 - Cenário para uma predição de terreno [Winp09].

Para a determinação do percurso, é calculada uma árvore com todos cantos convexos. Todos os cantos visíveis examinados, são novos ramos na árvore. Como se apresenta na Figura 4.4, o canto da árvore começa com os cantos visíveis do T_x . O receptor R_x é também incluído na árvore. A cada tempo, o receptor é encontrado na árvore, os cantos, ao longo do percurso, podem ser determinados seguindo os ramos anteriores a T_x . A Figura 4.4, apresenta que existe mais de um percurso entre T_x e R_x . Depois do cálculo da árvore, o algoritmo tem de decidir qual percurso é o melhor "dominante". Isto termina, comparando as atenuações dos diferentes percursos.

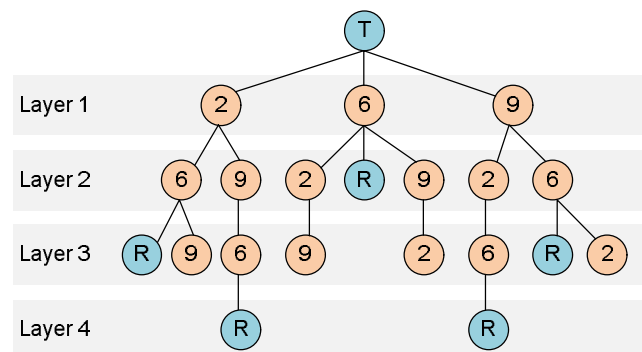


Figura 4.4 - Estrutura de árvore construída através de algoritmo [WWWL05].

A predição da atenuação ao longo do percurso é determinada utilizando a expressão seguinte

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10p \log(l) + \sum_{i=1}^n f(\theta, i) + \sum_{j=1}^m t_j - \Omega \quad (5.1)$$

Onde L é a atenuação em dB de um percurso com um comprimento l (em metros), λ é o comprimento de onda, $f(\theta, i)$ é uma função que determina a atenuação de interacção em dB, dada pelo gráfico apresentado na Figura 4.4. O símbolo θ é o ângulo entre a direcção anterior e a nova direcção de propagação, e i é a ordem da interacção, por exemplo $i=2$, significa a segunda interacção neste percurso de propagação. O factor p depende da situação de visibilidade entre o *pixel* em causa e o emissor. A adaptação do parâmetro p para a situação, permite diferentes expoentes de atenuação e a individualização dos pontos de ruptura, que dependem da situação actual. O modelo distingue entre a situação LoS e OLoS (*Obstructed LoS*), que tem pelo menos uma difracção mas nenhuma transmissão, e NLoS (*Non LoS*), que tem pelo menos uma transmissão, Ω é o factor de onda guiada descrito em [WWWL05], Figura 4.5.

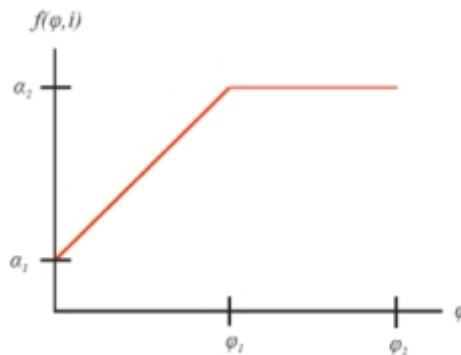


Figura 4.5 - Função para as perdas de interacção [WWWL05].

A atenuação por reflexão, de obstáculos ao longo do percurso, bem como a distância deles para o percurso, influenciam o valor do parâmetro Ω . Para a determinação da atenuação em cenários *indoor*, as transmissões através das paredes têm que ser consideradas adicionalmente, t_j significa a atenuação de transmissão do número de j paredes, isto é t_2 é a atenuação de transmissão da segunda parede penetrada pelo percurso dominante.

4.1.4 Definição de Parâmetros para Simulação

Nesta secção descrevem-se os passos de configuração dos parâmetros e variáveis para a simulação o mais rigorosa possível sistema IEEE 802.16-2004 (cujas características técnicas se apresentam no Anexo A) implementado na cidade da Covilhã.

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetros	Valores
Interface ar	IEEE 802.16-2004
Número de células	1
Número de sectores por células	1
Frequência de operação	3.5 GHz
Modo de <i>duplexing</i>	FDD
Múltiplo acesso	FDMA/OFDM
Largura de banda	3.5 MHz
Separação DL/UL	100 MHz
Padrão de antena	WiMAX 3500 MHz omnidireccional
Altura da BSs	15 e 21 metros
Potência máxima da BS	28 dBm (19.95 Watts)
Ganho de antena da BS	10 dBi
Modelo de Propagação	<i>Dominant Path</i>

Na Figura 4.6, começa por se definir a base de dados a utilizar.

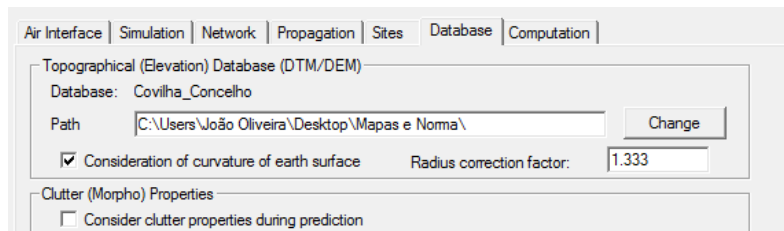


Figura 4.6 - Introdução da base de dados.

Para a configuração da interface ar, usou-se um ficheiro pré-definido da norma IEEE 802.16-2004 (*.wst) fornecido por [Winp09], sendo necessário a configuração relativa a portadoras e esquema de modulação, de acordo com o equipamento implementado, Figuras 4.7 e 4.8.

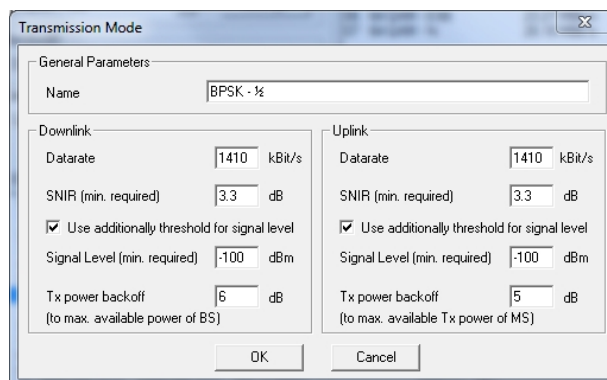


Figura 4.7 - Configuração dos esquemas de modulação.

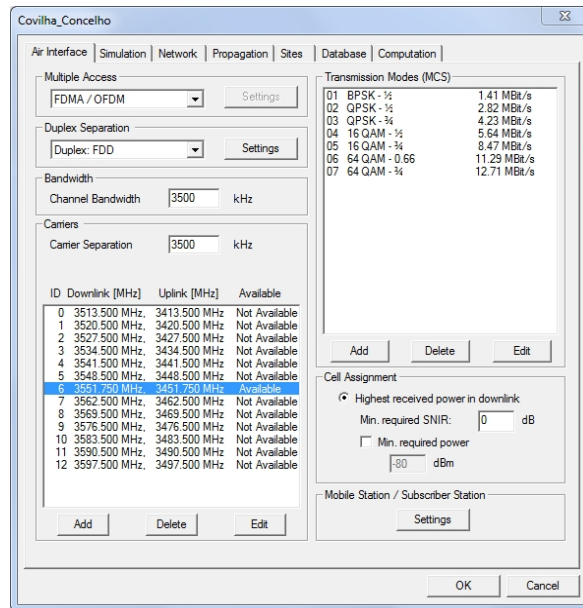


Figura 4.8 - Configuração da interface ar.

Figura 4.9, ilustra a configuração da célula implementada, posicionando os dados relativos à localização da estação base, definição da portadora, e escolha do tipo de antena.

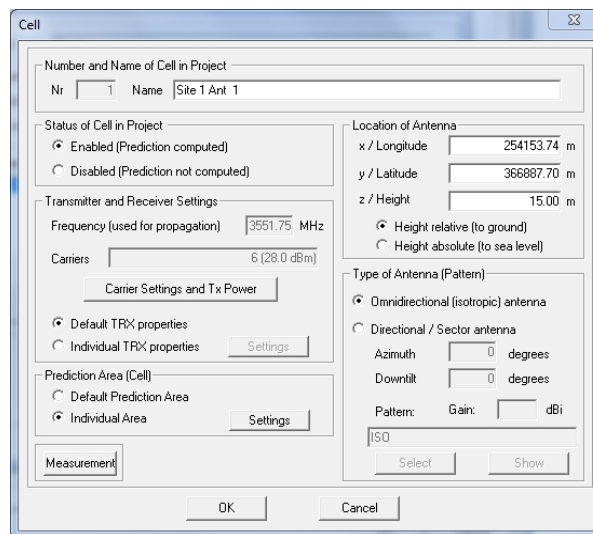


Figura 4.9 - Configuração dos dados relativos à célula.

Depois de configurados todos os parâmetros, basta escolher as variáveis que se pretende simular, tanto os relativos à propagação como em relação à rede propriamente dita, e escolher o modelo de propagação desejado, Figuras 4.10 e 4.11.

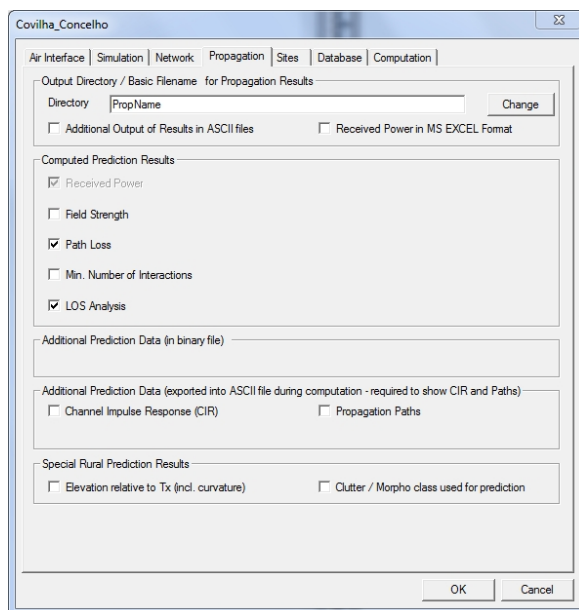


Figura 4.10 - Escolha das variáveis a simular.

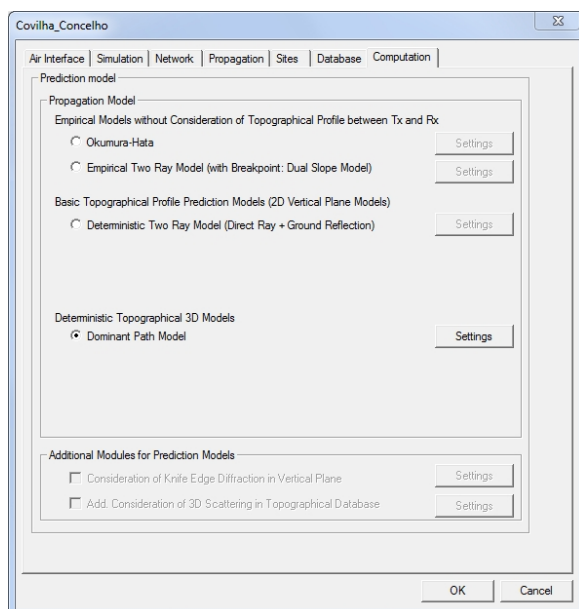


Figura 4.11 - Escolha do modelo de propagação.

4.1.5 Resultados Obtidos

A simulação do planeamento desta rede, para a célula instalada na cidade da Covilhã, foi elaborada tendo em conta as especificações do equipamento WiMAX BreezeMAX 3000 da Alvarion, a frequência da portadora em uso, e os parâmetros apresentados na Tabela 4.3. O equipamento BreezeMAX 3000 é a plataforma WiMAX da Alvarion para as bandas de frequências licenciadas dos 3-4 GHz. O objectivo maior, desta simulação foi o de prever a cobertura da célula implementada e de construir um mapa de LoS, para ser usado como informação complementar para a realização das campanhas experimentais numa célula com

BS no telhado da FCS-UBI.. Foi simulado o mesmo cenário na cidade da Covilhã para duas alturas diferentes, 15 e 21 metros, pois esta foi alterada com vista a análise de possível optimização da cobertura de célula. Estes resultados apresentam apenas como informação geográfica os dados topográficos, sendo necessário trabalhar os resultados através da ferramenta ArcGIS™, de modo a acrescentar informação geográfica, tornando mais perceptível ao leitor a análise dos dados. Para isso, foi necessário testar os formatos de saída do ProMAN, de modo a serem trabalhados na ferramenta de informação geográfica. O formato escolhido foi o Geo-BitMAP, este formato permite guardar em formato de imagem (*.tiff) e cria um ficheiro auxiliar com a informação geográfica (coordenadas Hayford-Gauss-Militar Lisboa.). As seguintes secções apresentam alguns resultados obtidos no formato original.

4.1.5 Antena BS a 15 metros de altura

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, apresentam as cartas com as localizações de LoS, a potência de sinal e a atenuação para uma altura da BS, h_{BS} igual a 15 metros, respectivamente.

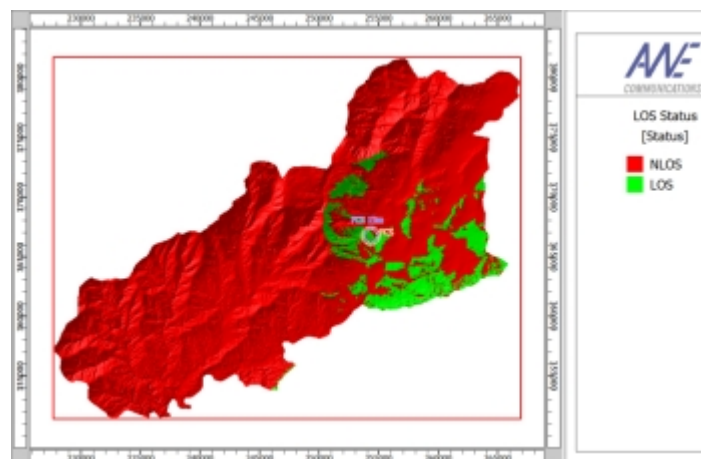


Figura 4.12 - Carta de LoS, com $h_{BS} = 15$ metros.

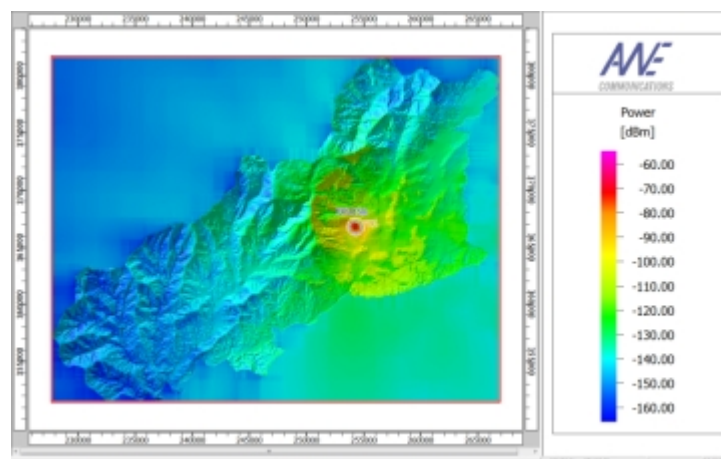


Figura 4.13 - Carta da potência de sinal, com $h_{BS} = 15$ metros.

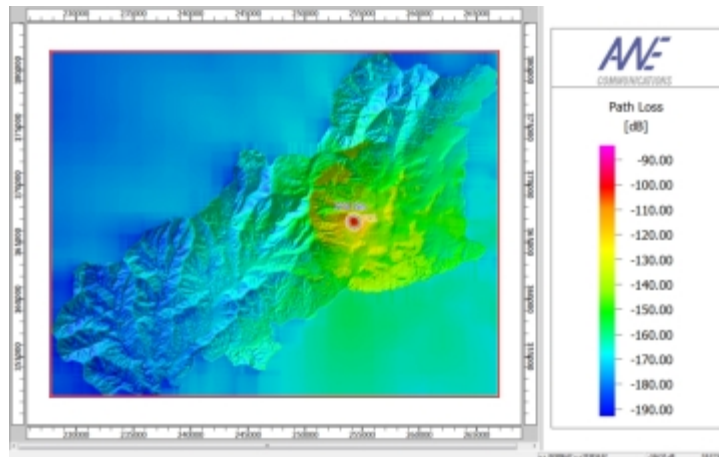


Figura 4.14 - Atenuação do sinal, com $h_{BS} = 15$ metros.

4.1.5 Antena BS a 21 metros de altura

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam o mapa com as localizações de LoS, atenuação para uma altura da BS e a potência de sinal, h_{BS} igual a 15 metros, respectivamente.

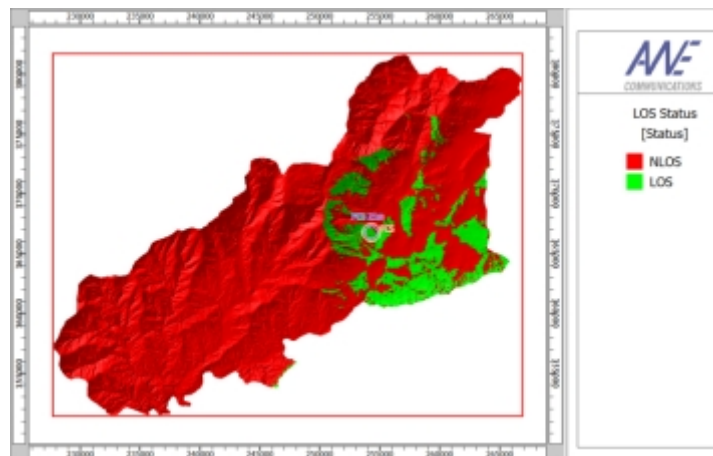


Figura 4.15 - Carta de NLoS, com $h_{BS} = 21$ metros.

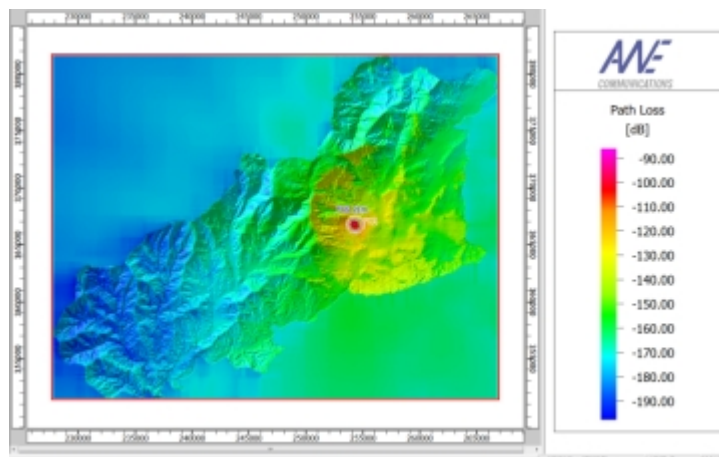


Figura 4.16 - Carta da atenuação do sinal, com $h_{BS} = 21$ metros.

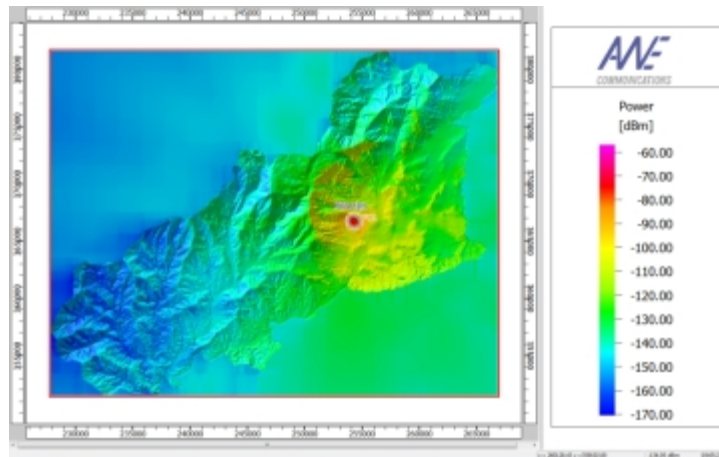


Figura 4.17 - Potência de sinal, com $h_{BS} = 21$ metros.

4.2 ArcGIS™

O programa ArcGIS™ é um software que serviu de auxílio ao tratamento de dados, que permitiu trabalhar os dados resultantes da simulação e trabalhá-los em termos de mapas geográficos e condições de LoS e NLoS.

4.2.1 Introdução

Utilizou-se como ferramenta de tratamento de dados geográficos o ArcGIS™ da ESRI, pois trata-se de uma família de produtos de software para a criação, gestão, integração e análise de dados geográficos. A coleção de componentes de software que compõem o ArcGIS™ é conhecida como ArcObjects. A personalização/programação é realizada utilizando as capacidades de *scripting* do Visual Basic for Applications (VBA) [MiBo01], incluído no ArcGIS, através de uma linguagem de programação COM-compliant como Visual Basic. O componente de software utilizado foi o ArcView que é um dos pontos de entrada para a arquitetura ArcGIS.

O ArcView é um software de SIG (Sistema de Informação Geográfica) completo para visualização, análise, criação e gestão de dados com uma componente geográfica. A maior parte dos dados tem uma componente que pode ser ligada a um lugar: uma morada, código postal, uma localização por GPS, um bloco dos censos, uma cidade, região, país, ou outra localização. O ArcView possibilita que visualize, explore e analise estes dados, de modo a revelar padrões, relações e tendências que não são óbvias nas bases de dados, folhas de cálculo ou pacotes estatísticos.

O ArcView apresenta uma interface Windows intuitiva para o utilizador e inclui VBA na componente de personalização/programação. O ArcView é constituído pelas três seguintes aplicações desktop [ESRI10]:

- o ArcMap, é a aplicação desktop para tarefas baseadas em mapas incluindo cartografia, análise e edição. Esta aplicação permite:
 - o Visualizar dados geográficos identificando novos padrões e distribuições dos dados geográficos;
 - o Criar mapas para transmitir estudos e resultados de uma forma eficiente;
 - o Resolver questões de análise espacial identificando relações entre os dados geográficos;
 - o Apresentar resultados em mapas de muita qualidade e criar apresentações interactivas que ligam gráficos, tabelas, fotografias, imagens e outros elementos aos dados do mapa;
 - o Desenvolver botões para automatizar tarefas e aplicações independentes baseadas em componentes do ArcMap a partir do ambiente de personalização/programação do ArcMap.
- o ArcCatalog, com esta aplicação é possível procurar, gerir, criar e organizar dados geográficos e alfanuméricos. Suporta vários standards para metadados⁷, permitindo criar, editar e visualizar informação acerca dos dados. Contém editores para introduzir metadados, uma estrutura para o armazenamento destes e folhas de propriedades para visualizar os dados. Permite também fazer conversões dos dados para diferentes formatos.
- o ArcToolbox, é uma aplicação que contém ferramentas SIG usadas para processamento de dados geográficos. Contém, também, um vasto conjunto de ferramentas para geoprocessamento, conversão de dados, gestão de folhas de mapas, análise de sobreposição, projecção de mapas, etc.

Neste trabalho, apenas foi usada a aplicação ArcMAP com a finalidade a tratar os dados obtidos da simulação, principalmente no aspecto dos mapas de LoS e NLoS, de modo a permitir separar os dados recolhidos durante as medições em zonas distintas de LoS e de NLoS para uma melhor análise.

4.2.2 Tratamento de Dados

No tratamento dos dados com a ferramenta ArcGIS™, elaboraram-se três layers, ou seja áreas de trabalho. Em primeiro lugar, e mais simples, criou-se mapas com a dimensão total do concelho da Covilhã. Para isso, criou-se uma *layer* com a informação resultante da simulação efectuada no Winprop™, que já traz a ela associada as características topográficas

⁷ Metadados, são dados sobre outros dados. Um item de um metadado pode dizer do que se trata aquele dado, geralmente uma informação inteligível por um computador. Os metadados facilitam o entendimento dos relacionamentos e a utilidade das informações dos dados [Wiki10].

do terreno e restou adicionar ponto de referência (localização das freguesias) e retirando toda informação que pudesse estar fora das zonas limítrofes do concelho.

Em segundo lugar, no intuito de tornar a informação mais perceptível ao leitor, trabalhou-se os dados numa escala maior, de modo, a ser visíveis mais pontos de referência, como por exemplo ruas ou áreas conhecidas. Para isto, criou-se uma *layer* contento as cartas cartográficas da cidade, que foi onde se concentrou as campanhas experimentais, e sobrepôs-se a informação resultante das simulações., que como tem o mesmo sistema de coordenadas (Hayford-Gauss-Militar Lisboa), não houve problema de interpolação de dados. Nota ainda, para o pormenor de que as imagens resultantes do Winprop™ são têm o fundo a branco, tendo de se considerar a cor branca (no sistema de cores RGB⁸), uma não cor, Figura 4.18 e 4.19.

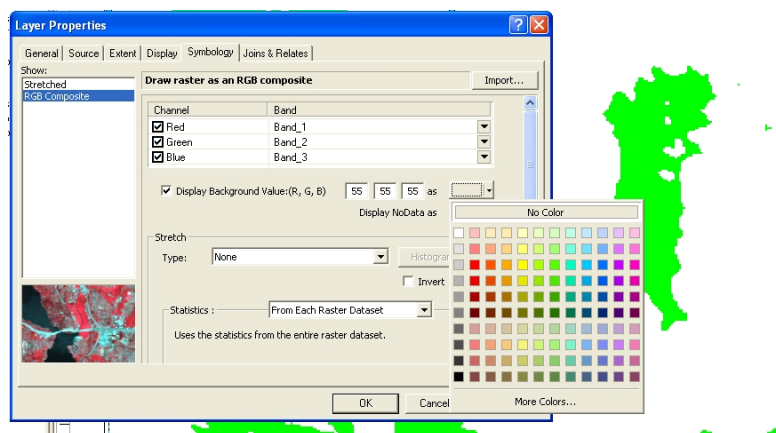


Figura 4.18 - Configuração da cor de fundo da imagem resultante do Winprop™.

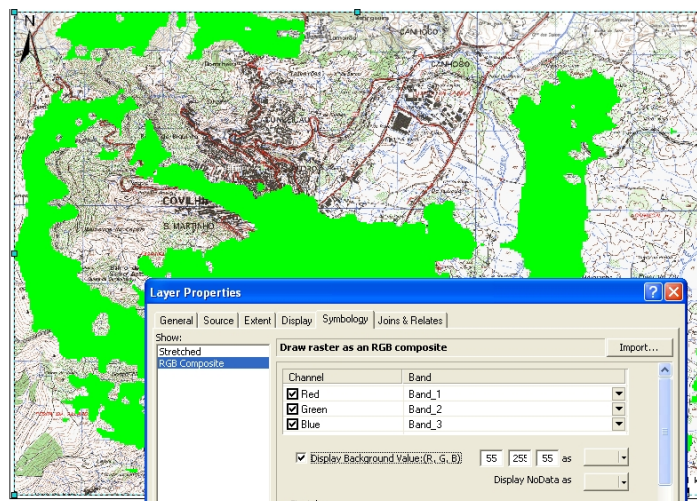


Figura 4.19 - Resultado após tratamento da cor de fundo.

⁸ O modelo de cores RGB (vermelho, verde e azul) baseado na teoria de visão colorida tricromática, de Young-Helmholtz, e no triângulo de cores de Maxwell. [Wiki10]

Por último e o objectivo principal, trabalhar os dados de modo a separar os valores adquiridos nas campanhas experimentais, por zonas de LoS e NLoS. Neste ponto, importou-se os mapas simulados para LoS e NLoS de ambos os cenários (leia-se alturas da estação base diferentes) e após transformar a imagem obtida no Winprop™(*.tiff) para um *shapefile*⁹ em formato vectorial, converteu-se as linhas de cor (verde e vermelho dos mapas) em polígonos, permitindo criar duas matrizes diferentes dentro do mesmo ficheiro de imagem, Figura 4.20. Na criação da Gridcode, bastou definir através do sistema de cores RGB, as cores representativas LoS e NLoS.

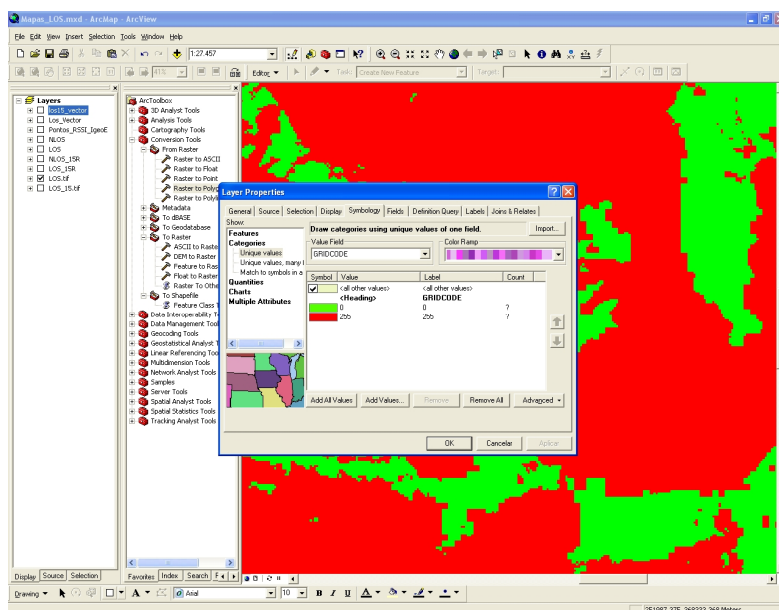


Figura 4.20 - Criação de contorno das zona de LoS e NLoS.

Após esta transformação, e tendo em conta o objectivo de analisar os dados adquiridos experimentalmente, foi necessário importá-los convertê-los para o sistema de coordenadas Hayford-Gauss-Militar Lisboa, porque os dados experimentais encontravam-se no sistema WGS 84 (*World Geodetic System*), através da aplicação ArcToolbox, Figura 4.21.

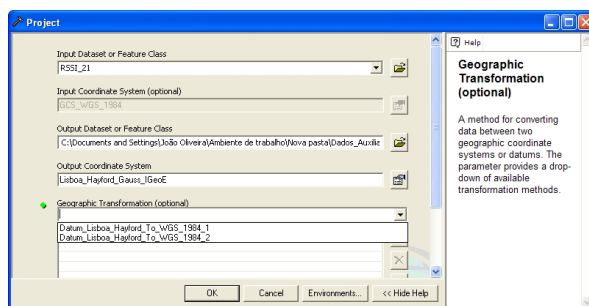


Figura 4.21 - Conversão do sistema de coordenadas dos dados adquiridos experimentalmente.

⁹ Formato de informação geoespacial para sistemas de informação geográfica. Foi desenvolvido e regulado pela ESRI.

Depois de importados os dados, Figura 4.22, bastou criar uma condição, em que se define, quais os pontos contidos no interior das zonas LoS ou NLoS. Para isso, impõe-se como condição a cor destes, isto é, um ponto está no interior do polígono verde, apresenta condições de LoS.

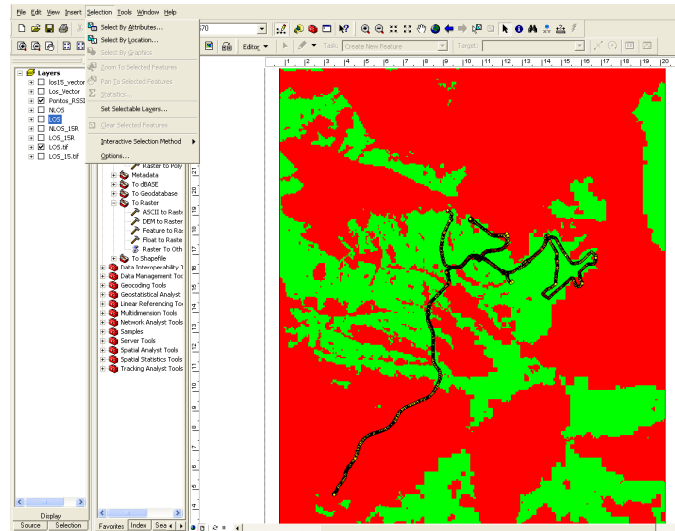


Figura 4.22 - Pontos de medição, após transformado o seu sistema de coordenadas.

Após esta operação, os dados adquiridos experimentalmente estão identificados pela sua localização de LoS ou NLoS, Figura 4.23. Apesar de se ter transformado o sistema de coordenadas dos pontos geográficos de medição, os atributos de cada *shapefile*, LoS ou NLoS, mantém os dados no sistema de coordenadas com que foi importado, WGS 84.

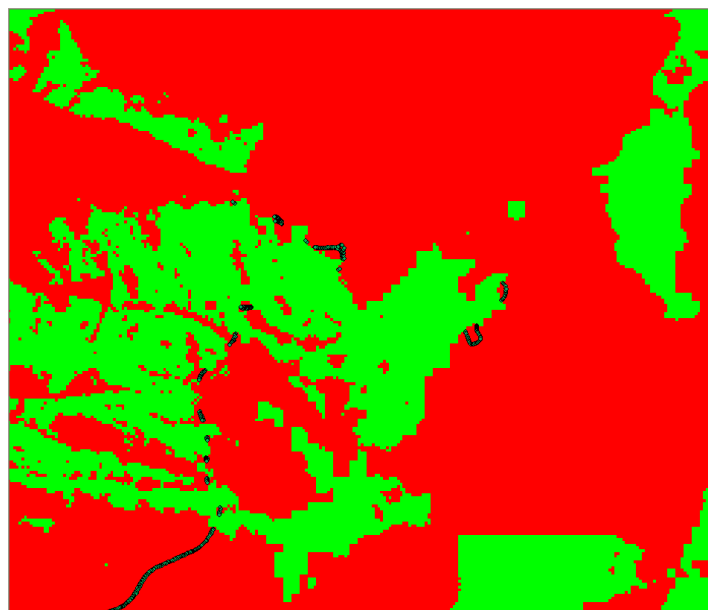


Figura 4.23 - Pontos de medição em condições de NLoS.

4.2.3 Cartas com os Resultados de Cobertura Obtidos

Esta secção apresenta os resultados obtidos após tratamento dos resultados obtidos no Winprop™ no ArcGIS™. As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam resultados de LoS e NLoS.

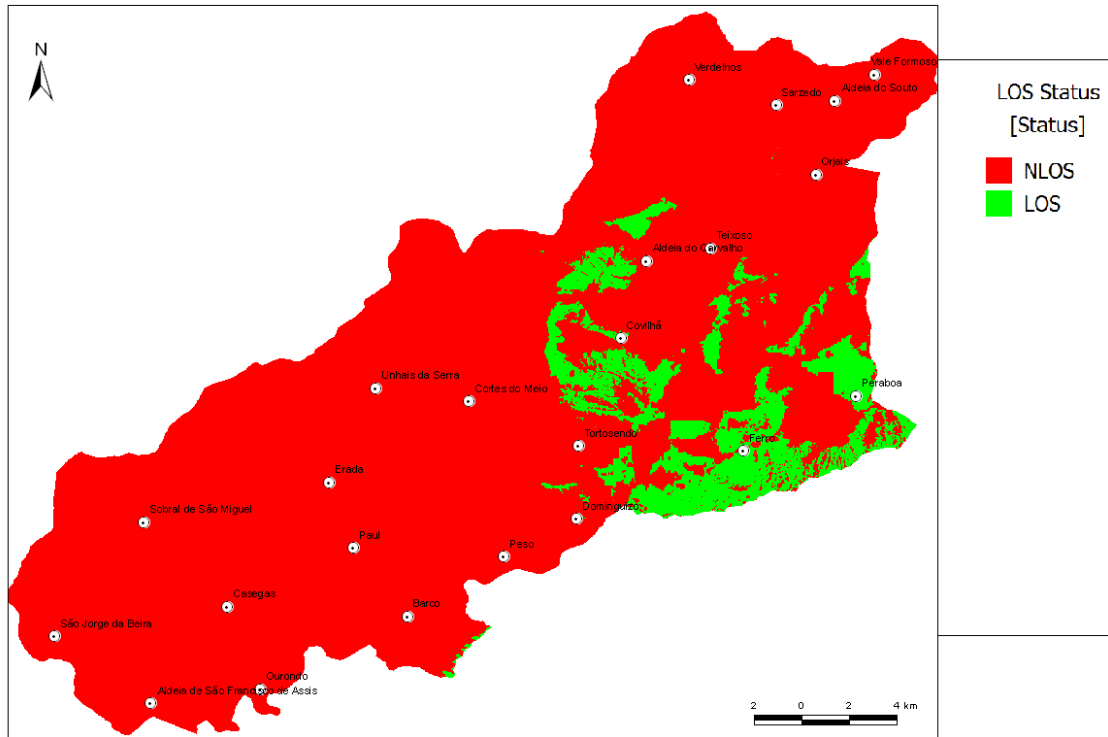


Figura 4.24 - Carta de condições de LoS e NLoS, com h_{BS} a 15 metros.

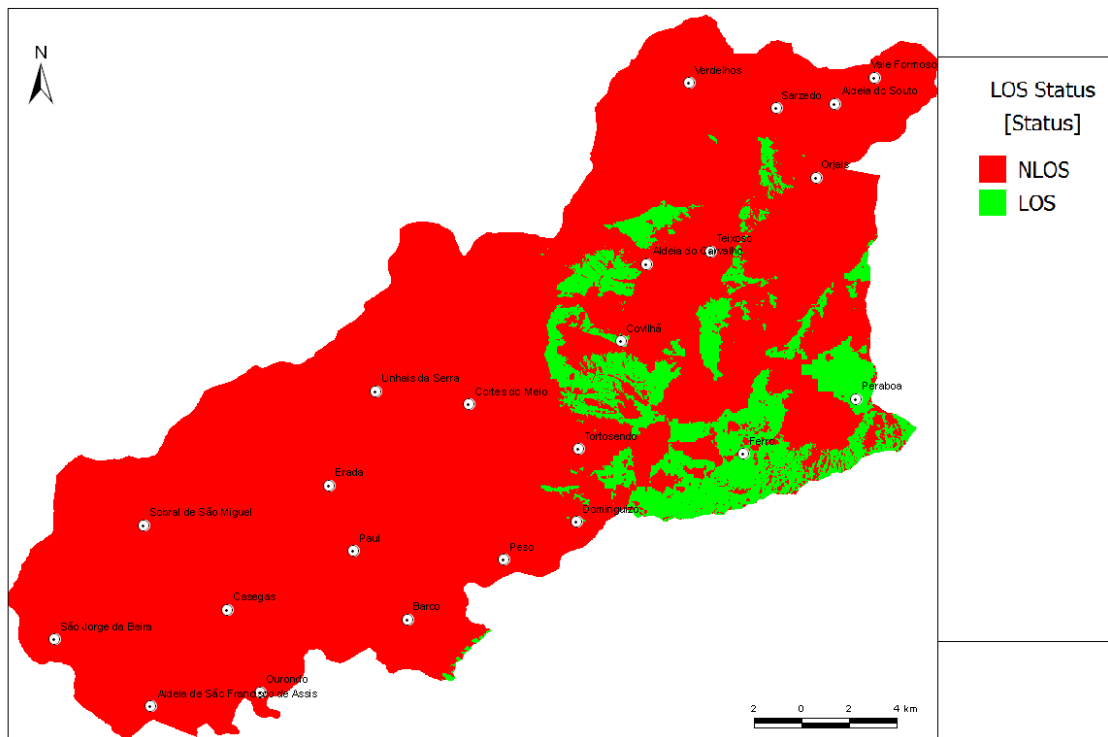


Figura 4.25 - Carta de condições de LoS e NLoS, com h_{BS} a 21 metros.

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam os mapas de atenuação para os dois cenários.

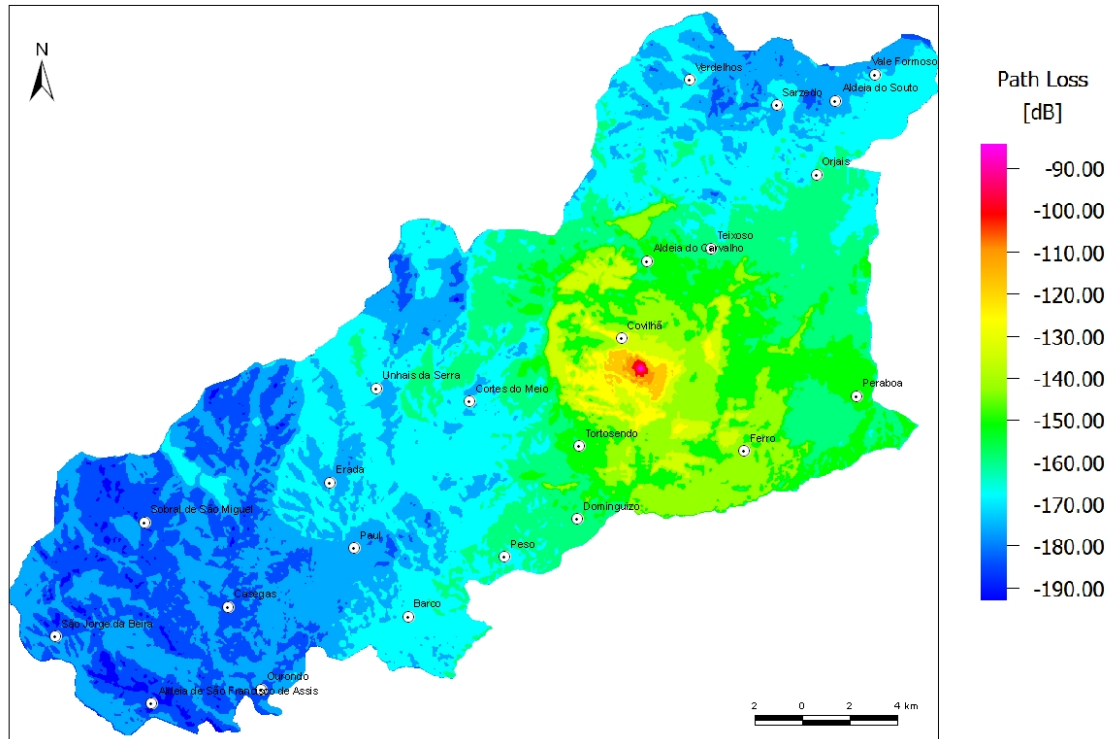


Figura 4.26 - Carta da atenuação, com h_{BS} a 15 metros.

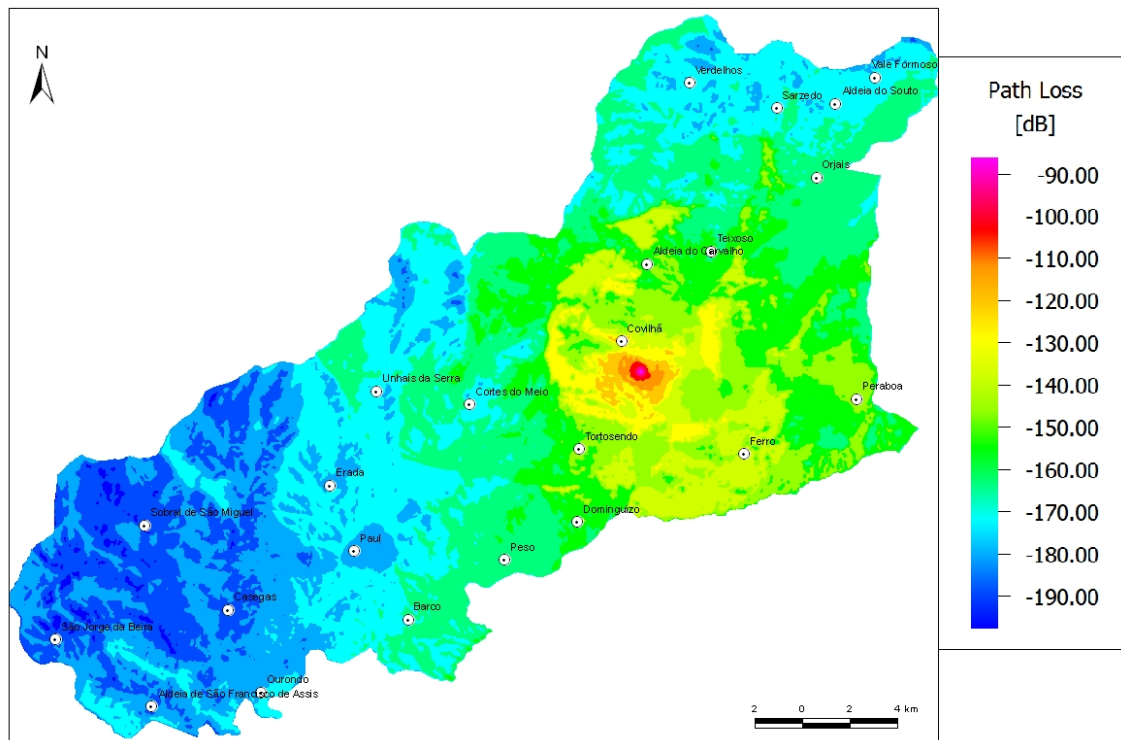


Figura 4.27 - Carta da atenuação, com h_{BS} a 21 metros.

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam a potência de sinal nos dois cenários.

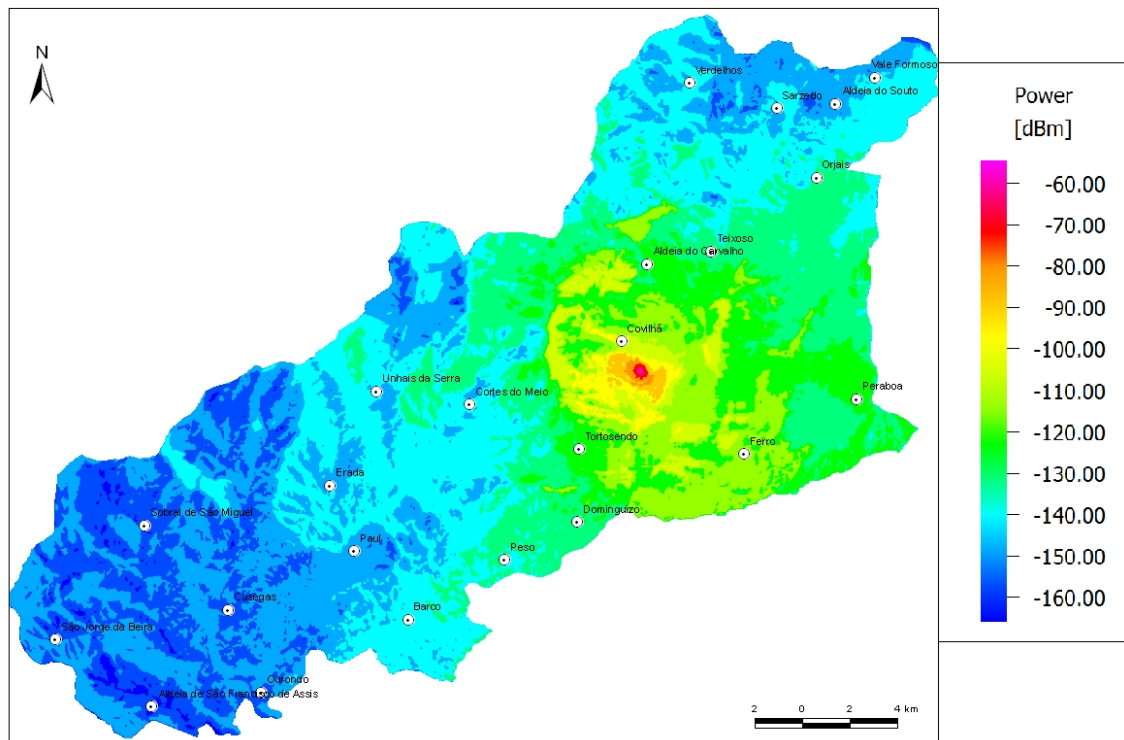


Figura 4.28 - Carta da potência de sinal, com h_{BS} a 15 metros.

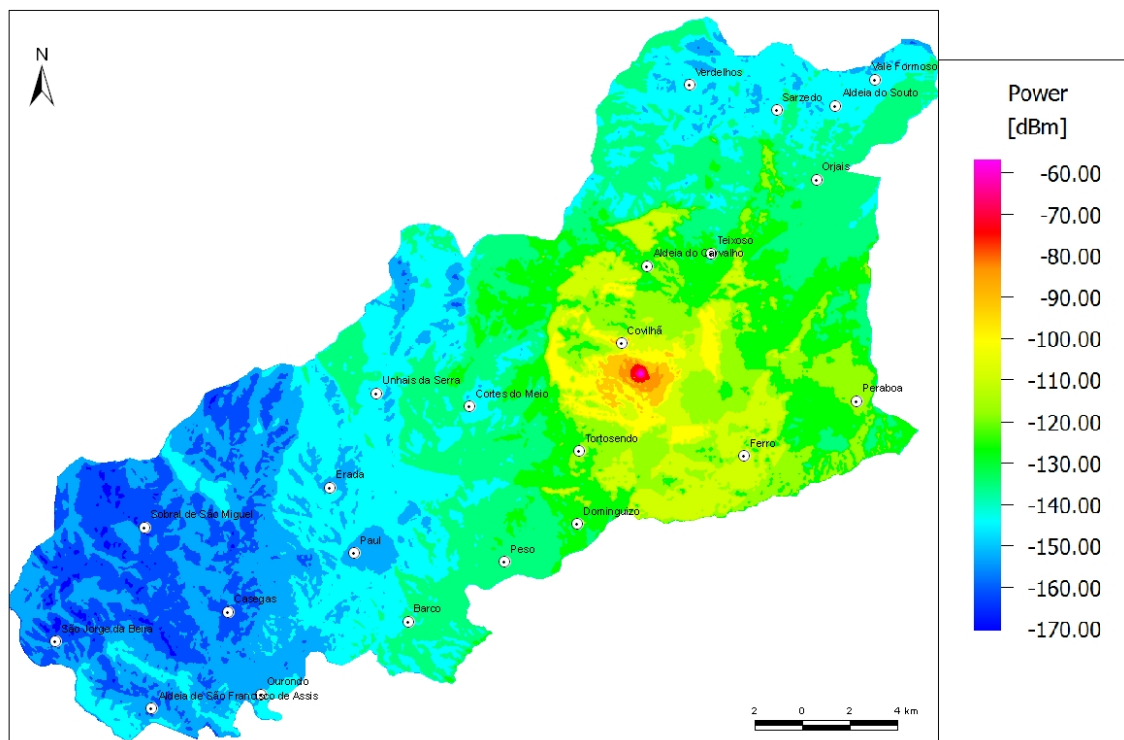


Figura 4.29 - Carta da potência de sinal, com h_{BS} a 21 metros.

As Figuras 4.30 e 4.31 apresentam os resultados, de forma expandida, na tentativa de se tornarem mais perceptíveis, certos pontos de referência na cidade da Covilhã

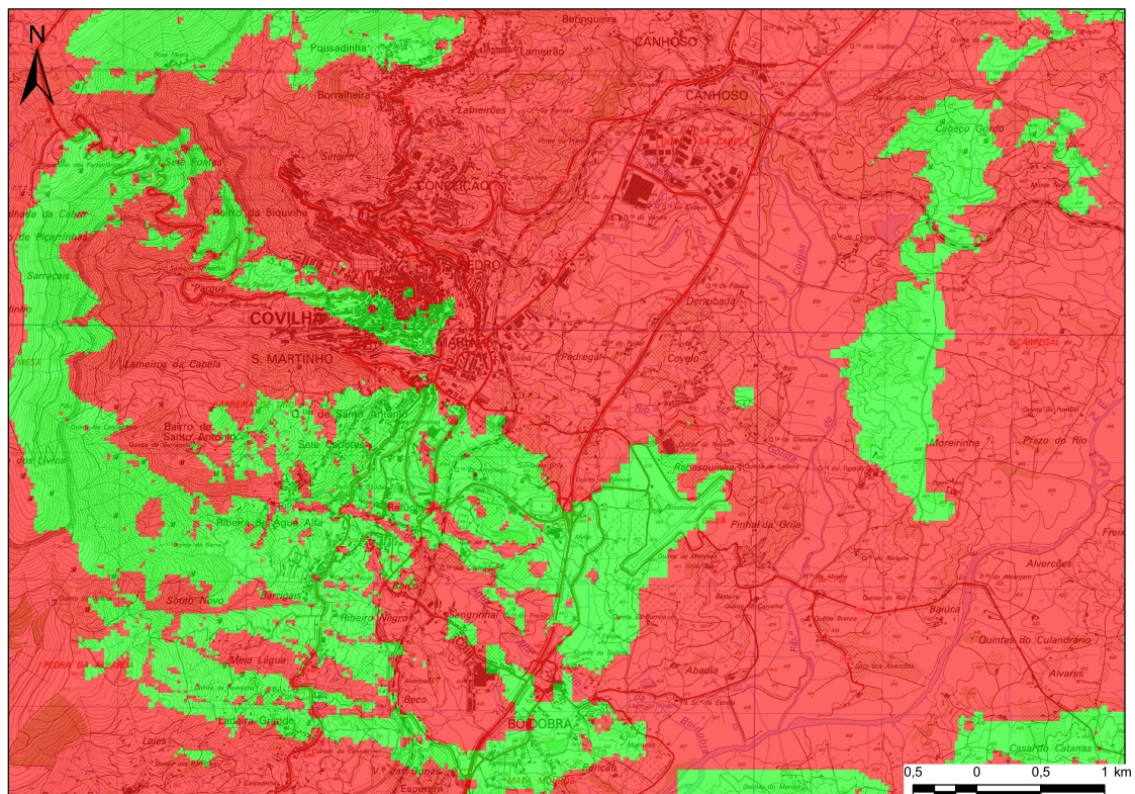


Figura 4.30 - Carta expandida das condições de LoS e NLoS, com h_{BS} a 15 metros.

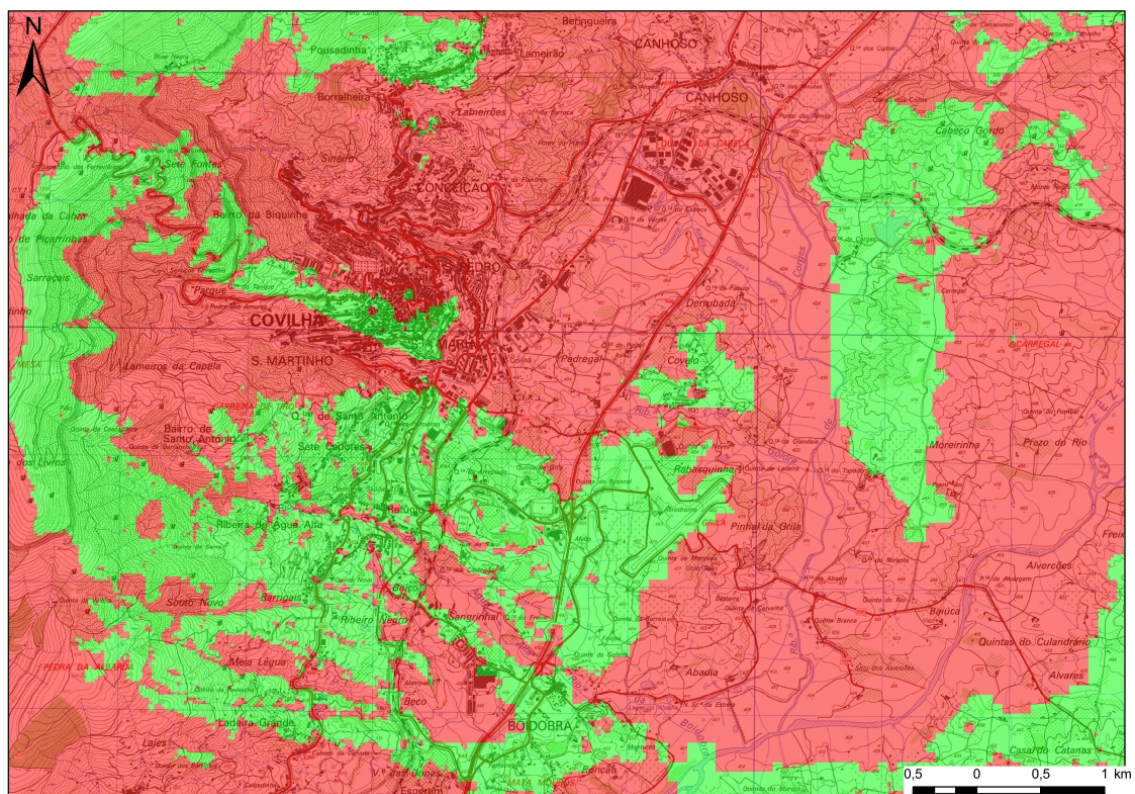


Figura 4.31 - Carta expandida das condições de LoS e NLoS, com h_{BS} a 21 metros.

As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam a cobertura da BS da cidade da Covilhã.

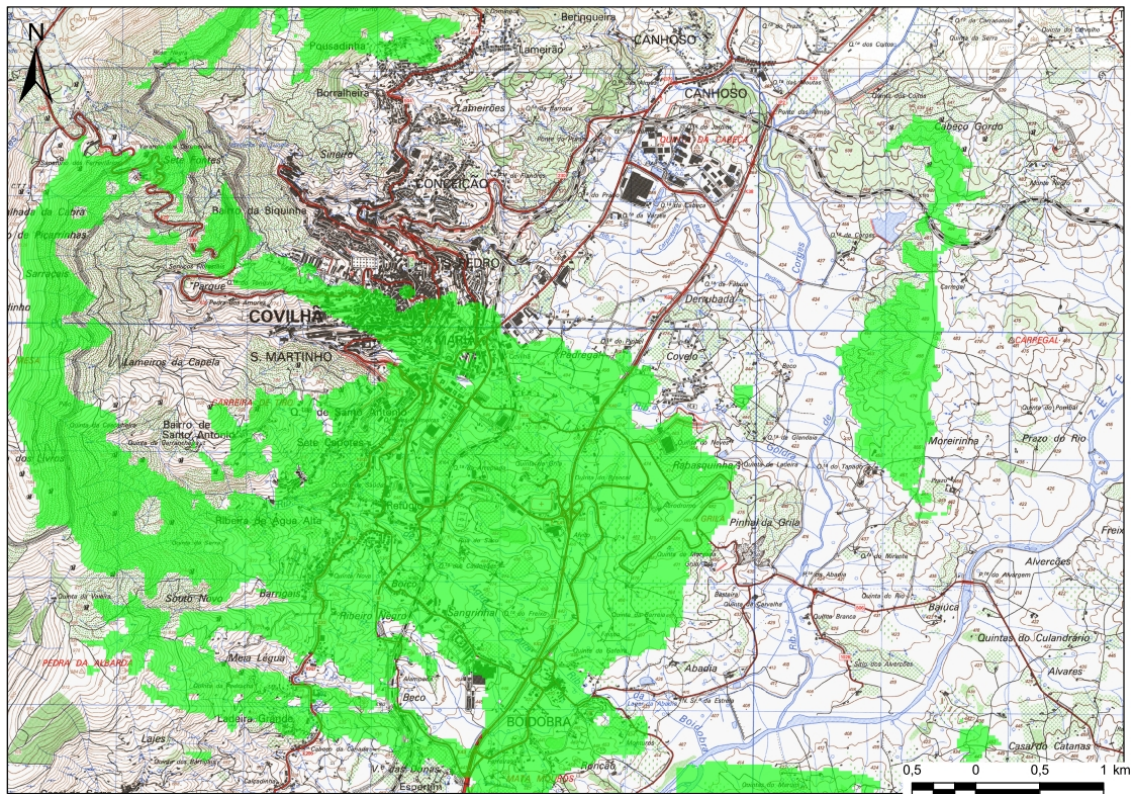


Figura 4.32 - Carta expandida da cobertura da BS, com h_{BS} a 21 metros.

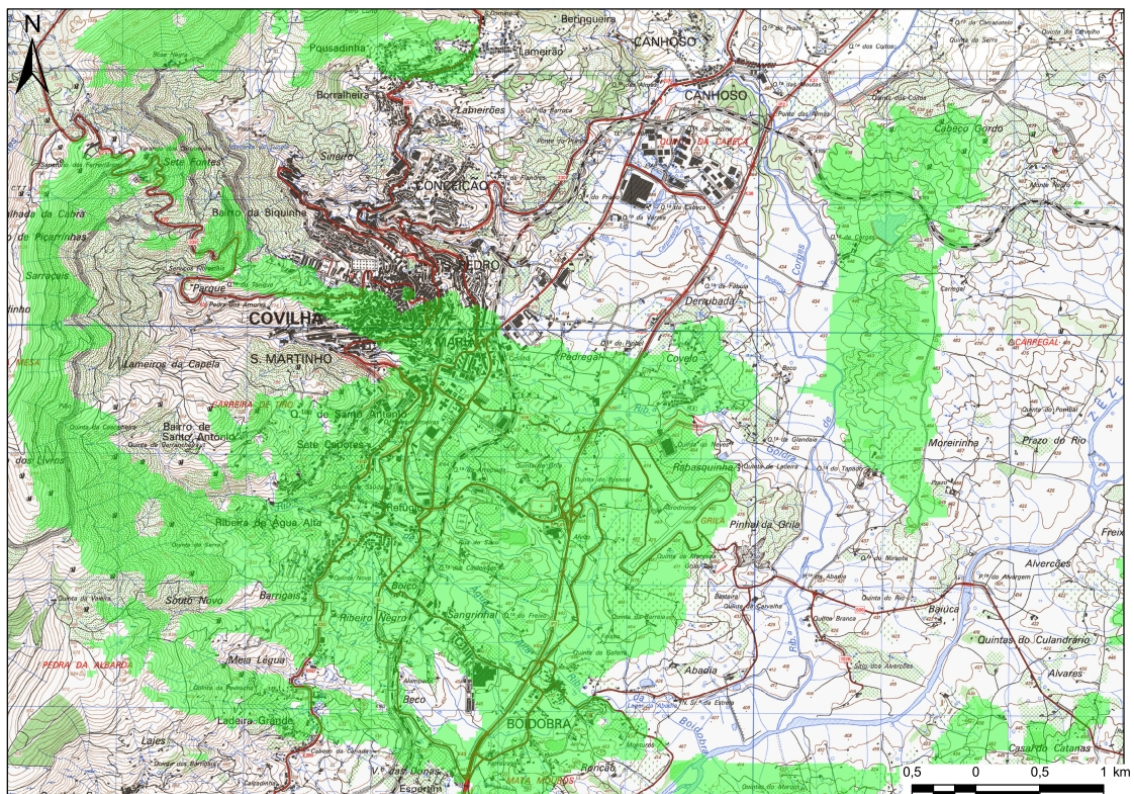


Figura 4.33 - Carta expandida, da cobertura da BS, com h_{BS} a 21 metros.

As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam potência de sinal, para ambos os cenários.

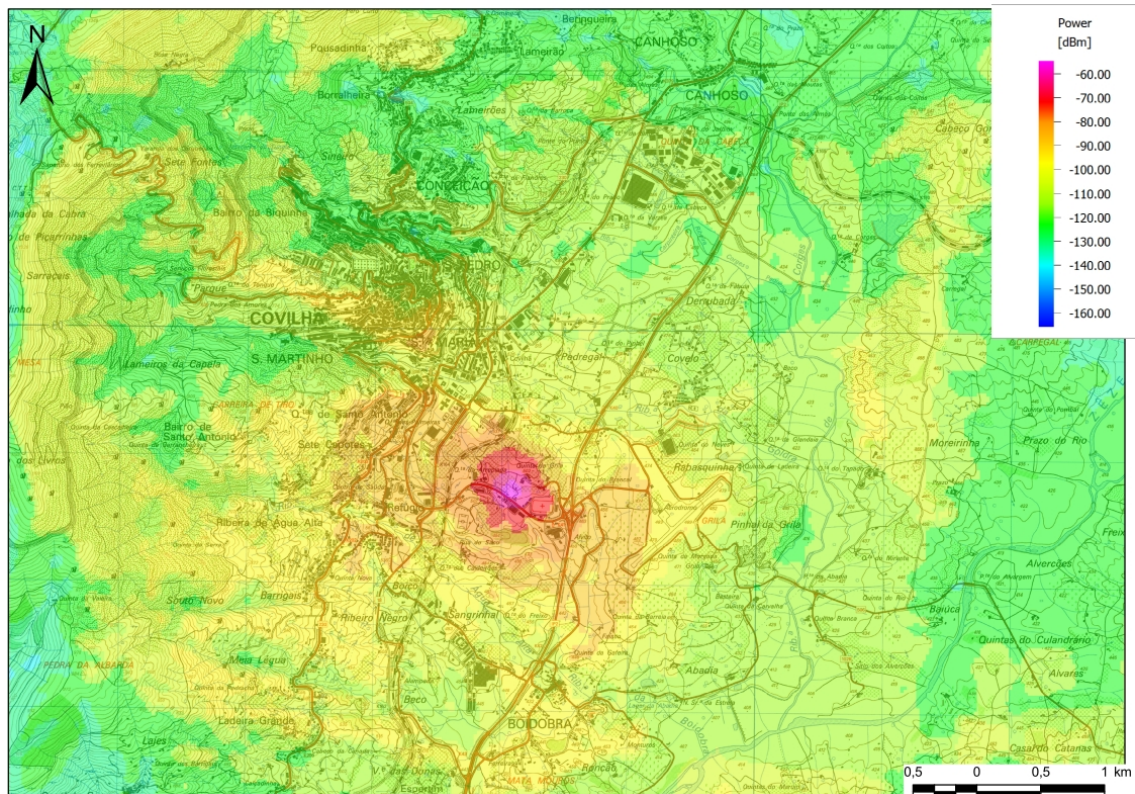


Figura 4.34 - Mapa expandido, da potência de sinal, com h_{BS} a 15 metros.

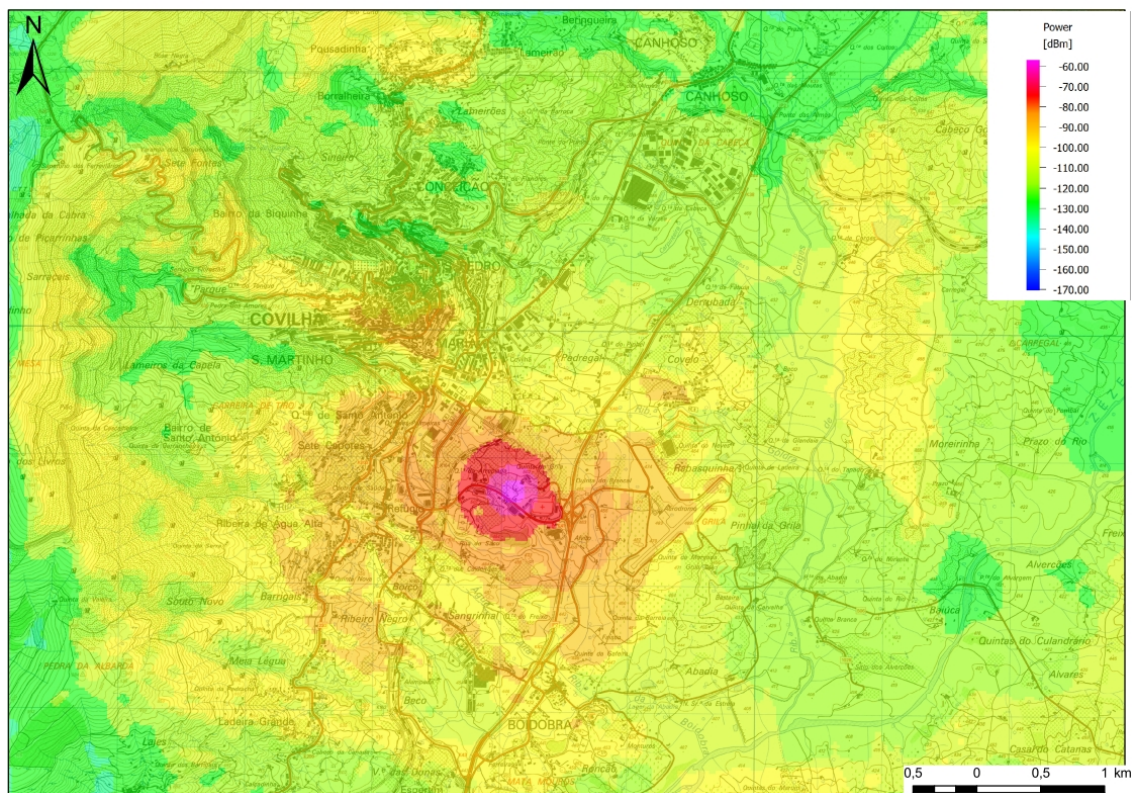


Figura 4.35 - Carta expandida, da potência de sinal, com h_{BS} a 21 metros.

As Figuras 4.36 e 4.37 apresentam a atenuação do sinal, para ambos os cenários.

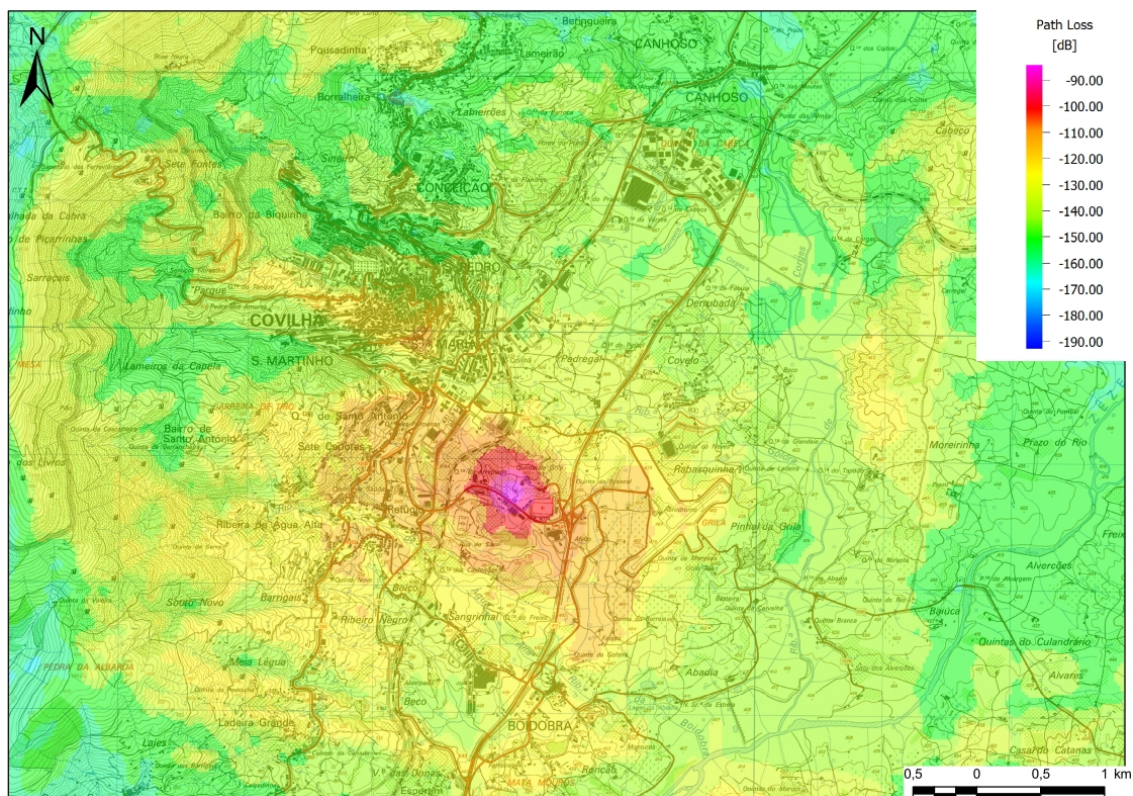


Figura 4.36 - Carta expandida da atenuação do sinal, com h_{BS} a 15 metros.

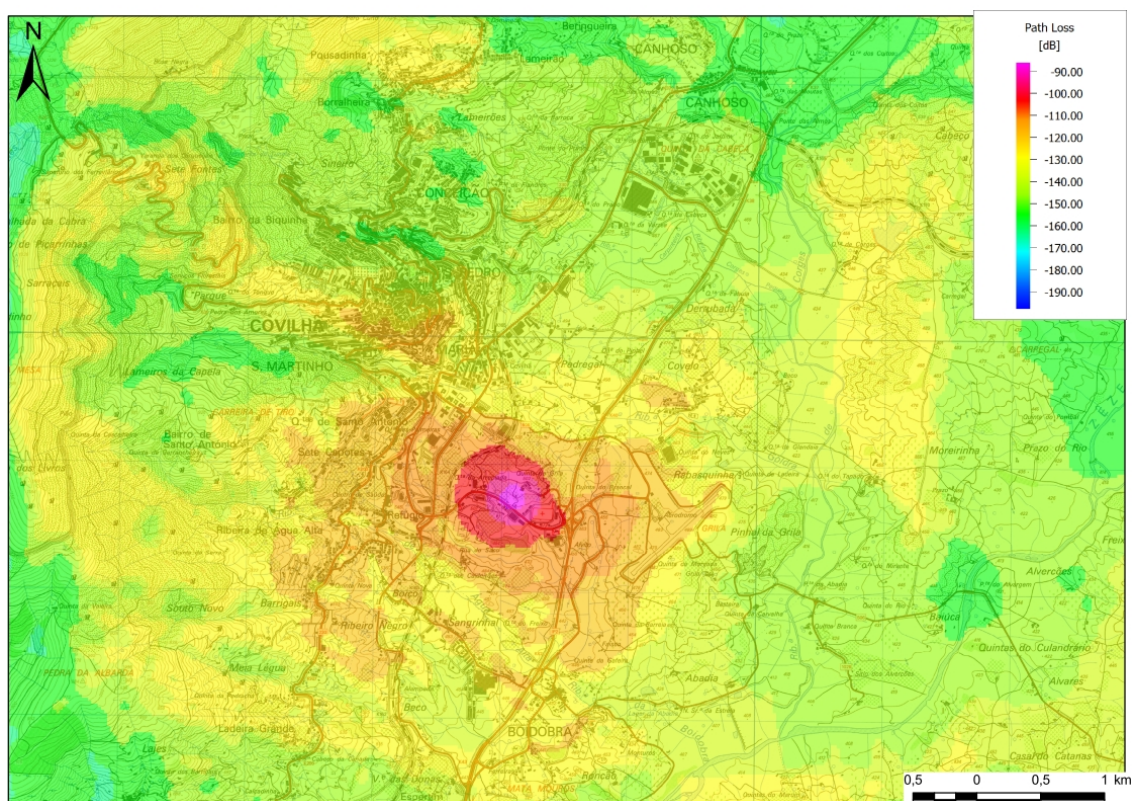


Figura 4.37 - Carta expandida da atenuação do sinal, com h_{BS} a 21 metros.

As figuras anteriores demonstram a importância da elevação da antena da BS, mostrando um aumento evidente das áreas de LoS e da cobertura da célula, notando-se um aumento da área de cobertura para nordeste e sudeste da célula instalada na FCS-UBI. No Anexo E, apresentam-se todos mapas simulados no ProMan, em tamanho A4.

4.3 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo foram apresentadas as ferramentas Winprop™ e ArcGIS™, que serviram de complemento uma à outra, pois foi necessário incrementar informação geográfica aos resultados da simulação. Dividindo-se então este Capítulo em duas partes.

Em relação à ferramenta de planeamento de redes, Winprop™ abordou-se os seus componentes básicos do seu funcionamento, os modelos de propagação usados, concluindo-se como principais pontos:

- O modelo DP (*Dominant Path*) só faz o cálculo para o melhor percurso e não contempla os percursos com pequenas contribuições, e tem uma boa precisão na predição comparando com os modelos empíricos, embora os seus resultados não sirvam de validação para resultados práticos;
- O modelo DP não necessita de um pré-processamento demorado, apresenta períodos curtos de computação e os seus resultados apresentam mais exactidão que os restantes modelos [Comi08];
- A diferença entre o modelo DP e os modelos empíricos reside no facto de estes apenas considerarem o raio directo entre emissor e receptor.
- Nas simulações da parte de rede, comprovou-se que o raio de cobertura diminui com o aumento da ordem de modulação;
- Pode-se concluir que estes resultados obtidos no simulador WinProp™ são optimistas pelas características e localização geográfica da cidade da Covilhã (terreno bastante acidentado) e da estação base.

A ferramenta ArcGIS™ tornou possível, com exactidão, distinguir quais os pontos de medição em zona de LoS e de NLoS, para estudo posterior (Capítulo 5). Além disso, permitiu que se forneça mapas detalhados das zonas simuladas, possibilitando a análise mais inteligível das variações provocadas com o aumento da altura da antena da estação base situada na FCS-UBI.

Da análise dos resultados, com a variação da altura da antena da estação base de 15 para 21 metros resultou um ganho significativo da cobertura da célula, por consequência, diminuiu a atenuação em zonas mais próximas da estação base, além de se observar um aumento das zonas de LoS, principalmente a nordeste e sudeste da localização da estação base. Tendo em conta, o objectivo desta dissertação, estas alterações forneceram mais zonas de medição, sem grandes variações de sinal, visto que, se o sinal variar bruscamente, torna os

resultados finais mais díspares, leia-se, em posições geográficas próximas apresentar valores com grande amplitude. O aumento das zonas de LoS permite uma maior agilidade nas campanhas experimentais, pois permite trajectos mais longos em LoS, permitindo um afastamento gradual da estação base, permitindo adquirir um maior número de dados e com melhor significado para o estudo analítico, efectuado posteriormente.

Capítulo 5

Medições de Campo e Modelo Empírico

Neste Capítulo, analisa-se o método de recolha de dados durante as medições, softwares utilizados e tratamento dos dados. Apresentam-se os resultados obtidos das campanhas experimentais efectuados na cidade da Covilhã, analisando-os comparativamente aos modelos empíricos analisados no Capítulo 3. Propõe-se, por fim, o modelo empírico que definiu com maior precisão as medições realizadas na cidade da Covilhã com o sistema WiMAX BreezeMAX 3000.

5.1 Metodologia das Campanhas Experimentais

O objectivo das medições foi recolher valores de potência de sinal, em tempo real, através do analisador de espectros (descrito no Anexo A.2), distanciando este receptor da estação base WiMAX, localizada no telhado da FCS-UBI (descrita no Anexo A.1). Para isso, utilizou-se a seguinte metodologia, Figura 5.1.

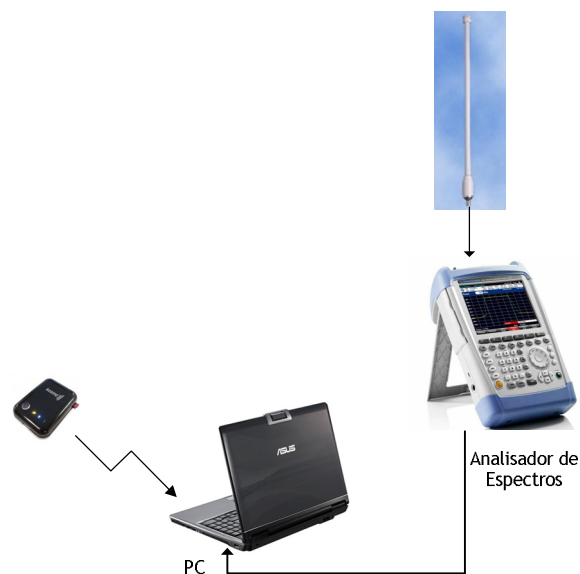


Figura 5.1 - Metodologia de aquisição de dados.

De modo a permitir maior mobilidade, os testes foram efectuados num veículo automóvel, mantendo, dentro do possível, uma velocidade constante, sempre inferior a 40 km/h (parâmetro estipulado pelo equipamento BreezeMAX 3000). A antena receptora (descrita Anexo A.3) foi instalada no tejadilho do carro, ligando-se os dispositivos, como se apresenta na Figura 5.1, no interior do veículo, Figura 5.2.



Figura 5.2 - Antena receptora instalada.

Os dados relativos à potência do sinal, foram obtidos pelo analisador de espectros usando a interface FSH4View®. Esta aplicação permite visualizar, arquivar, e analisar os valores medidos pelo analisador de espectros, conectado a um *laptop* via USB ou LAN. Além disso permite a sincronização deste com o *laptop*. A aplicação foi configurada para arquivar, dados de 1 em 1 segundo, com o analisador a fazer varrimentos de 0.02 segundos, cada valor foi guardado num ficheiro *.txt. As configurações, no próprio analisador baseiam-se na escolha do canal (3.55175 GHz), largura de banda do canal (3.5 MHz), de opções de visualização com *span* ou amplitude, habilitação do pré-amplificador (aumenta sensibilidade do equipamento de 10 a 15 dB [RoSc08]) e escolha dos esquemas de atenuação, de forma, aumentar a gama dinâmica de valores adquiridos.

Reference level	Preamplifier OFF		Preamplifier ON	
	RF attenuation		RF attenuation	Preamplifier
	Low Noise	Low Distortion	Low Noise	
≤ -30 dBm	0 dB	0 dB	0 dB	On
-29.9 bis -25 dBm	0 dB	0 dB	10 dB	On
-24.9 bis -20 dBm	0 dB	0 dB	5 dB	On
-19.9 bis -15 dBm	0 dB	5 dB	10 dB	On
-14.9 bis -10 dBm	0 dB	10 dB	0 dB	Off
-9.9 bis -5 dBm	5 dB	15 dB	5 dB	Off
-4.9 bis 0 dBm	10 dB	20 dB	10 dB	Off
0.1 bis 5 dBm	15 dB	25 dB	15 dB	Off
5.1 bis 10 dBm	20 dB	30 dB	20 dB	Off
10.1 bis 15 dBm	25 dB	35 dB	25 dB	Off
15.1 bis 20 dBm	30 dB	40 dB	30 dB	Off
20.1 bis 25 dBm	35 dB	40 dB	35 dB	Off
25.1 bis 30 dBm	40 dB	40 dB	40 dB	Off

Figura 5.3 - Influência da escolha do tipo de atenuação e pré-amplificador.

A escolha dos esquemas de atenuação (*Low Noise* ou *Low Distortion*) e o estado de funcionamento do pré-amplificador influenciam o nível de referência, embora esta possa ser introduzido manualmente. Segundo [RoSc08] o esquema, *Low Noise*, é o que apresenta maior sensibilidade.

A informação do posicionamento geográfico, foi recolhida através de um GPS a conectar com o laptop, via *Bluetooth*, sendo atribuída uma porta COM Os dados recolhidos foram registados no programa GPS TrackMaker®. Este programa permite o registo da trilha percorrida, além de informações de velocidade, altitude, entre outras. No fim, os dados são gravados num ficheiro *.txt.

Todos os equipamentos foram sincronizados, de modo a diminuir o desfasamento entre dados. Apesar disto, elaboraram-se dois *scripts* em MatLAB™ (Anexo F) para o tratamento dos dados, um deles (Anexo F.1) para registar os valores do analisador numa folha de Excel, pois em todas as campanhas experimentais registaram-se milhares de valores, e o segundo (Anexo F.2) para fazer a correspondência temporal dos valores de posicionamento geográfico e os valores de potência de sinal medidos.

Foram efectuadas várias campanhas experimentais de teste em ambos os cenários, das quais apresentaremos os resultados de uma delas. Os testes ocorrem na cidade da Covilhã, estando a BS localizada na FCS-UBI, Figura 5.4.



Figura 5.4 - Equipamento IEEE 802.16-2004 instalado na FCS-UBI.

A data desta figura, a altura da antena da BS, estava a uma altura de aproximadamente 15 metros do solo. Mais tarde, elevou-se a antena para aproximadamente 21 metros do solo, através da montagem de um mastro, Figura 5.5.



Figura 5.5 - Elevação da antena da BS.

Os valores recolhidos durante as campanhas experimentais, foram comparados com os modelos empíricos abordados no Capítulo 3. Os parâmetros considerados nos modelos empíricos foram:

- Modelo de *Friis*
 - $f = 3.5$ GHz
 - $P_E = -2$ dBW, potência máxima;
 - $G_E = 10$ dBi, ganho de emissão;
 - $G_R = 10$ dBi, ganho de recepção;
- Modelo SUI
 - Factor de atenuação, $s = 8.8$;
 - Altura da antena emissora, 15 e 21 m;
 - Altura da antena receptora, 2.1 m;
- Modelo LUI
 - $d_0 = 100$ m;
 - Altura da antena receptora, 2.1 m;
- Modelo COST-231 Hata
 - Altura da antena emissora, 15 e 21 m;
 - Altura da antena receptora, 2.1 m;
- Modelo COST-231 Walfisch-Ikegami
 - Altura da antena emissora, 15 e 21 m;
 - Altura da antena receptora, 2.1 m;
 - Altura prédios, $h_{roof} = 30$ m;
 - Largura das ruas, 20 m;
- Modelo ECC-33
 - Altura da antena emissora, 21 m;

O método utilizado para comparar a predição dos modelos empíricos em relação aos resultados experimentais, baseou-se no cálculo, do (erro quadrático médio) (5.1), do erro médio (5.2), erro absoluto (5.3) e desvio padrão (5.4), onde N é o número de pontos adquiridos. Estes valores são dados pelas seguintes fórmulas:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\text{Linha de Tendência}} - x_{\text{Predição}})^2 \quad (5.1)$$

$$\Delta x_i = RSSI_{\text{teórico } i} - RSSI_{\text{medido } i} \quad (5.2)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta x_i \quad (5.3)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2 \quad (5.4)$$

O valor do erro quadrático médio, é calculado através da diferença entre a linha de tendência calculada para os valores medidos e a predição do modelo abordado. As expressões (5.2), (5.3) e (5.4) [DrMS09] permitem aproximar com mais rigor o expoente de propagação do modelo de *Friis*, fazendo tender o erro para zero, que apresentou os melhores resultados.

5.2 Campanha Experimental e Modelo

Nesta campanha, foram medidos 2220 pontos de medição tendo a distribuição apresentada na Figura 5.6.

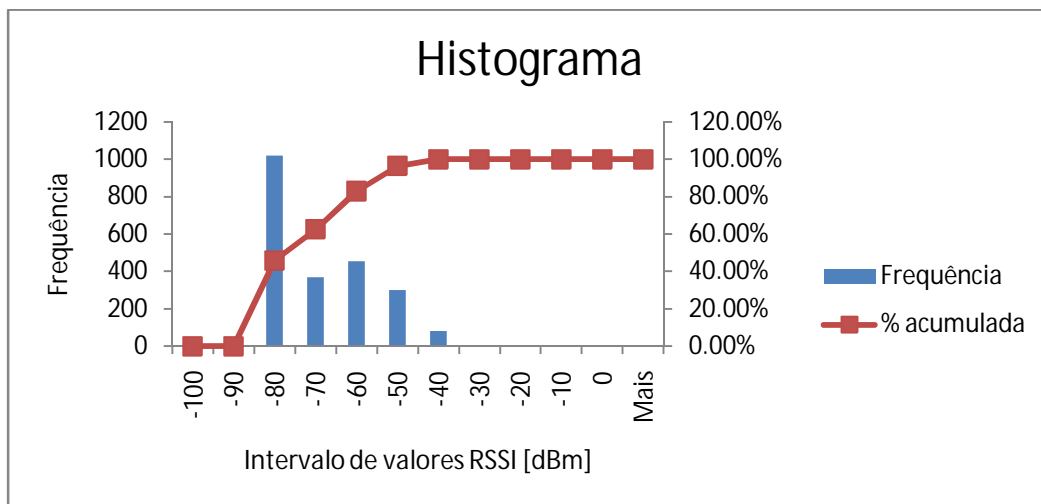


Figura 5.6 - Histograma dos dados recolhidos.

Os resultados apresentados nesta secção foram adquiridos no dia 16 de Julho de 2010, com a altura da antena da estação base WiMAX, com $h_{BS} = 21$ metros, localizada no telhado da FCS-UBI, e o trajecto realizado é apresentado na Figura 5.7, o trajecto envolveu distâncias até aos 5 km. Os resultados experimentais realizados com $h_{BS} = 15$ m não são aqui explorados em detalhe, pois a gama dinâmica do analisador de espectros utilizada nesse contexto não permitiu valor abaixo dos -70 dBm.



Figura 5.7 - Trajecto da expedição experimental 16-07-10 (extraído do Google Earth).

A Tabela 5.1, apresenta os dados estatísticos da totalidade dos pontos de medição realizados, apresentando uma média e uma variância elevada. Outro aspecto que se nota, é o valor mais vezes aparece na amostra de dados, -87.83 dB, provocando uma saturação à volta deste valor, até porque a gama dinâmica revelado pelo analisador não foi além dos -89 dB.

Tabela 5.1 - Dados estatísticos totais das medições realizadas.

<i>Dados Estatísticos</i>	
Média	-74.35936036
Erro-padrão	0.266760309
Mediana	-77.59
Moda	-87.83
Desvio-padrão	12.56891238
Variância da amostra	157.9775585
Mínimo	-89
Máximo	-41.59
Soma	-165077.78
Contagem	2220
Nível de confiança (95.0%)	0.523125923

Os resultados apresentaram uma grande disparidade em relação à predição da maioria dos modelos abordados, por exemplo, COST231 Hata, COST 231 Walfisch Ikegami, Erceg modificado, ECC 33 e SUI. O modelo que mais se aproxima mesmo com a totalidade dos pontos de medição foi o modelo de *Friis* modificado, com um expoente de propagação de 2.6724, apresentando um erro quadrático médio de 3.6119.

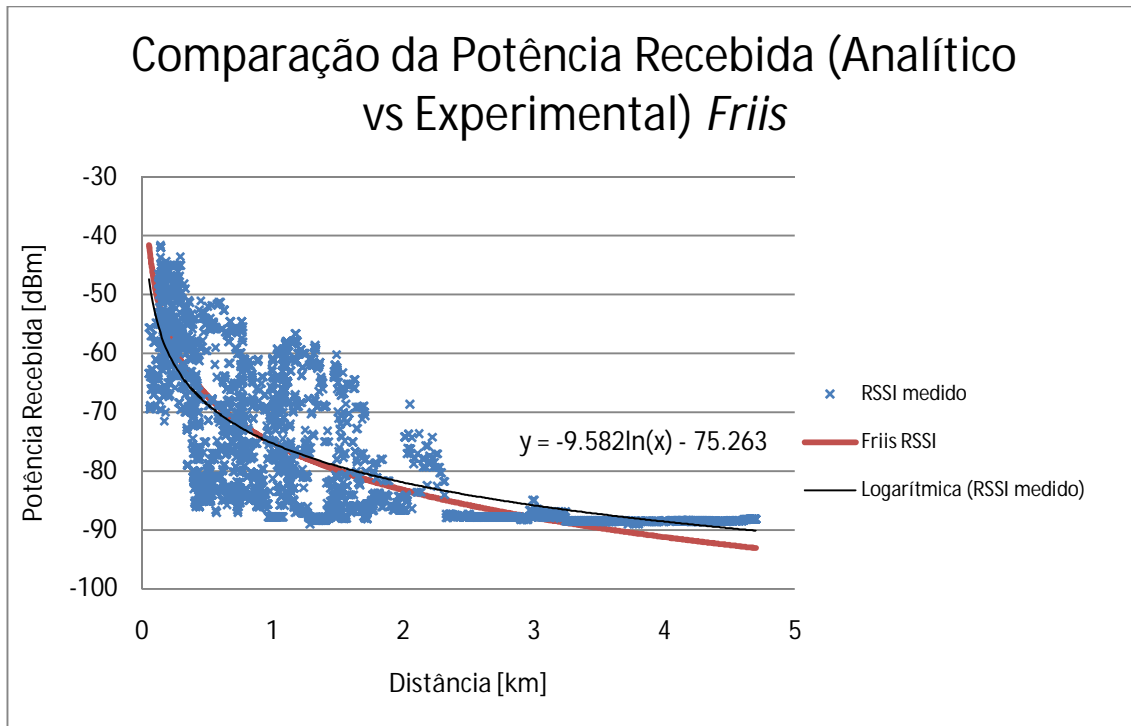


Figura 5.8 - Comparação dos todos os dados medidos com a predição do modelo de Friis.

Para uma melhor análise dos dados, e para evitar a saturação apresentada na Figura 5.8 para distâncias superiores a 2 km, estes foram divididos em zonas LoS e NLoS, através do método apresentado no Capítulo 4.

Em zonas LoS, o valor do erro médio quadrático, desceu em todos os modelos empíricos analisados, embora ainda bastante elevados, o modelo que mais se aproximou, sem ser o modelo de *Friis* modificado, foi o modelo Modelo COST-231 Walfisch-Ikegami, Figura 5.9, para condições de LoS, apresentando mesmo assim um valor de erro quadrático médio de 89, o que é elevado. Novamente, o modelo de *Friis* modificado foi o que se aproximou mais da linha de tendência, apresentando um erro quadrático médio de 3.4558, para um expoente de propagação de 2.65.

Em condições NLoS, mais uma vez, os modelos abordados apresentaram erros quadráticos elevados. O modelo de *Friis* modificado, apresentou um valor de erro elevado, 21.2037, com um expoente de propagação de 2.85, mesmo assim muito inferior aos erros apresentados pelos restantes. O modelo que apresentou um erro mais baixo foi o ECC-33 com um erro quadrático médio de 87.95. Neste ponto, convém referir que a gama dinâmica do analisador influenciou bastante, pois só chega a valores perto dos -90 dB.

As Figuras 5.10 e 5.11, apresentam a comparação dos resultados do modelo de *Friis* com os dados medidos, para zonas LoS e NLoS.

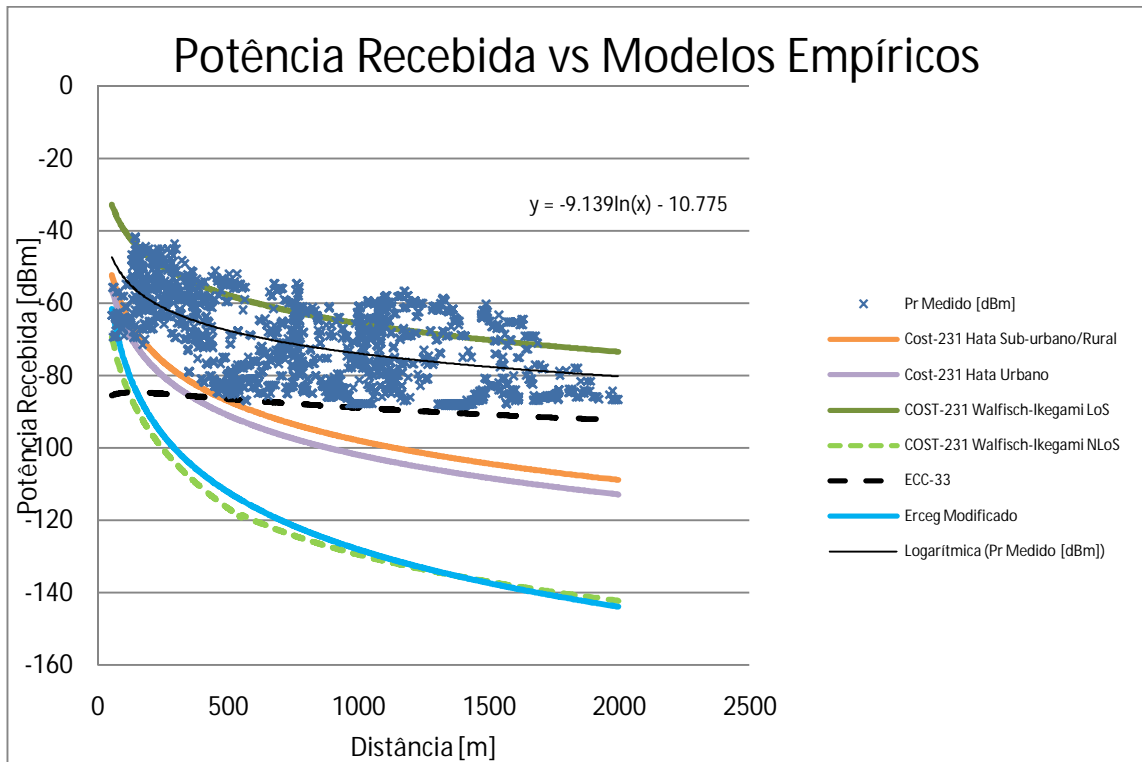


Figura 5.9 - Predição dos modelos empíricos vs Valores medidos, em LoS.

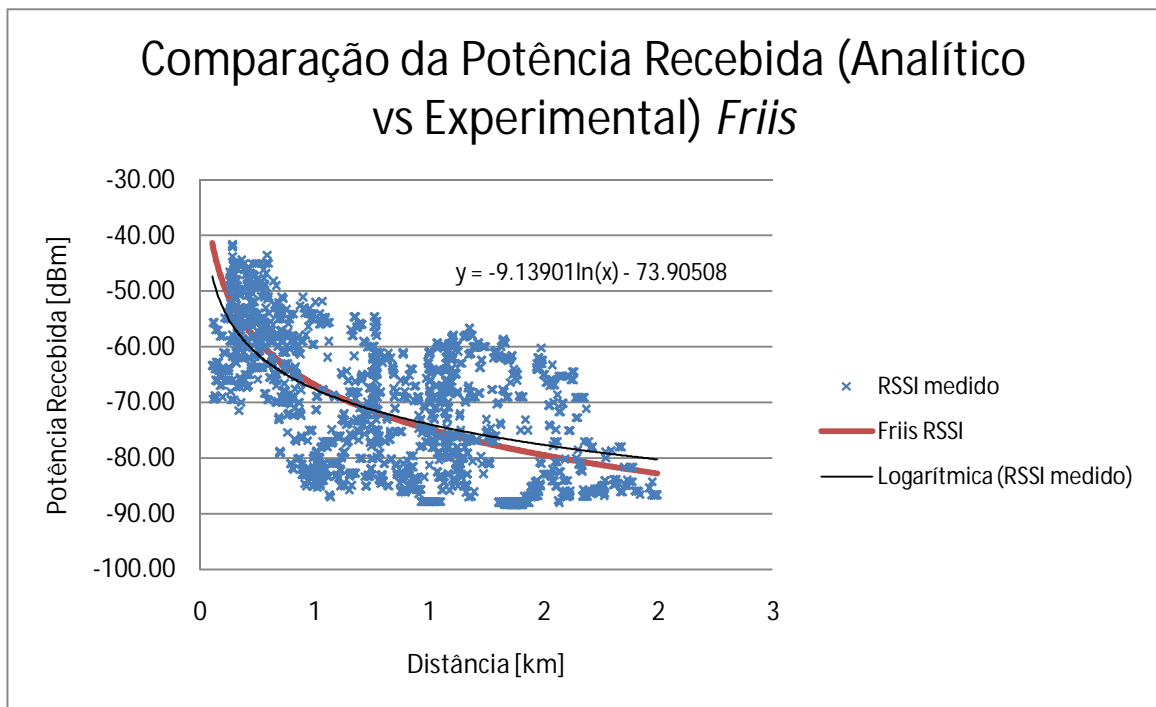


Figura 5.10 - Predição do modelo de *Friis* vs Valores medidos, LoS.

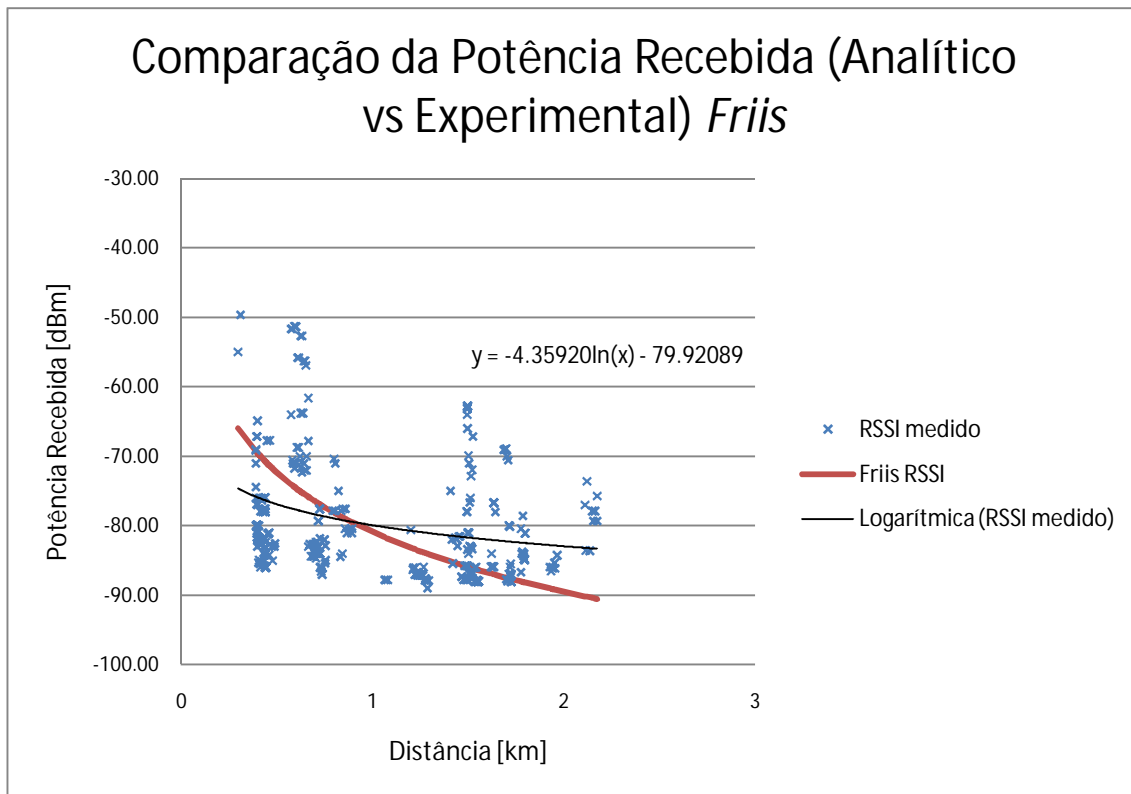


Figura 5.11 - Predição do modelo de *Friis* vs Valores medidos, LoS.

A Tabela 5.2, apresenta os valores do erro quadrático médio, erro médio, erro absoluto, desvio padrão, e do expoente de propagação do modelo de *Friis* modificado.

Tabela 5.2 - Valores de erro no modelo de *Friis*, em condições LoS e NLoS.

	Friis modificado (LoS+NLoS)
Erro Quadrático Médio	3.611983882
Erro Médio	-0.055853755
Erro Absoluto	0.001304967
Desvio Padrão	0.061485969
Expoente de propagação	2.67

5.3 Sumário e Conclusões

Os resultados apresentados mostram que os modelos empíricos são influenciados pelos cenários onde foram testados. Além disso, a grande maioria dos modelos disponíveis na literatura foi estudado em grandes cidades, apresentando edifícios com uma altura média elevada, características que não estão presentes na Covilhã.

O analisador apresentou uma gama dinâmica baixa, para o esperado, o que também não permitiu analisar melhor as condições de NLoS. Influenciando os resultados dos modelos empíricos analisados que atingem valores mais baixos do que aqueles adquiridos com o analisador, que apresentou saturação a partir dos valores abaixo de -89 dB.

A gama dinâmica considerada para o analisador de espectros, para as medidas para $h_{BS}=15$, não permitiu uma comparação rigorosa dos resultados para diferentes alturas da BS. Em termos de modelação, os resultados apresentados pelo modelo de *Friis* modificado são encorajadores, pois foi o modelo que apresentou valores mais baixos de erro quadrático médio, tanto em condições de LoS como em NLoS.

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação abordou conceitos de planeamento de redes sem fios da norma IEEE 802.16, centrando-se na verificação do modelo de propagação resultantes de medições de cobertura da célula IEEE 802.16-2004 instalada na cidade da Covilhã. A dissertação inclui dois aspectos distintos. Em primeiro lugar, uma componente de simulação e, em segundo lugar, trabalho experimental de forma, a comprovar a verificar a predição resultante da análise dos resultados obtidos das simulações.

Em relação à componente de simulação, utilizou-se a ferramenta de planeamento de redes sem fios Winprop™ com o objectivo de simular a cobertura da célula instalada no telhado na FCS-UBI, na cidade da Covilhã. A simulação foi efectuada tendo em conta as características do sistema WiMAX BreezeMAX 3000, de modo, a que a simulação fosse o mais real possível e apresenta-se predições fiáveis e credíveis. Por outro lado, pretendeu-se comparar o impacto da elevação da antena da estação base, após a montagem de mastro permitindo subir a antena cerca de seis metros, em relação à altura anterior. Esta opção foi tomada devido à localização da FCS-UBI que se encontra rodeada de edifícios mais altos, e na tentativa de se obter cobertura na parte mais elevada da cidade. De acordo com os resultados obtidos notou-se um aumento das zonas de linha de vista, comparativamente à altura inicial da antena da estação de base, esta melhoria abrange todos os restantes aspectos de cobertura, aumentando a cobertura celular, principalmente para sudeste e nordeste da localização da estação base. Tendo em conta, o objectivo de realizar campanhas experimentais na célula, estas alterações forneceram mais zonas de medição, sem grandes variações de sinal, visto que, se o sinal variar bruscamente, torna os resultados finais mais díspares em posições geográficas próximas. O aumento das zonas de linha de vista permitiu uma maior agilidade nas campanhas experimentais, pois faculta trajectos mais longos com linha de vista, permitindo um afastamento gradual da estação base, possibilitando adquirir um maior número de dados e com melhor significado para o estudo analítico, efectuado posteriormente.

Em relação à parte experimental, os resultados não foram de todo satisfatórios. Era esperada maior predição dos modelos analisados, entre eles por exemplo, COST231 Hata, COST 231 Walfisch Ikegami, Erceg modificado e ECC-33. Embora tenha sido possível adquirir dados mais coerentes a distâncias mais longas, devido ao aumento das zonas de linhas de vista. Os resultados apresentados pelo modelo de *Friis* são satisfatórios, quando comparados com os resultados experimentais para $h_{BS} = 21$ m, apresentando valores do erro quadrático médio reduzidos, e uma variação baixa do expoente de propagação para zonas de linha de vista ($\gamma=2.65$), não linha de vista ($\gamma=2.85$) e total ($\gamma=2.67$). Pode-se afirmar que, para as três

condições, o modelo de *Friis* modificado apresenta quase o mesmo valor para o expoente de propagação.

Os modelos empíricos estão limitados pelo meio onde foram testados, pois por mais factores de correcção adicionados, as condições topográficas dos cenários influenciam a propagação de sinal. Através dos testes também é possível verificar que os dados começam a saturar em cerca de -89 dBm aproximadamente aos 2 km de distância relativamente à estação base. Os resultados obtidos na simulação, comprovam este fenómeno, pois na carta dos esquemas de modulação ou dos ritmos de transmissão é notório, não sendo útil testar distâncias mais longas que este valor.

A ferramenta ArcGIS™ permitiu um grande avanço na metodologia para a análise dos dados recolhidos nas campanhas experimentais. Com esta ferramenta obteve-se com rigor a localização dos dados adquiridos experimentalmente, sendo bastante importante para a análise dos resultados.

6.1 Propostas de Trabalho Futuro

No desenvolvimento desta dissertação, surgiram algumas dúvidas para qual a melhor metodologia a adoptar, e outras opções a tomar na realização da campanhas experimentais. O trabalho experimental é sempre muito imprevisível, onde nem sempre o método corre bem, Algumas das propostas futuras são:

- Variar a altura da antena da estação, de modo a ter valores medidos em diferentes circunstâncias;
- Variar a frequência, já está a operar um sistema WiMAX a 5.4 GHz;
- Utilizar antenas isotrópicas no receptor;

Anexo A

Este Anexo, apresenta as especificações e características técnicas do material utilizado nas campanhas experimentais.

Especificações do material utilizado

A.1 Micro Base Station BreezeMAX 3000

As Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4 apresentam o *data sheet* com as características do equipamento WiMAX BreezeMax 3000 [Alva06].

Specifications	
Radio & Modem	
Parameter	Value
Frequency	3.3GHz FDD: UL: 3366-3400MHz; DL: 3316-3350MHz and UL: 3300-3324MHz; DL: 3376-3400MHz 3.5GHz FDD: UL: 3399.5-3500MHz; DL: 3499.5-3600MHz 3.6GHz FDD: UL: 3600-3700MHz; DL: 3700-3800MHz
Radio Access Method	TDMA FDD
Modulation	OFDM 256 with adaptive sub-carrier modulation: BPSK, QPSK, QAM 16, QAM 64.
Channel bandwidth	3.5MHz; 1.75MHz - software selectable
Duplexing Scheme	AU full duplex, SU half duplex
Central frequency resolution	125KHz
Antenna (CPE)	17 dBi typical, 18° AZ x 18° EL, vertical/horizontal polarization, compliant with EN 302 085, V1.2.2 Range 1
Maximum Output power (At antenna port)	AU: 28dBm (+/-1dB) SU: 20dBm (+/-1dB)
Sensitivity	-82/85 dBm for highest modulation (QAM 64) @ 3.5/1.75 MHz
Typical values	-100/103 dBm for lowest modulation (BPSK) @ 3.5/1.75 MHz
Data Communications	
Data	IEEE 802.3 CSMA/CD
Air Interface	IEEE 802.16-2004
VLAN support	IEEE 802.1Q
Traffic Classification	Layer 2 IEEE 802.1p, IP DiffServ Code Points DSCP
Networking Gateway CPE	
General Features	
WAN Connection Types	Static IP, Dynamic IP (DHCP), PPPoE and PPTP client
Routing	Static Route, Dynamic Route (RIP1/2)
Firewall	NAT Firewall with SPI mode
NAT Functionality	NAT, Virtual Server, Special Application, DMZ Host
VPN	IPSec, PPTP & LT2P Pass-Through
DHCP	DHCP server for LAN and WLAN clients, DHCP client for WAN
Wireless Features (supported only with wireless networking gateway)	
Standard	IEEE 802.11b / 802.11g
Range Coverage	Indoors - approx. 35-100 meters
Security	WEP encryption - 64 Bit, 128 Bit

Figura A.1 - Características do equipamento WiMAX BreezeMax 3000 [Alva06].

Electrical		
	Subscriber Unit	Base Station
Power Source	100-240 VAC, 50-60 Hz	-36 to -72 VDC
Power Consumption (max)		BST PS: 200W each, up to 4 PS
	CPE PRO ODU only: 16.5W	AU IDU 2 channels: 38 W AU ODU: 38 W
	CPE PRO IDU+ODU data: 22W	NPU: 70 W, PIU: 35 W, AVU: 24 W
Environmental		
	Indoor Unit	Outdoor Unit
Operating Temperature	0°C to 40°C	-40°C to 55°C
Operating Humidity	5%-95% non condensing	5%-95% non condensing, weather protected
Standard Compliance		
Type	Standard	
EMC	ETSI EN 301 489-1	
Safety	EN 60950 (CE), CB, IEC 60 950 US/C (TUV)	
Environmental	ETS 300 019 part 2-1 T 1.2 & part 2-2 T 2.3 for indoor & outdoor part 2-3 T 3.2 for indoor, part 2-4 T 4.1E for outdoor	
Radio	ETSI EN 301 021 V.1.4.1, ETSI EN 301 753 V.1.1.1	

Figura A.2 - Características do equipamento WiMAX BreezeMax 3000 [Alva06].

Item	Description	
Frequency	Unit/Band	
	AU-ODU-3.3e	Uplink (MHz) 3366-3385 Downlink (MHz) 3316-3335
	AU-ODU-3.3f	Uplink (MHz) 3381-3400 Downlink (MHz) 3331-3350
	AU-ODU-3.3g	Uplink (MHz) 3300-3324 Downlink (MHz) 3376-3400
	AU-ODU-3.5a	Uplink (MHz) 3399.5-3453.5 Downlink (MHz) 3499.5-3553.5
	AU-ODU-3.5b	Uplink (MHz) 3450-3500 Downlink (MHz) 3550-3600
	AU-ODU-3.6a	Uplink (MHz) 3600-3653.5 Downlink (MHz) 3700-3753.5
	AU-ODU-3.6b	Uplink (MHz) 3646.5-3700 Downlink (MHz) 3746.5-3800
Operation Mode	FDD, Full duplex	
Channel Bandwidth	■ 3.5 MHz ■ 1.75 MHz	
Central Frequency Resolution	0.125 MHz	
Antenna Port (AU-ODU)	N-Type, 50 ohm	
Max. Input Power (at AU-ODU antenna port)	-50 dBm before saturation, -17 dBm before damage	
Output Power (at AU-ODU antenna port)	AU-ODU: 28 dBm +/-1 dB maximum. AU-ODU-HP: 34 dBm +/-1 dB maximum Power control range: From 13 dBm to the maximum supported by the unit. In 3.6 GHz ODUs, the minimum power is 18 dBm.	
Modulation	OFDM modulation, 256 FFT points; BPSK, QPSK, QAM16, QAM64	
FEC	Convolutional Coding: 1/2, 2/3, 3/4	

Figura A.3 - Características rádio do equipamento WiMAX BreezeMax 3000 [Alva06b].

Item	Description				
		3.5 MHz bandwidth		1.75 MHz bandwidth	
Bit Rate and Typical Sensitivity (PER=1%)	Modulation & Coding	Net Phy Bit Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)	Net Phy Bit Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)
	BPSK 1/2	1.41	-100	0.71	-103
	BPSK 3/4	2.12	-98	1.06	-101
	QPSK 1/2	2.82	-97	1.41	-100
	QPSK 3/4	4.23	-94	2.12	-97
	QAM16 1/2	5.64	-91	2.82	-94
	QAM16 3/4	8.47	-88	4.24	-91
	QAM64 2/3	11.29	-83	5.65	-86
	QAM64 3/4	12.71	-82	6.35	-85

Figura A.4 - Ritmos de transmissão para cada modulação, sistema BreezeMax 3000 [Alva06b].

A.2 Especificações Analisador de Espectros FSH8

O Analisador de espectros portátil FSH8 da Rodhe&Schwarz é apresentado na Figura A.5.



Figura A.5 - Analisador de espectros portátil FSH8 da Rodhe&Schwarz [RoSc08]

- o Gama de frequências desde 9 kHz até 8 GHz;
- o Sensibilidade (<141 dBm (1 Hz), com pré-amplificador <161 dBm (1 Hz));
- o Precisão (<1 dB);
- o Funções de medição para todas as tarefas, desde da implementação até à manutenção de sistemas de radiofrequência;
- o Bateria de Li-ion, com duração até mais de 4.5 h;
- o Leve, 3 kg com bateria;
- o Possibilidade de guardar dados em SD card;
- o Interface LAN and USB para controlo remoto e para transferência de dados medidos.

A.3 Especificações Antenas GP3500-10

A antena usada, tanto como emissor como receptor, foi uma antena omnidireccional para WiMAX com a referência GP3500-10. As suas características são apresentadas na Tabela A.1. As Figuras A.6 e A.7 apresentam a antena GP3500-10 da WiMo e o seu diagrama de radiação, respectivamente.

Tabela A.1 - Especificações da antena GP3500-10 da WiMo [WiMo10].

Especificações	
Tipo de Antena	Omnidireccional
Gama de Frequências	3400-3600 GHz
Conector	N fêmea
Impedância	50 Ohm
Polarização	Vertical
Potência Máxima	10 Watt
Ganho	10 dBi
<i>Beamwidth</i> Vertical	12°
Armação	Aço inoxidável
Diâmetro	20 mm
Peso	520 g
Comprimento	520 mm



Figura A.6 - Antena GP3500-10 da WiMo [WiMo10].

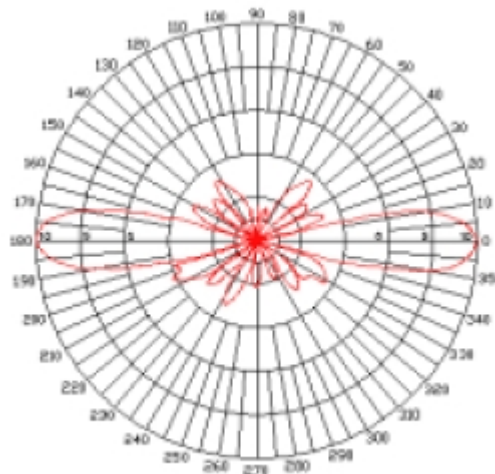


Figura A.7 - Diagrama de radiação antena GP3500-10 da WiMo [WiMo10].

A.4 Especificações GPS

O módulo de GPS utilizado nas medições tem a seguintes características, apresentadas na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Especificações do módulo de GPS usado.

Especificações	
Chipset	SiRF StarIII GSC3F-7879
Frequência	L1, 1545.42 MHz
Nº de Canais	20
Mapa Datum	WGS-84
Precisão de Posicionamento	1-5 metros
Precisão de Velocidade	0.1 metros/segundo
Precisão Temporal	1 microsegundo sincronizado com GPS
Sensibilidade	-159 dBm
Tempo de Reaquisição	0.1 segundos
Altitude Máximo	18000 metros
Velocidade Máximo	515 m/s
Alimentação	5.0 V \pm 10% DC
Sinal de Saída	8 bits, sem paridade
Protocolos de Comunicação	NMEA 0183 (Default GGA, GSA, GSV, RMC, VTG)
Formatos de Saída	GGA(1s), GSA(1s), RMC(1s), VTG(1s) GSV(5s)

Anexo B

Neste Anexo, apresenta-se uma breve comparação entre a norma IEEE 802.16e-2005 e 3GPP-LTE. De momento, o LTE (*Long Term Evolution*) apresenta-se como o grande concorrente de mercado para a norma IEEE 802.16e-2005.

Comparação entre IEEE 802e-2005 e 3GPP-LTE

As redes WWAN (*Wireless Wide Area Network*) e as MAN (*Metropolitan Area Network*) sofreram ao longo destes anos uma extensa investigação tendo em vista a evolução das redes públicas de *wireless* de 4ª geração (4G). A intensa actividade com o intuito de uma normalização encontra-se actualmente em fase final, podendo ser considerado como um importante passo para 4G. Um exemplo bem conhecido desse esforço de padronização é a norma IEEE 802.16e-2005 para acesso *wireless* fixo e móvel à banda larga.

Um esforço paralelo tem sido desenvolvido envolvendo o UMTS (acrónimo de *Universal Mobile Telecommunication System*) para redes terrestres de acesso rádio (E-UTRAN), também conhecida como 3GPP-LTE (*Long Term Evolution*). Esta standardização é similar a IEEE 802.16e-2005, sendo o acesso baseado na tecnologia OFDMA. Na Tabela B.1 ilustra-se a evolução da norma 3GPP-LTE.

Tabela B.1 - Evolução da norma 3GPP UMTS [GeMü07].

	WCDMA	HSDPA/HSUPA	HSPA+	LTE
Lançamento	3GPP Release 99/4 2003/2004	3GPP Release 5/6 2005/2006(HSPDA) 2007/2008(HSUDA)	3GPP Release 7 (2008/2009)	3GPP Release 8 (2009/2010)
Ritmo de Transmissão DL	384 kbps	14 Mbps (Máx.)	28 Mbps (Máx.)	100 Mbps
Ritmo de Transmissão UL	128 kbps	5.7 Mbps (Máx.)	11 Mbps (Máx.)	50 Mbps
RRT (Round Trip-Time) ¹⁰	~150 ms	<100 ms	<50 ms	~50 ms

A Tabela B.2, apresenta a comparação entre alguns parâmetros, essencialmente da camada física, usados nas normas 3GPP-LTE e IEEE 802.16e-2005.

¹⁰ RRT, é o tempo um pacote demora a percorrer o trajecto entre emissor e receptor e voltar ao emissor.

Tabela B.2 - Comparação entre IEEE 802.16e-2005 e 3GPP-LTE [3GPP09].

Aspecto	IEEE 802.16e-2005	3GPP-LTE (E-UTRAN)
Duplexing	TDD (e FDD)	FDD e TDD
Tipo de Acesso:		
Downlink (DL)	OFDMA	OFDMA
Uplink (UL)	OFDMA	SC-FDMA
Espectro de Frequência	2.3-2.4 GHz, 2.496-2.69GHz, 3.3-3.8GHz	Banda UMTS (~2GHz)
Ritmos de Transmissão:		
DL	75 Mbps (MIMO 2Tx 2Rx)	100 Mbps (MIMO 2Tx 2Rx)
UL	25 Mbps	50 Mbps
Largura de Banda (BW)	5, 8.75, 10 MHz	1.25-20 MHz
Raio da célula	2-7 km	5 km
Capacidade para utilizadores	100-200 SS	>200 SS @ 5MHz >400 SS para BW superiores
Eficiência Espectral	3.75 [bits/seg/Hz]	5 [bits/seg/Hz]
Esquemas de Modulação	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Mobilidade	Até 120 km/h Permite <i>Hard Handovers</i>	Até 250 km/h Permite <i>Soft Handovers</i> entre células

Da Tabela B.2 verifica-se que ambas as normas são tecnicamente semelhantes. No entanto, em termos de perspectivas de mercado a IEEE 802.16e-2005 mostra-se mais madura e avançada para entrar em primeiro lugar no mercado. Também podemos concluir que no mundo desenvolvido, os maiores fornecedores de serviços UMTS/HSPA irão naturalmente evoluir para 3GPP-LTE, tal como os prestadores de serviços GSM/EGDE poderão escolher a norma IEEE 802.16e-2005.

Anexo C

Neste Anexo, expõem-se alguns cenários de aplicação da norma IEEE 802.16. Estando estes divididos em duas categorias: Redes públicas e redes privadas.

Cenários de utilização do WiMAX

Nos dias que correm, o acesso à banda larga já é uma realidade e cada vez mais com mais utilizadores, tanto mais pela liberdade e comodidade que permite ao utilizador desfrutar do serviço no momento em que tiver necessidade. O WiMAX pode permitir o acesso a estes serviços em qualquer local, desde que exista cobertura suficiente. Para ilustrar a capacidade do WiMAX, apresentam-se alguns possíveis cenários de aplicação, agrupados em duas categorias: redes públicas e redes privadas.

C.1 Redes Privadas

As redes privadas destinam-se a uso exclusivo de uma organização ou instituição, oferecendo linhas de comunicação dedicadas para uma transferência fiável e segura de voz, dados e/ou vídeo, sendo as configurações tipicamente PtP ou PtM.

C.1.1 *Backhaul* de Redes Celulares

O mercado de comunicações móveis está a tornar-se cada vez mais competitivo. Para um operador se manter agressivo na área de negócio, tem de reduzir custos mas mantendo a mesma qualidade de serviço.

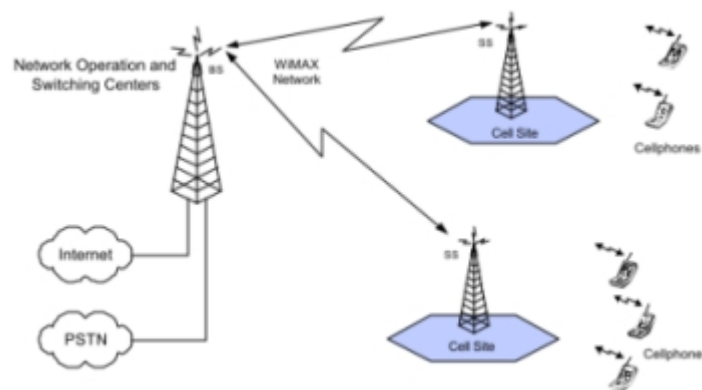


Figura C.1 - Aplicação celular de *backhaul* [WiFo05].

Os custos *backhaul* para os operadores das redes móveis representam uma porção significativa das despesas correntes, as redes móveis é um misto de voz e dados para a qual as especificações de QoS do WiMAX são apropriadas. O WiMAX oferece elevada largura de banda e consegue fornecer ligações PtP até 50km, assim, os operadores de redes móveis podem utilizar equipamento WiMAX para *backhaul* do tráfego da BS para os Centros de Comutação e Operações da Rede, como apresenta a Figura C.1, diminuindo custos em redes cabladas de longa distância para áreas rurais ou suburbanas.

C.1.2 Wireless Service Provider Backhaul

Os *Wireless Service Provider* (WSP's) usam equipamento WiMAX para fazer o *backhaul* do tráfego entre as suas BS's nas suas redes de acesso, Figura C.2.

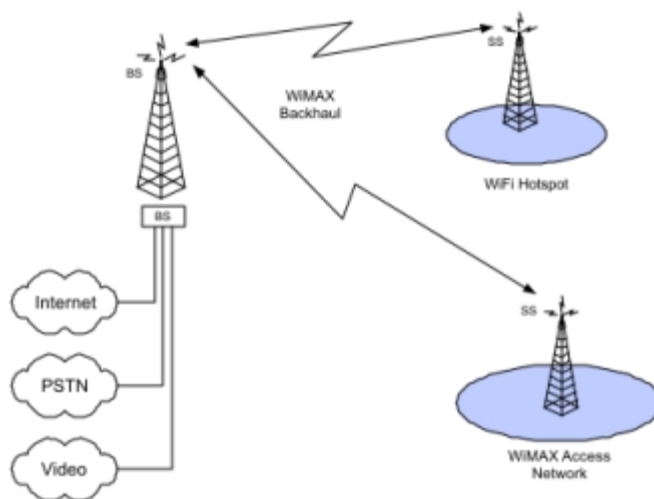


Figura C.2 - Aplicação de WSP backhaul [WiFo05].

As redes de acesso podem ser baseadas em WiFi, WiMAX, ou qualquer acesso com tecnologia *wireless* do operador. Normalmente os WSP's oferecem tráfego de voz, dados e vídeo, a QoS do WiMAX controla a prioridade e otimiza o tráfego do *backhaul*. O equipamento de WiMAX consegue implementar-se rapidamente, facilitando um lançamento (*rollout*) rápido da rede WSP, reduzindo assim os custos e o tempo de implementação.

C.1.3 Redes de Serviços Bancários

Os grandes bancos podem conectar-se às suas sucursais e às caixas *Automatic Teller Machines* (ATM) a partir do seu escritório regional através de uma rede privada WiMAX que suporta tráfego de voz, dados e vídeo, como mostra a Figura C.3. Os bancos normalmente tem redes

próprias e encontram-se espalhados ao longo de uma grande área e necessitam de uma transmissão segura e de largura de banda para controlar o tráfego.

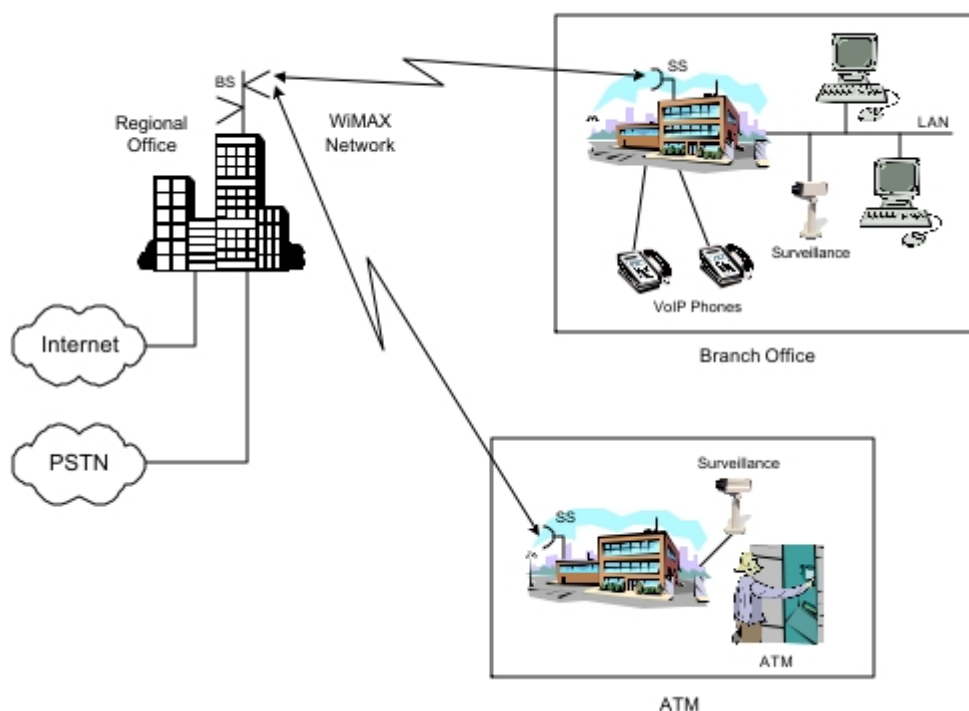


Figura C.3 – Aplicação de redes de serviços bancários [WiFo05].

O WiMAX oferece excelentes condições de encriptação de dados, no entanto, os bancos necessitam também de segurança em ambos os terminais, que pode ser assegurada por *Secure Sockets Layer* (SSL), para proteger interceptações indesejáveis ou qualquer tipo de manipulação. Mais uma vez, o largo alcance de cobertura e uma largura de banda suficiente para suportar as comunicações entre terminais, jogam a favor do WiMAX.

C.1.4 Redes de Serviços de Educação

As Direcções Regionais de Educação podem usar as redes WiMAX para conectar as escolas e os seus serviços administrativos numa determinada região, como mostra a Figura C.4.

Os requisitos essenciais de um sistema desta natureza englobam, circunstâncias de condições NLoS, elevada largura de banda (superiores a 15 Mbps), capacidade para redes de diferentes topologias e uma grande área de cobertura. Todas estas características estão presentes e asseguradas pela norma IEEE 802.16.

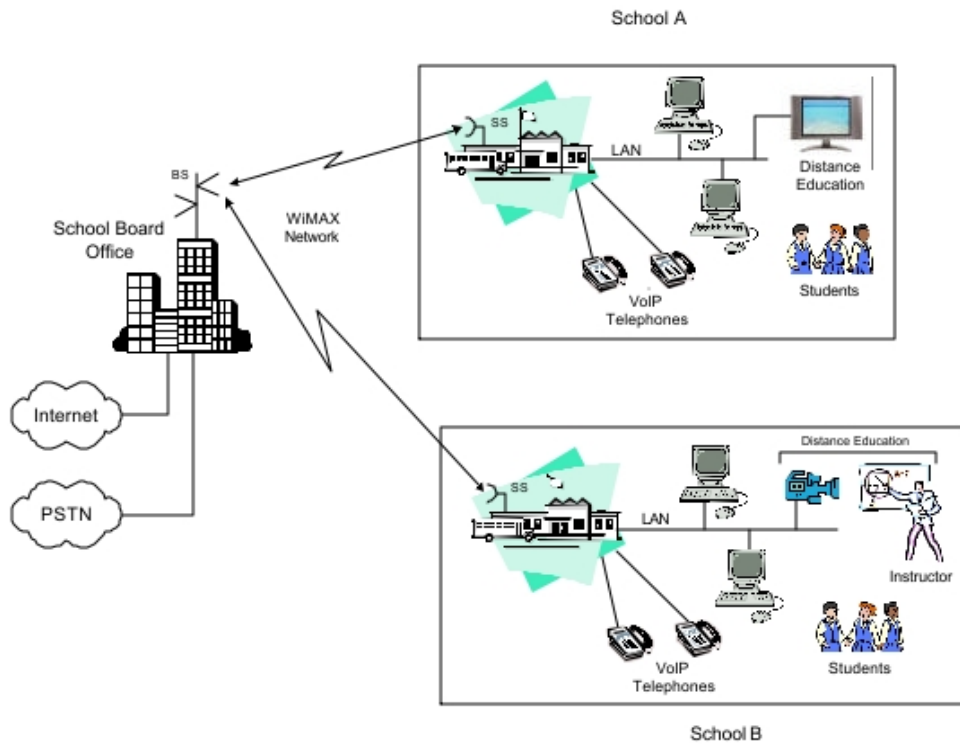


Figura C.4 - Aplicação em serviços educativos [WiFo05].

C.1.5 Redes de Segurança Pública

Os Departamentos regulados pela Administração Interna, tais como, Polícia, Bombeiros, Protecção Civil e INEM, podem utilizar as redes WIMAX para responder às situações de emergência adequadas a cada um, tal como a Figura C.5 demonstra.

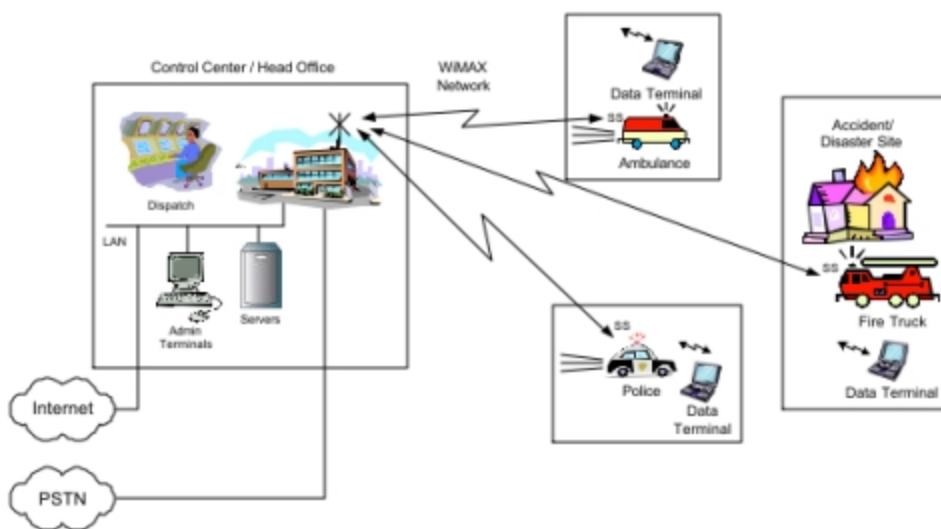


Figura C.5 - Aplicação em redes de segurança pública [WiFo05].

Além de providenciar comunicações de voz bidirecionais entre o centro de comando e as equipas de emergência rápida no local, a rede transmite imagens vídeo e dados do local do sinistro para o centro de comando. Estes dados podem ser depois retransmitidos para equipas médicas, pessoal de emergências ou especialistas, podendo assim analisar a situação em RT, como se estivessem no local. A QoS do WiMAX permite à rede controlar estes diferentes tipos de tráfego. Por outro lado, existe a necessidade de mobilidade, e o WiMAX fornece suporte de mobilidade e banda larga, elementos que um sistema de banda estreita não consegue suportar.

C.1.6 Conectividade num *Campus*

Agências governamentais, grandes empresas, complexos industriais, centros de transportes e universidades/faculdades podem utilizar redes WiMAX para conectar múltiplos locais dentro do seu complexo, como ilustra a Figura. C.6. Estes sistemas necessitam de grande capacidade, baixa latência, uma grande cobertura e alta segurança, envolvendo tráfego de voz, dados e vídeo

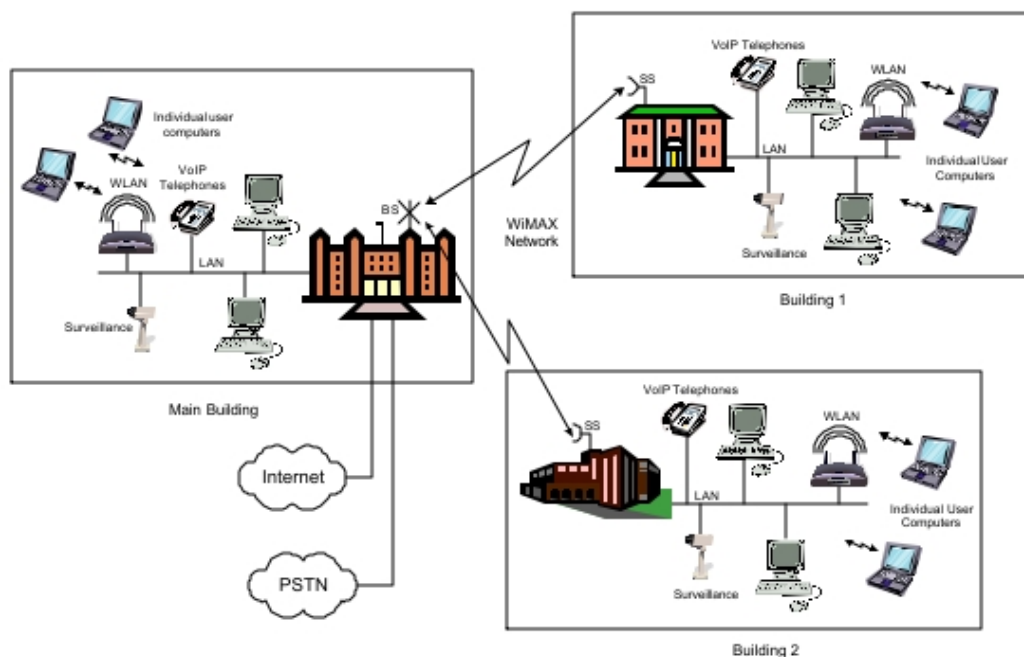


Figura C.6 - Aplicação em complexos [WiFo05].

Outras aplicações avançadas em [WiFo], são:

- Comunicações marítimas;
- Locais de Construção Temporários;
- Parques Temáticos;

C.2 Redes Públicas

As redes públicas acedem e partilham recursos de diferentes locais e por diferentes utilizadores. Necessitam de redes robustas e pouco dispendiosas, que ofereçam uma cobertura omnipresente, pois o acesso é feito de uma forma nómada, e utilizam comunicações de voz e dados, além do vídeo. As questões relativas à segurança são essenciais, por ser uma rede partilhada. Em baixo, apresentam-se alguns exemplos deste tipo de redes.

C.2.1 Wireless Service Provider Access Network

Os *Wireless Service Provider* (WSP's) usam redes WiMAX para providenciar conectividade para clientes residenciais (voz, dados e vídeo) e empresariais (principalmente voz e internet), como a Figura C.7 mostra.

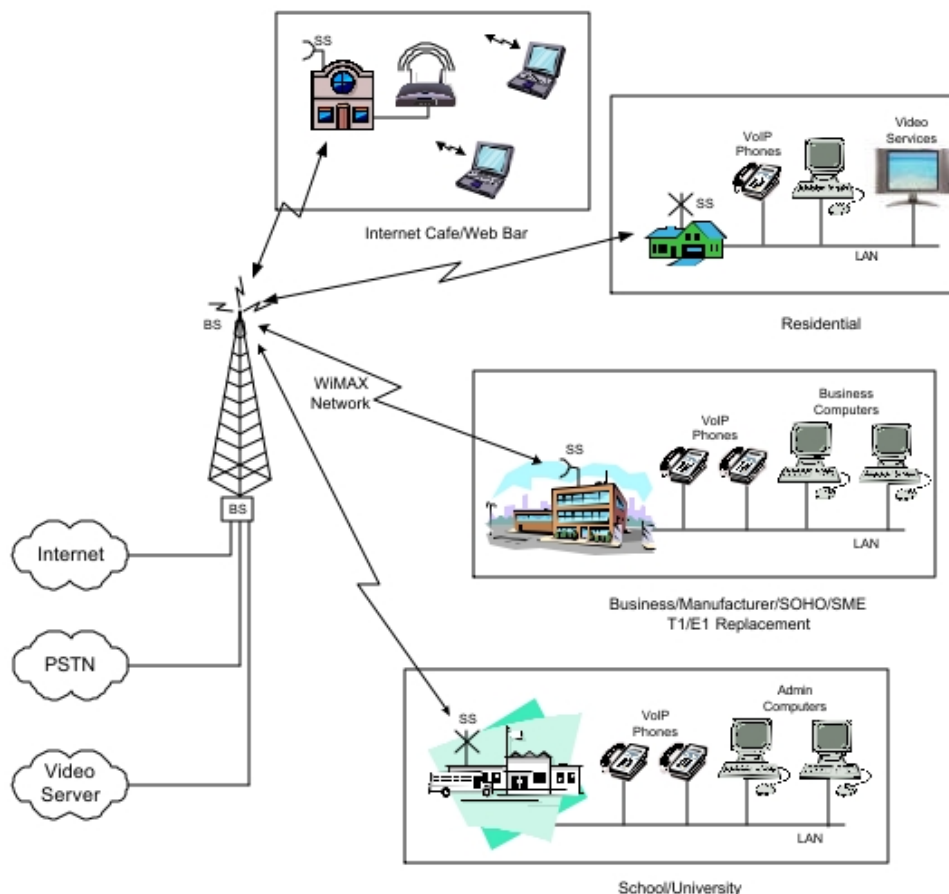


Figura C.7 - Aplicação de redes WiMAX através de um WSP [WiFo05]

O QoS do WiMAX é altamente recomendado, visto o tráfego suportado pelos operadores ser de todo o tipo (voz, dados e vídeo). A camada MAC oferece também múltiplos serviços para

endereçar uma variedade de serviços requisitados pelo cliente. O suporte de múltiplos serviços pode permitir ao operador oferecer diferentes tarifários, que podem reduzir os custos de aquisição do serviço para o cliente e aumentar a média de receitas por utilizador. Todas as ligações de acesso à internet com fios, incluindo fibra óptica, DSL e cabo, exigem um investimento inicial substancial na sua implementação a nível de infra-estruturas. E se nos focarmos em países com mercados emergentes ou zonas mais rurais, onde é necessário construir infra-estruturas de raiz, o investimento deixa de ser rentável e sustentável.

C.2.2 Conectividade Rural

As áreas rurais e suburbanas onde em termos de comunicações o panorama é desolador, a tecnologia WiMAX pode permitir aos operadores assegurar as comunicações nestas áreas (Figura C.8), pois áreas o retorno do investimento por parte de um operador será sempre mais lento.

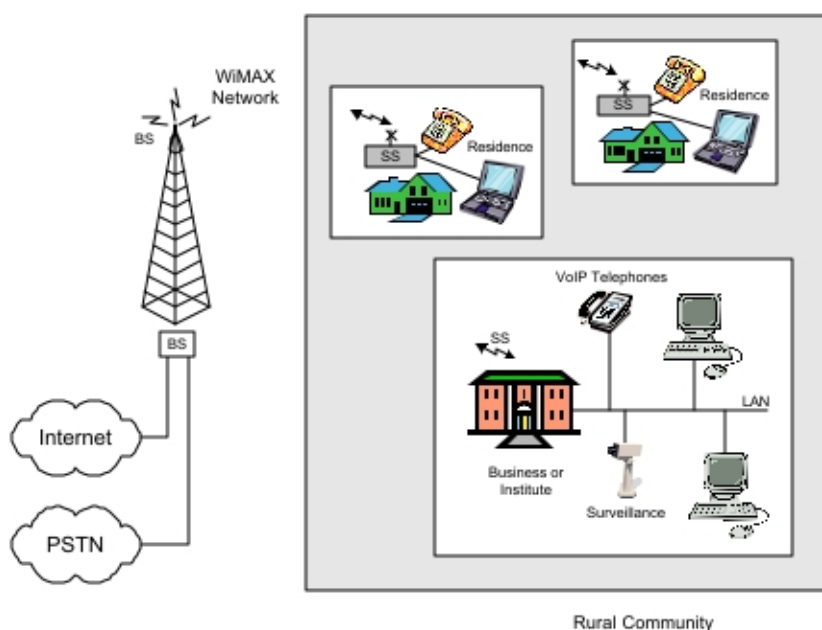


Figura C.8 - Aplicação em zonas rurais de redes WiMAX [WiFo05].

Esta ligação permite, a clientes localizados neste tipo de áreas, ter serviços de voz e de internet. Visto o WiMAX apresentar uma cobertura maior que as outras soluções concorrentes, torna-se uma solução rentável em termos de custo, pois as ligações através de fios não são rentáveis em áreas de baixa densidade populacional.

Anexo D

Conceitos de Propagação

Neste Anexo apresentam-se alguns fenômenos que influenciam e condicionam a propagação de um sinal rádio. A propagação rádio tem um papel chave nos sistemas WMAN, uma vez que é por este meio que os sinais são transmitidos entre a estação base (BS) e a estação terminal (SS), Figura D.1.

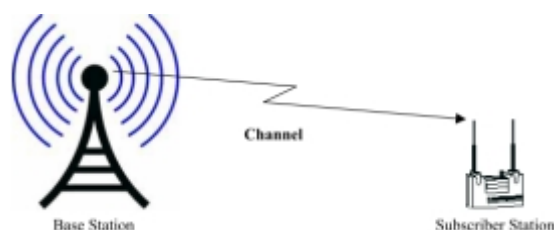


Figura D.1 - Exemplificação do termo canal [WiFo08].

A propagação que se consegue atingir limita o alcance da BS, por conseguinte prediz a dimensão da célula, e o número de células a instalar para cobrir determinada área. Os fenômenos de propagação podem fazer com que algumas SS não recebam um valor satisfatório de sinal, e por outro lado determina quais os canais de frequência mais convenientes a usar. Dependendo da faixa de frequências utilizada, do ambiente e das distâncias envolvidas, haverá predomínio de um ou alguns mecanismos sobre os demais. A Tabela D.1, apresenta um sumário das faixas de radiofrequência.

Tabela D.1 Espectro de radiofrequências [GaSW09]

Nome da Banda	Gama de Frequência	Tipos de serviço
<i>Extremely Low Frequency</i> (ELF)	3-30Hz	Comunicações Submarinas
<i>Super Low Frequency</i> (SLF)	30-300 Hz	Comunicações Marítimas
<i>Ultra Low Frequency</i> (ULF)	300-3000 Hz	Comunicações Marítimas
<i>Very Low Frequency</i> (VLF)	3-30 kHz	Radionavegação
<i>Low Frequency</i> (LF)	30-300 kHz	Radionavegação
<i>Medium Frequency</i> (MF)	300-3000 kHz	Rádiodifusão AM
<i>High Frequency</i> (HF)	3-30 MHz	Rádio amador, Ligações PtP
<i>Very High Frequency</i> (VHF)	30-300 MHz	Rádiodifusão FM e TV
<i>Ultra High Frequency</i> (UHF)	300-3000 MHz	Rádiodifusão UHF, Redes Móveis
<i>Super High Frequency</i> (SHF)	3-30 GHz	Satélite, Radar
<i>Extremely High Frequency</i> (EHF)	30-300 GHz	Rádio acesso fixo e móvel, satélite

Neste Capítulo, aborda-se também alguns destes parâmetros e aspectos que caracterizam a propagação rádio, tais como, a propagação em espaço livre, relação portadora-ruído, elipsóides de *Fresnel*, efeito de *Doppler* e factores de atenuação pela presença da superfície terrestre.

D.1 Propagação em espaço livre

O meio envolvente de uma transmissão nos sistemas de comunicação sem fios é composto pela superfície terrestre e a atmosfera. Portanto, o comportamento do sinal sofre alterações consoante as condições atmosféricas e ao relevo do terreno onde o mesmo se propaga.

A propagação em espaço livre é situação mais primária de propagação, onde se considera apenas um emissor e um receptor englobados num meio envolvente, onde não estão presentes quais quer obstáculos, podendo se calcular o campo eléctrico e qualquer ponto de observação. Designa-se por atenuação em espaço livre a quantidade a_0 dada em [Sale02]:

$$a_0 = \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (\text{D.1})$$

Recordando que,

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{D.2})$$

onde c é a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no vazio, em metros por segundo, e f a frequência em Hertz. Aplicando logaritmos de decimais à expressão (D.1) e utilizando as grandezas expressas em unidades logarítmicas, tem-se:

$$A_0 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{D.3})$$

Segundo Salema [Sale02], a Expressão (D.3) representa a atenuação em espaço livre de uma ligação radioelétrica que se verificaria se, mantendo a distância entre antenas, estas fossem substituídas por antenas isotrópicas (sem perdas) e o meio fosse um dieléctrico perfeito, homogéneo, isotrópico e ilimitado. Se a Expressão (D.2) for aplicada em (D.3) e o valor de c substituído por $2,998 \times 10^8$ m/s, sendo a frequência f em GHz e a distância d em km, surge outra expressão utilizada para efeitos de cálculo de atenuação em espaço livre:

$$A_{0[dB]} = 92.4 + 20 \log_{10}(d_{[km]}) + 20 \log_{10}(f_{[GHz]}) \quad (\text{D.4})$$

Com a frequência em MHz a expressão vem:

$$A_{0[dB]} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{[km]}) + 20 \log_{10}(f_{[MHz]}) \quad (D.5)$$

As expressões referidas são válidas apenas para uma distância mínima, d_{\min} , entre antenas, que pode ser calculada por:

$$d_{\min [m]} = \frac{2d_a^2}{\lambda} \quad (D.6)$$

Onde d é a maior dimensão da abertura de qualquer uma das antenas de recepção ou emissão, em metros.

D.2 Ruído-térmico

A qualidade de uma ligação analógica pode ser estabelecida em função da uniformidade do módulo da função de transferência, da linearidade do argumento da função de transferência e da relação sinal-ruído. As características da função de transferência são essencialmente da responsabilidade do projectista e do fabricante, a relação sinal-ruído depende particularmente da ligação. Para as modulações angulares, a expressão relação sinal-ruído térmico em radiofrequência é, frequentemente, substituída pela expressão equivalente relação portadora-ruído térmico, C/N .

D.2.1 Cálculo da relação portadora-ruído térmico

O ruído predominante nos terminais das antenas dos feixes hertzianos é o ruído térmico, a sua potência, n_0 , é dada pela equação [AnGM07]:

$$n_0 = K_B T b_{rf} \quad (D.7)$$

Onde K_B é a constante de Boltzman ($K_B = 1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]), T é a temperatura observada pela antena, em [K] e b_{rf} é a largura de banda efectiva de ruído, em Hz. Na maioria dos sistemas, a temperatura observada pelas antenas é de aproximadamente 293 K (≈ 20 °C), assim a potência do ruído, em unidades logarítmicas é dada pela equação [AnGM07]:

$$N_{0[dBw]} = -204 + 10 \log_{10}(b_{rf}) \quad (D.8)$$

Ou, em dBm

$$N_{0[dBm]} = -174 + 10 \log_{10}(b_{rf}) \quad (D.9)$$

Se o factor de ruído do receptor, N_f , for somado à potência de ruído, obtém-se o ruído N aos terminais da antena [AnGM07]:

$$N = N_0 + N_f \quad (D.10)$$

Se a temperatura equivalente de ruído do receptor (T_r), em [K], for conhecida, o factor de ruído para uma temperatura ambiente de 293 K será dado por [AnGM07]:

$$N_f = 10 \log \left(1 + \frac{T_r}{293} \right) \quad (D.11)$$

A relação sinal ruído em radiofrequência, S/N_{rf} , também denominada por relação portadora-ruído, C/N , pode ser calculada depois de conhecida a potência recebida à entrada do receptor pela expressão [AnGM07]:

$$S/N_{rf} = C/N = P_r - N \quad (D.12)$$

A potência recebida é dada pela seguinte expressão:

$$P_R = P_E + G_E + G_R - L \quad (D.13)$$

onde L é a atenuação que pode ser calculada consoante o modelo de propagação escolhido, P_E é a potência de emissão, G_E é o ganho da antena de emissão e G_R é o ganho da antena. Substituindo o valor de P_R da fórmula de Friis (D.1), na forma logarítmica em (D.11) obtém-se:

$$C/N = P_E + G_E + G_R - L - N \quad (D.14)$$

D.3 Aspectos elementares da propagação

D.3.1 Atenuação relacionada com a distância

A atenuação relacionada com a distância expressa-se basicamente numa relação entre sinal e distância entre SS e BS, à medida que a distância à BS aumenta a potência do sinal diminui. A redução na amplitude do sinal é causada pelo facto de o sinal se espalhar a partir do emissor, como uma superfície de uma esfera (se a antena for isotrópica). Como a área da

superfície é proporcional ao quadrado do raio, a potência do sinal é proporcional a $1/d^2$, onde d é a distância ao emissor. Contudo as medidas efectuadas nos sinais de rádio móveis mostram que na prática a cadência da potência do sinal cai mais rapidamente do que a formulação anterior. Os valores típicos usados frequentemente para calcular a propagação em rádio móvel são de $1/d^{3.5}$ ou de $1/d^4$, dependendo do modelo aplicado.

As razões para essa atenuação mais rápida no sinal são as seguintes:

- o A presença da terra interfere com a expansão de uma superfície esférica, tendo por resultado somente um hemisfério. A condutividade e a reflectividade da terra determinam de que modo e com que extensão a propagação é afectada.
- o Os sinais são atenuados pela vegetação e pelos edifícios e as perdas associadas com a passagem por obstáculos desta natureza tende a aumentar o expoente na expressão da propagação.

D.3.2 Efeito *Doppler*

Sempre que há um deslocamento relativo entre emissor e receptor, ocorre um deslocamento em frequência no sinal recebido, denominado efeito *Doppler*. Este fenómeno pode ser compreendido da seguinte maneira, com o auxílio da Figura D.2.

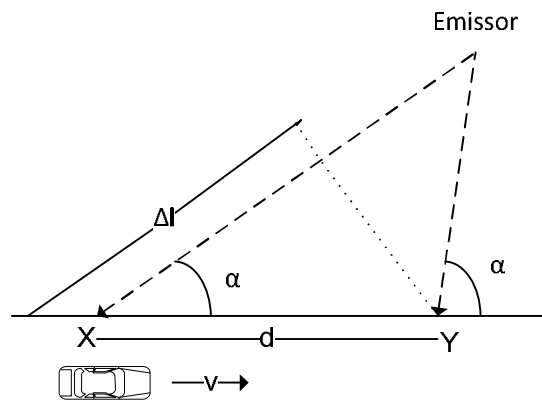


Figura D.2 - Exemplo do efeito de Doppler [Rapp02].

A diferença de fase entre o campo de ambos os raios é dada por:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} \quad (D.15)$$

Considerando o triângulo rectângulo formado, tem-se que $\Delta l \cong d\cos\alpha$. Logo:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\cos\alpha \quad (D.16)$$

Como

$$d = v\Delta t \quad (D.17)$$

Onde,

d - distância percorrida;

v - velocidade média do móvel;

Δt - intervalo de tempo gasto para percorrer d ;

Então,

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta t \cos\alpha \quad (D.18)$$

Dessa forma, a variação de frequência percebida pelo receptor, correspondente à alteração na fase, e é dada por:

$$\Delta f = \frac{\Delta \text{ciclos}}{\Delta t} = \frac{\Delta\phi}{2\pi\Delta t} \quad (D.19)$$

Substituindo (C.18) em (C.19) vem:

$$\Delta f = \left(\frac{2\pi}{\lambda} v \Delta t \cos\alpha \right) \frac{1}{2\pi\Delta t} \rightarrow f_D \cong \frac{v}{\lambda} \cos\alpha \quad (D.20)$$

O resultado f_D é a frequência *Doppler*, ou desvio *Doppler*. Se o móvel desloca-se em direcção à fonte emissora, o desvio *Doppler* é positivo, isto é, a frequência recebida aumenta. Caso o móvel desloque-se de forma a se afastar da fonte emissora, o desvio *Doppler* será negativo, isto é, a frequência aparente na recepção diminuirá, a Tabela D.2, apresenta um exemplo deste fenómeno.

Tabela D.2 - Valores típicos para o desvio de Doppler em sistemas WIMAX [AnGM07].

Frequencia da Portadora [GHz]	Velocidade [km/h]	Desvio de Doppler [Hz]
2.5	2	4.6
2.5	45	104.2
2.5	100	231.5
5.8	2	10.7
5.8	45	241.7
5.8	100	537

Este fenómeno tem grande relevância nos pontos seguintes, devido a mobilidade do utilizador, não existe garantias que esteja em todo o momento em condições de LoS. De seguida faz-se uma breve descrição de desvanecimento lento e rápido.

D.3.2.1 Desvanecimento lento

Desvanecimento lento (*slow fading*) é um fenómeno de rádio móvel causado por exemplo pela passagem de um móvel atrás de um edifício. Durante o período em que o móvel está atrás do edifício o sinal recebido é reduzido. Ao longo da condução em estrada, se o móvel passar atrás de um conjunto de edifícios isso causa uma redução da potência do sinal, ou um desvanecimento de modo relativamente lento. Este fenómeno não é aplicado em redes fixas, porque o receptor não se move, mas se entre os receptores e o emissor houver sombras, poderá verificar-se este fenómeno.

D.3.2.2 Desvanecimento rápido

O desvanecimento rápido (*fast fading*) é um outro fenómeno que ocorre em redes móveis de radiofrequência. É causado pela chegada do sinal ao receptor através de múltiplos trajectos (*multipath*), se dois sinais forem recebidos no móvel, em que um deles passa directamente da base para o móvel através de um trajecto directo (LoS) e o outro é reflectido por uma determinada superfície, como se mostra na Figura D.3, ao móvel chega um sinal que é composto por aqueles dois sinais. O sinal reflectido viajou por um trajecto ligeiramente mais longo que o sinal directo e portanto está atrasado ligeiramente em relação ao sinal directo. O resultado deste atraso é que a fase do sinal reflectido difere da fase do sinal transmitido. O valor do atraso é dado pela diferença da distância multiplicada pela velocidade de luz. A diferença de fase é este valor multiplicado pela frequência de transmissão.

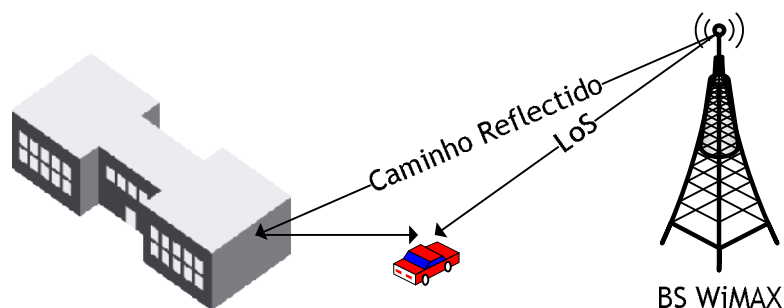


Figura D.3 - Propagação multi-percurso.

Supondo que o percurso reflectido é 10 m superior ao percurso directo, como a velocidade da luz no ar é aproximadamente 3×10^8 m/s, pelo percurso reflectido o sinal leva mais 30 ps a chegar ao móvel. Se a frequência da transmissão for 3 GHz, um ciclo da onda nessa frequência é de $0,3 \times 10^{-12}$ s, pelo que a onda reflectida é atrasada 100 ciclos em relação à onda directa. Cada distância adicional de 10 cm atrasa a onda em mais um ciclo da portadora.

Quando a onda reflectida é atrasada por um múltiplo exacto de um ciclo da onda portadora, diz-se que os dois sinais recebidos estão em fase e os dois sinais somam-se, de modo que o sinal total recebido tem duas vezes a amplitude do sinal directo. Quando a onda reflectida é atrasada de um múltiplo mais meio-ciclo, diz-se que os dois sinais estão em oposição de fase e cancelam-se exactamente, isto é, nesse ponto o móvel perde completamente o sinal recebido. Deslocando-se apenas meio comprimento de onda, neste caso 5 cm, o móvel move-se de uma posição onde a amplitude do sinal é dupla do sinal directo para outra onde o sinal recebido é nulo. Este fenómeno repete-se continuamente à medida que o móvel se desloca, o que origina que o sinal desvanece e recupera rapidamente, dando origem ao nome. Na vida real há muito mais que apenas um único trajecto do sinal reflectido, pelo que o fenómeno do desvanecimento é mais complexo. Na Figura D.4, mostra-se a forma de onda de um desvanecimento típico, denominado de *Rayleigh*¹¹. Pode-se ver num período de 1 segundo a ocorrência de vários desvanecimentos, alguns tão profundos quanto 40 dB.

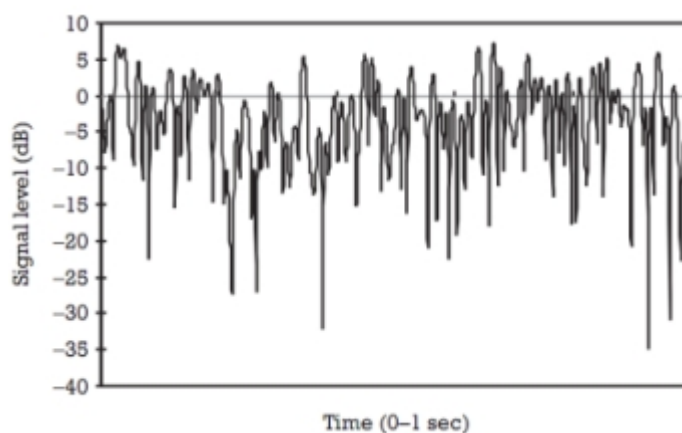


Figura D.4 - Desvanecimento de Rayleigh para um móvel a velocidade pedestre [PrGr58].

Uma dificuldade adicional ao desvanecimento rápido tem a ver com reflexões em objectos distantes, por exemplo numa montanha afastada. Se o atraso do sinal reflectido for muito grande pode ser superior ao tempo de transmissão de um bit de informação, pelo que quando o sinal reflectido chegar, transporta informação diferente do sinal directo. O resultado é que o *bit* transmitido anteriormente (ou símbolo), interfere com o símbolo actual, gerando um fenómeno conhecido como interferência inter-simbólica (*inter symbol interference*, ISI).

¹¹ Este nome surge em homenagem a Lord Rayleigh, que desenvolveu a teoria da dispersão de *Rayleigh*, que definiu matematicamente a dispersão da luz ou qualquer outra radiação electromagnética.

O desvanecimento rápido é pouco relevante para WMAN, pois para sistemas em linha de vista os sinais reflectidos tendem a ser muito mais fracos do que o sinal directo, pelo que o efeito do cancelamento é mínimo. Somente quando o trajecto principal é sombreado é que o desvanecimento rápido pode provavelmente ser um problema.

D.3.3 Difraccção

Em redes móveis a existência de LOS entre a base e o terminal móvel é pouco usual, contudo os sistemas WMAN são projectados de modo a que a LOS seja frequente. Isso deve-se ao facto de nas elevadas frequências usadas em WMAN, as ondas de rádio não difractarem bem em torno dos obstáculos, pois para frequências elevadas os obstáculos tendem a bloquear mais o sinal, tendo como resultado uma maior atenuação do sinal. Isto não é problemático para WMAN porque os equipamentos receptores podem ser colocados nos telhados dos edifícios, onde é provável ter linha de vista. Apesar das cogitações anteriores acerca da necessidade de LOS, os sinais rádio usados em WMAN têm alguma capacidade, embora limitada de difracção, o que juntamente com as reflexões podem frequentemente fornecer um nível adequado do sinal. A difracção é um fenómeno causado pelo facto que as ondas electromagnéticas se propagarem como se cada ponto da frente de onda gerasse uma onda nova, como se exemplifica na Figura D.5.

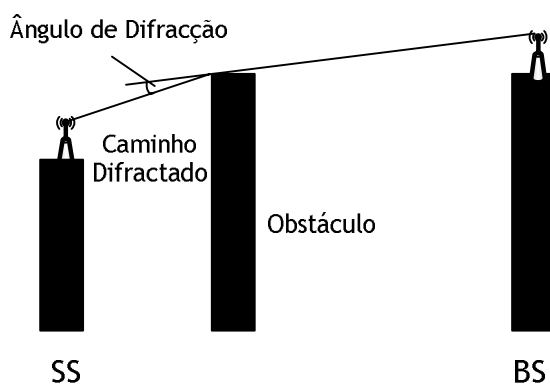


Figura D.5 - Exemplo de difracção.

Quando a onda passa pelo alto de um edifício, são emitidas ondas em todos os sentidos, incluindo as direcções que não estão em linha de vista, contudo quanto mais afastado do trajecto de LOS, mais fraco é o sinal. A extensão da difracção depende de dois parâmetros, o ângulo de difracção (isto é, o ângulo com que o trajecto necessita "se dobrar" enquanto passa o alto do edifício que obscurece o receptor para chegar no receptor) e a frequência da onda de portador. Quanto maior o ângulo, mais baixo o sinal recebido e quanto mais elevada a frequência mais baixo o sinal recebido.

Para além das atenuações suplementares provocados pela construção do Homem existem outras provocadas pela Natureza, tais como a atenuação devido a gases atmosféricos, devido à areia e poeira, e devido a hidrometeoritos, estando esta última relacionada com os fenómenos climatéricos como a chuva, a queda de neve ou a existência de neblina. Contudo, segundo Salema [Sale02], estas atenuações podem ser desprezadas em frequências superiores a 5 GHz.

O mecanismo de difracção pode ser compreendido através das formulações elaboradas nos pontos seguintes.

D.3.3.1 Elipsóides de *Fresnel*

Como já referido na secção 2.3, as elipsóides de *Fresnel* ditam se a condição de propagação entre duas antenas pode ou não ser considerada uma propagação em espaço livre.

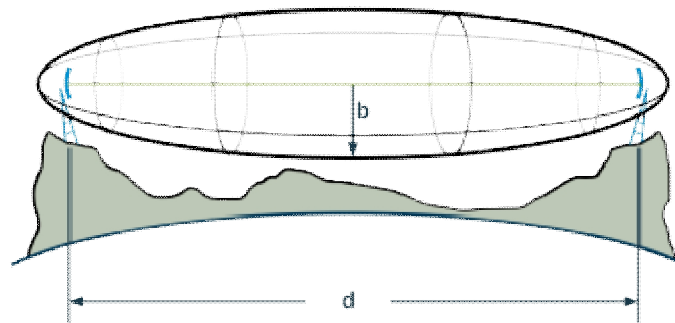


Figura D.6 - Representação da zona de Fresnel [Wiki10].

A zona de *Fresnel* pode ser definida como uma série de elipses concêntricas em torno de uma linha imaginária, d , de raio directo entre a antena emissora e a antena receptora, como representado na Figura D.6, na Figura o raio é representado pela letra b .

Usualmente designa-se por ligação em LoS quando o emissor consegue visualizar o receptor sem qualquer tipo de obstrução, sendo o contrário situações de NLoS. No entanto, apenas se considera uma propagação em espaço livre caso o primeiro elipsóide de *Fresnel* não esteja obstruído por obstáculos em mais de 60% do seu volume. O raio r do primeiro elipsóide de *Fresnel* pode ser calculado pela expressão dada em [Sale02]:

$$r_{[m]} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d}{4}} \quad (D.21)$$

Onde λ vem de (D.2) e d é expresso em metros. Transformando a expressão (D.21) em função de f , em GHz, e d em km, vem:

$$r_{[m]} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{300 \cdot d}{\lambda}} \quad (\text{D.22})$$

Normalmente, a principal preocupação para a desobstrução do primeiro elipsóide de *Fresnel* reside nos obstáculos que se encontram debaixo do raio directo entre a estação emissora e o terminal receptor. No entanto, é importante lembrar que as zonas de *Fresnel* são tridimensionais, ou seja, é necessário ter também em conta a desobstrução desta zona em todas as direcções à volta do raio directo. Esta condição torna-se problemática de pôr em praticar no caso de zonas urbanas devido à constante proximidade de edifícios.

D.3.3.2 Princípio de *Huygens*

O Princípio de *Huygens*, elaborado por Christian Huygens no século XVII, propõe que cada ponto localizado na frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas, que ao se somarem formarão uma nova frente de onda e assim consecutivamente ao longo da propagação. A Figura D.7, ilustra este princípio.

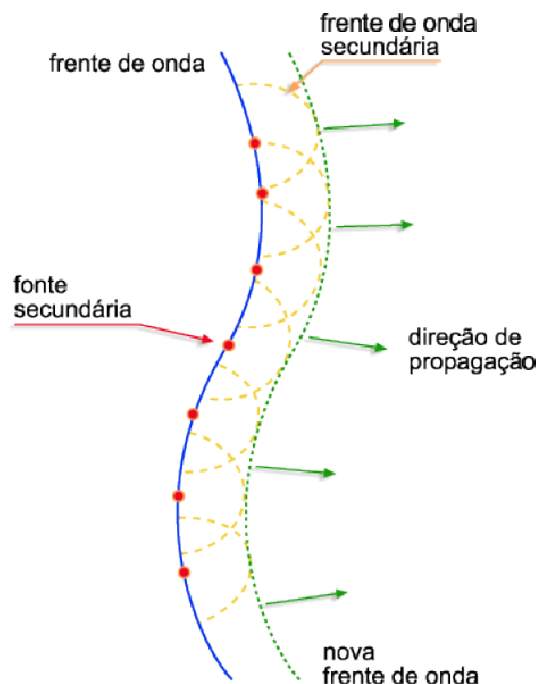


Figura D.7 - Princípio de Huygens [EFIS10].

Se durante a propagação, uma frente de onda encontra um obstáculo, parte da frente de onda será obstruída pelo obstáculo. Se analisarmos a propagação sem o princípio de *Huygens*, ou sem qualquer outra maneira de se considerar a difracção, toda a região situada atrás do obstáculo não será iluminada (região de sombra). Porém, considerando difracção na análise, como feito através do princípio de *Huygens*, as fontes pontuais da região não obstruída

emitirão frentes de onda secundárias que iluminarão a região situada atrás do obstáculo, como se ilustra na Figura D.8

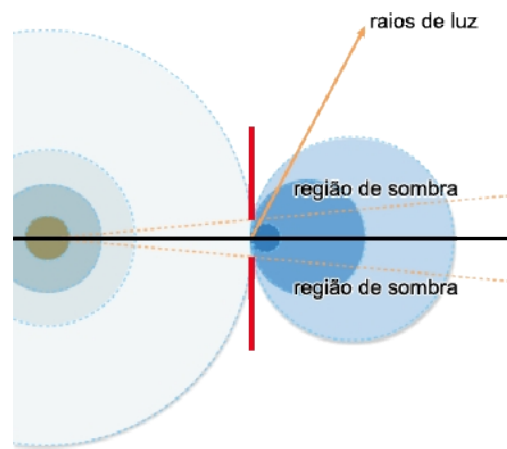


Figura D.8 - Exemplificação do Princípio de Huygens [EFIS10].

Diz-se que a energia foi, então, difractada. Uma análise através da teoria electromagnética mostra que a onda incidente induz correntes no obstáculo e que o campo irradiado por essas correntes constitui-se no campo difractado.

D.3.3.3 Difraccção em lâmina

Este conceito é utilizado para a determinação do campo difractado por um obstáculo em lâmina (obstáculo de espessura infinitesimal e dimensão infinita na direcção transversal à propagação, teoricamente), Figura D.9.

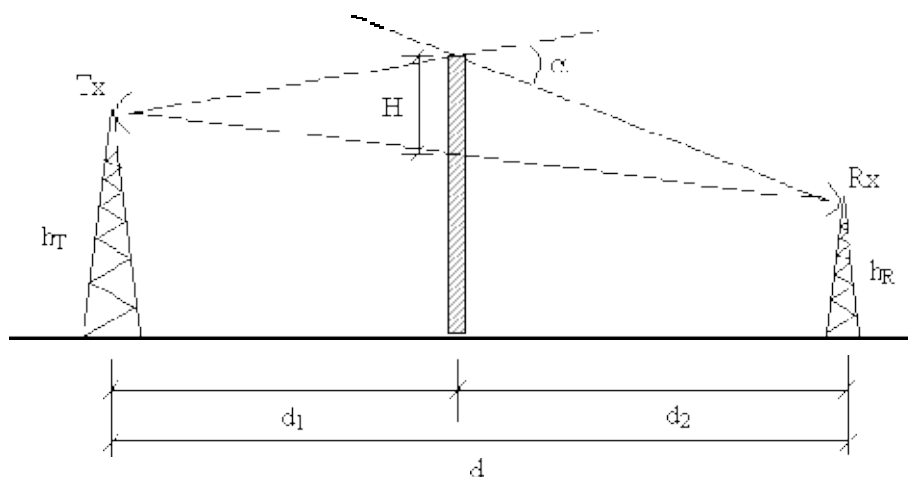


Figura D.9 - Geometria da difracção em lâmina [Rapp02].

Este fenómeno pode ser causado por uma montanha ou colina e a atenuação pode ser quantificada. Este modelo de difracção é o mais simples baseado nos conceitos de *Fresnel*. Como se apresenta Figura D.9, a perda por difracção, consiste na existência de um obstáculo de dimensão transversal infinita, perpendicular ao percurso directo entre emissor e receptor, ficando o receptor em zona de sombra. À medida em que o obstáculo interfere com a linha de vista, o campo recebido começará a oscilar, sendo a soma de todas as secundárias, definidas por Huygens. A força do campo eléctrico, E_d , é dada por:

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^\infty \exp\left(\frac{-j\pi t^2}{2}\right) dt \quad (D.23)$$

O integral de Fresnel, $F(v)$, é uma função do parâmetro de difracção de Fresnel-Kirchoff,

$$v = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 + d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (D.24)$$

O ganho de difracção, na presença de difracção em lamina, é dado por:

$$G_{dB} = 20 \log|F(v)| \quad (D.25)$$

Pela Figura D.10, o ponto em que o campo vale E_0 (valor de campo no espaço livre), pela última vez, ocorre por ordem de $v \approx -0,8$. Esse ponto corresponde a uma ocupação de 58 % do primeiro elipsóide de *Fresnel*, em relação ao obstáculo, não se considerando obstrução, apenas a partir deste valor temos obstrução.

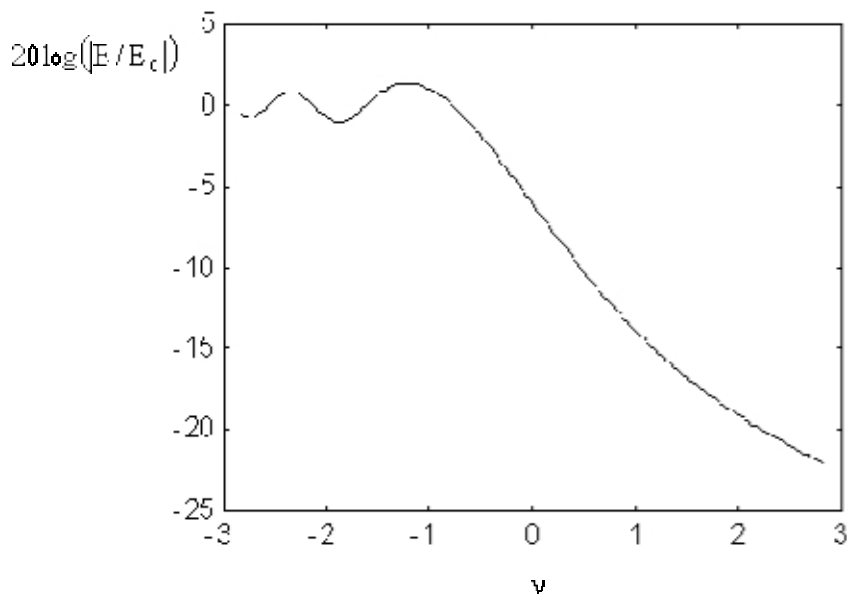


Figura D.10 - Campo eléctrico difractado por difracção em lâmina[Rapp02].

D.4.5 Reflexão

A reflexão é causada quando uma onda atinge um objecto e é reflectida para trás, como exemplificado na Figura D.11. Diferentes materiais reflectem as ondas rádio de modo diferente, o índice de absorção pelo material é um parâmetro chave para determinar o nível do sinal que se obtém. Na prática, os edifícios de betão e de vidro fornecem excelentes condições de reflexão. Muitas superfícies de edifícios contudo são "ásperas," por isso a reflexão é dispersa quando atinge o edifício, o que faz espalhar a área das reflexões mas enfraquece o sinal recebido.

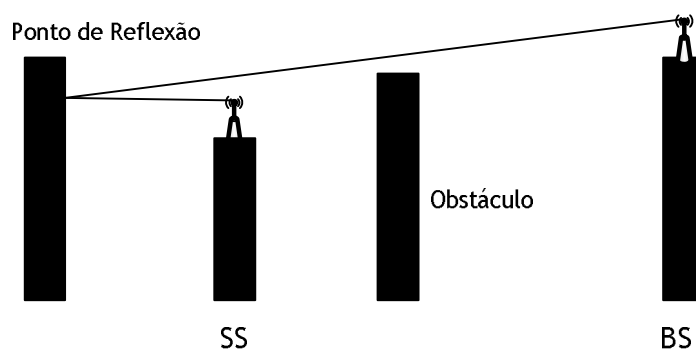


Figura D.11 - Exemplo de sinal reflectido.

A principal dificuldade para WMAN, com as suas antenas direccionais no equipamento do assinante, está em encontrar as reflexões. Um instalador se não conseguir obter o nível de sinal adequado ao apontar a antena para a estação base, pode necessitar de rodar a antena até conseguir encontrar reflexões apropriadas, o que em algumas situações poderá ser difícil.

D.4.6 Dispersão

A dispersão é um outro mecanismo que ocorre com a presença de um obstáculo com a mesma dimensão ou na presença de um elevado número de obstáculos, Figura D.12.

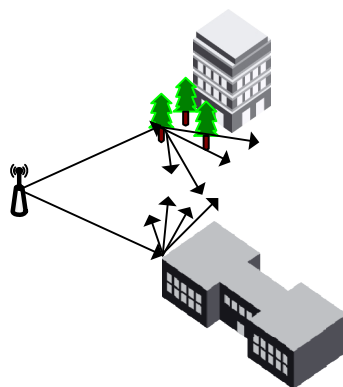


Figura D.12 - Exemplo de dispersão.

A dispersão de ondas é normalmente produzida por superfícies rugosas, objectos pequenos, vegetação, sinais de trânsito e postes de luz, podendo afectar significativamente a potência recebida nos sistemas de comunicação móveis.

D.4.7 Refracção

A refração é um mecanismo que ocorre quando existe uma alteração de densidade do meio onde se propagava. Por conseguinte, a onda será desviada da sua trajectória, sendo que parte do sinal sofrerá reflexão e o nível de potência será reduzido.

D.5 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo são apresentadas alguns conceitos relevantes na percepção de como ocorre a propagação de um sinal entre o emissor e o receptor. São referidas o espectro de frequências utilizadas e em que aplicação, notando-se que as frequências mais altas são usadas em comunicações que necessitam de maior largura de banda e que resistam melhor ao aspecto da atenuação.

Refere-se a propagação em espaço livre, como forma básica da propagação, não se considerando quaisquer obstáculos à propagação do sinal. O mecanismo de difracção foi abordado, especificando-se três mecanismos adjacentes.

- As elipsóides de *Fresnel* permitem, através do nível de obstrução, predizer se a propagação ocorre em espaço livre, caso a elipsóide não seja obstruída em mais de 60% do seu volume.
- O Princípio de Huygens propõe que cada ponto localizado na frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas, que ao se somarem formarão uma nova frente de onda, permitindo ao sinal contornar obstáculos.
- Difracção em Lâmina, é utilizado para a determinação do campo difractado por um obstáculo em lâmina (obstáculo de espessura infinitesimal e dimensão infinita na direcção transversal à propagação, teoricamente), como por exemplo, uma montanha.
- Aspectos da atmosfera, tais como, a atenuação devido a gases atmosféricos, areia e poeira, fenómenos climatéricos, como a chuva, a queda de neve ou a existência de neblina.

Outros mecanismos de atenuação foram abordados, como por exemplo, a relação da atenuação em função da distância que provoca que a potência de sinal seja proporcional $1/d^x$, sendo que este valor, x tende a ser mais elevado. O desvanecimento lento e rápido, consequência do efeito *Doppler*, causado por sombras de obstáculos e recepção do sinal por

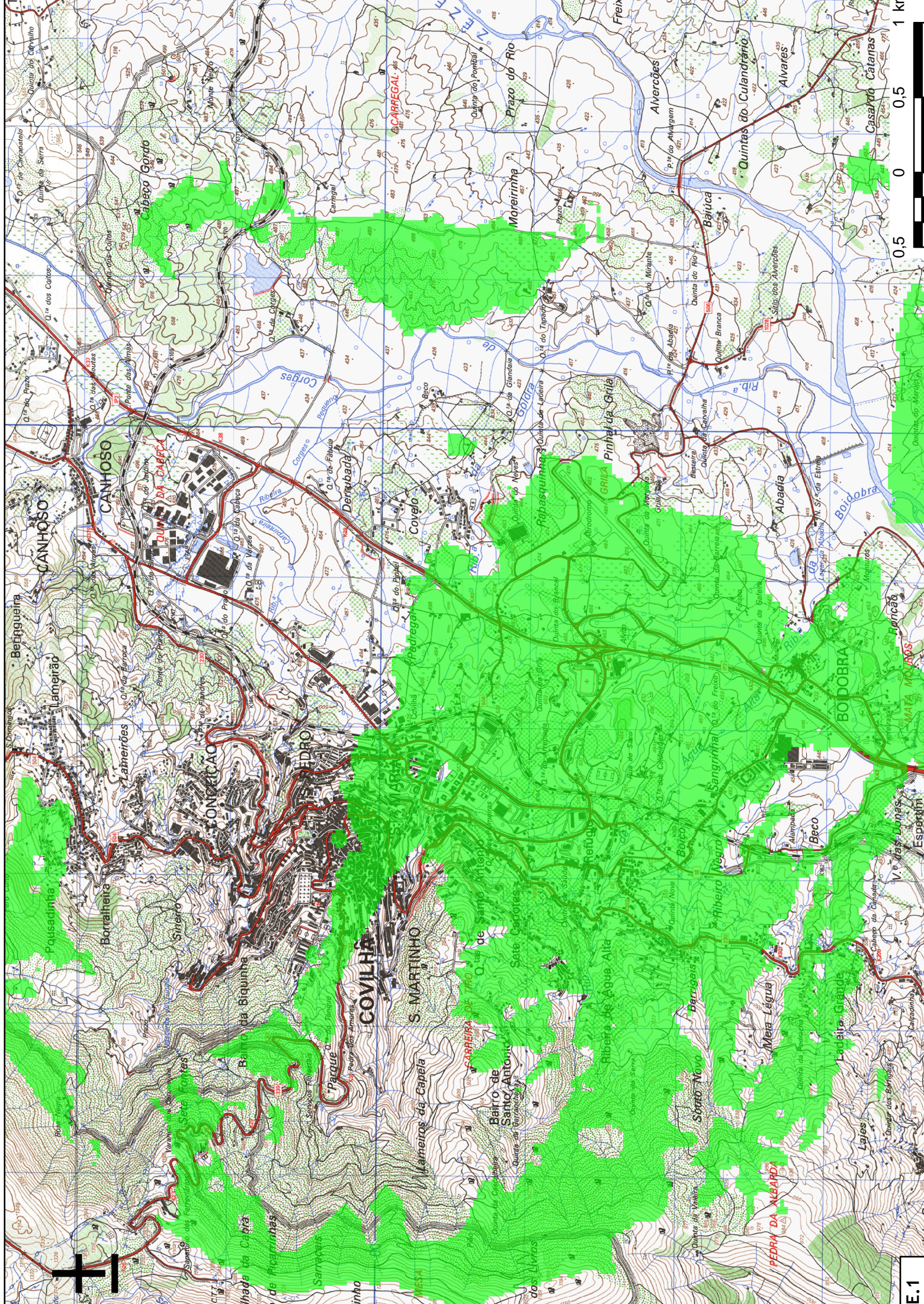
multi-percursos, respectivamente. No desvanecimento rápido referiu-se ainda o fenómeno de dispersão de *Rayleigh* e de interferência inter-simbólica, sendo que todos estes aspectos influenciam a propagação livre do sinal. Outros aspectos abordados foram a reflexão, dispersão e refração. De todos estes mecanismos conclui-se que os canais rádio são sujeitos a diversas influências consoante o cenário e ambiente por onde se propagam, sofrendo atenuações que provocam perda da potência do sinal.

Anexo E

Resultados obtidos Winprop™

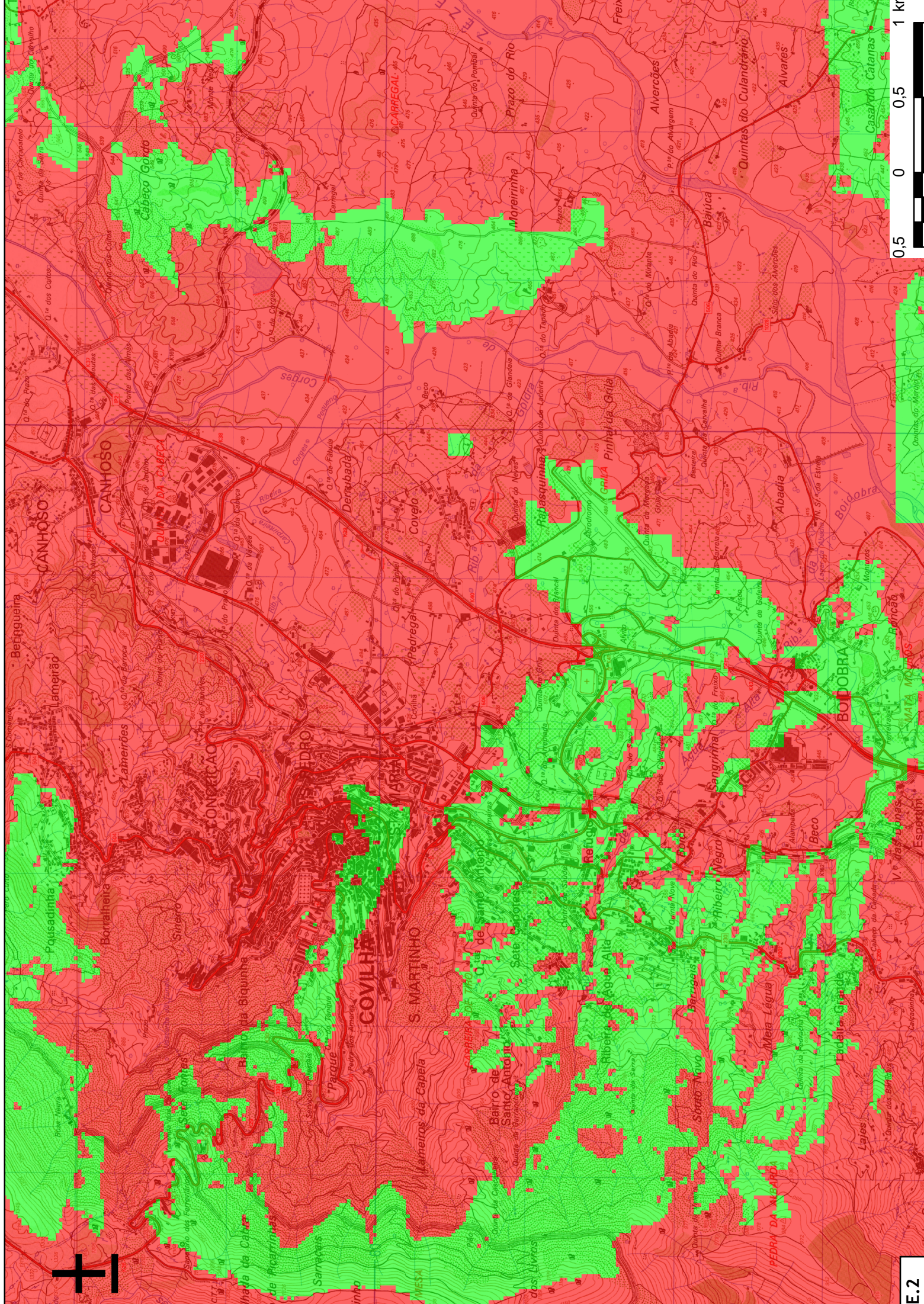
Neste Anexo, são apresentados os resultados obtidos na ferramenta de planejamento de redes móveis, e tratados no ArcMap, em tamanho A4. Sendo apresentados os mapas relativos às duas alturas da estação base. Por não ser possível apresentar as legendas das figuras individualmente, os seguintes pontos definem as legendas de cada figura:

- Figura E.1 - Carta expandida (A4), da cobertura da célula, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.2 - Carta expandida (A4) das condições de LoS e NLoS, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.3 - Carta expandida (A4) dos ritmos de transmissão, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.4 - Carta expandida (A4) da potência máxima recebida, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.5 - Carta expandida (A4) dos esquemas de modulação, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.6 - Carta expandida (A4) da atenuação do sinal, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.7 - Carta expandida (A4) da potência de sinal, com h_{BS} a 15 metros.
- Figura E.8 - Carta expandida (A4) da cobertura da célula, com h_{BS} a 21 metros.
- Figura E.9 - Carta expandida (A4) das condições de LoS e NLoS, com h_{BS} a 21 metros.
- Figura E.10 - Carta expandida (A4) dos ritmos de transmissão, com h_{BS} a 21 metros.
- Figura E.11 - Carta expandida (A4) da potência máxima recebida, com h_{BS} a 21 metros.
- Figura E.12 - Carta expandida (A4) dos esquemas de modulação, com h_{BS} a 21 metros.
- Figura E.13 - Carta expandida (A4) da atenuação do sinal, com h_{BS} a 21 metros.
- Figura E.14 - Carta expandida (A4) da potência de sinal, com h_{BS} a 21 metros.



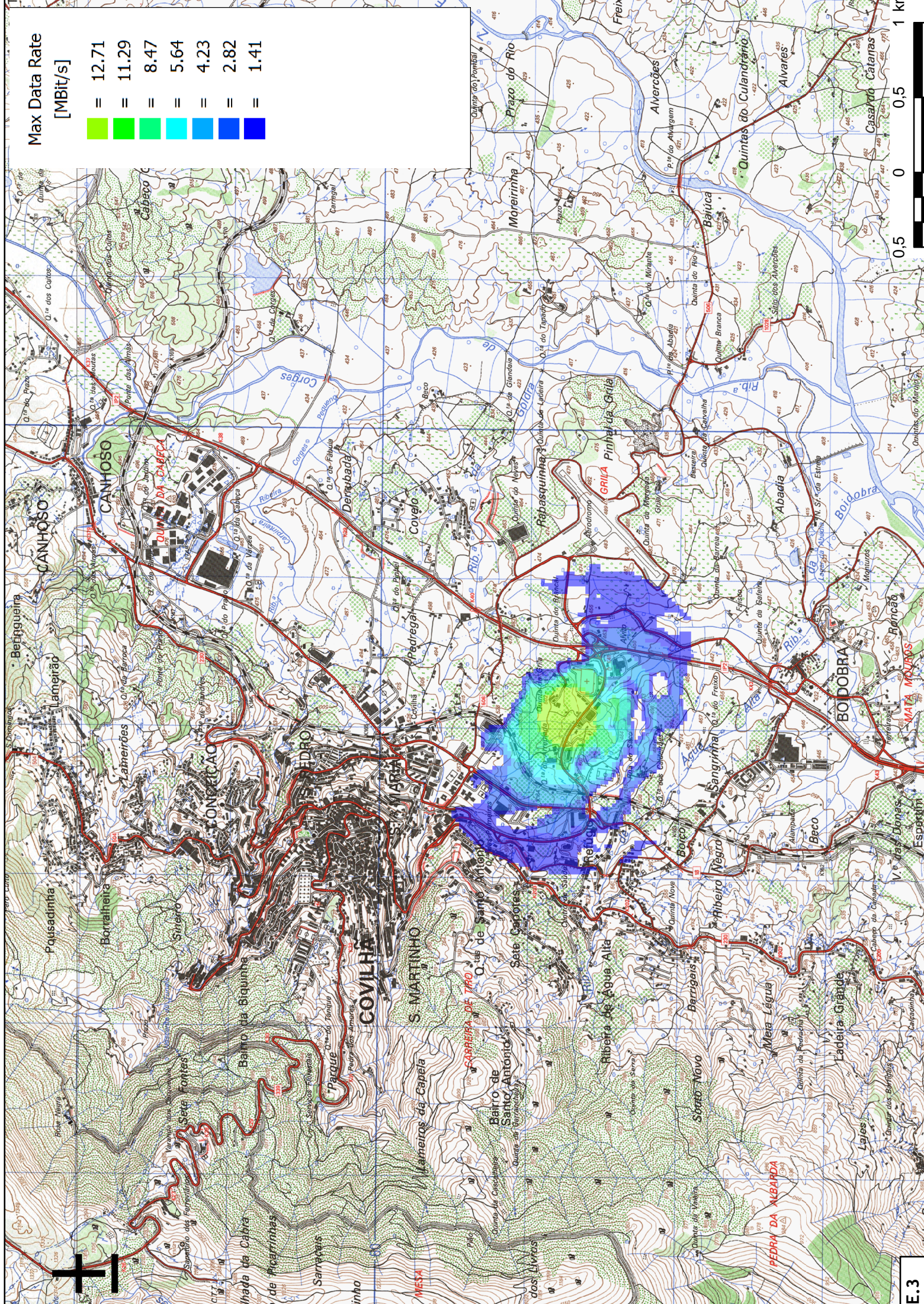
0 0,5 1 km

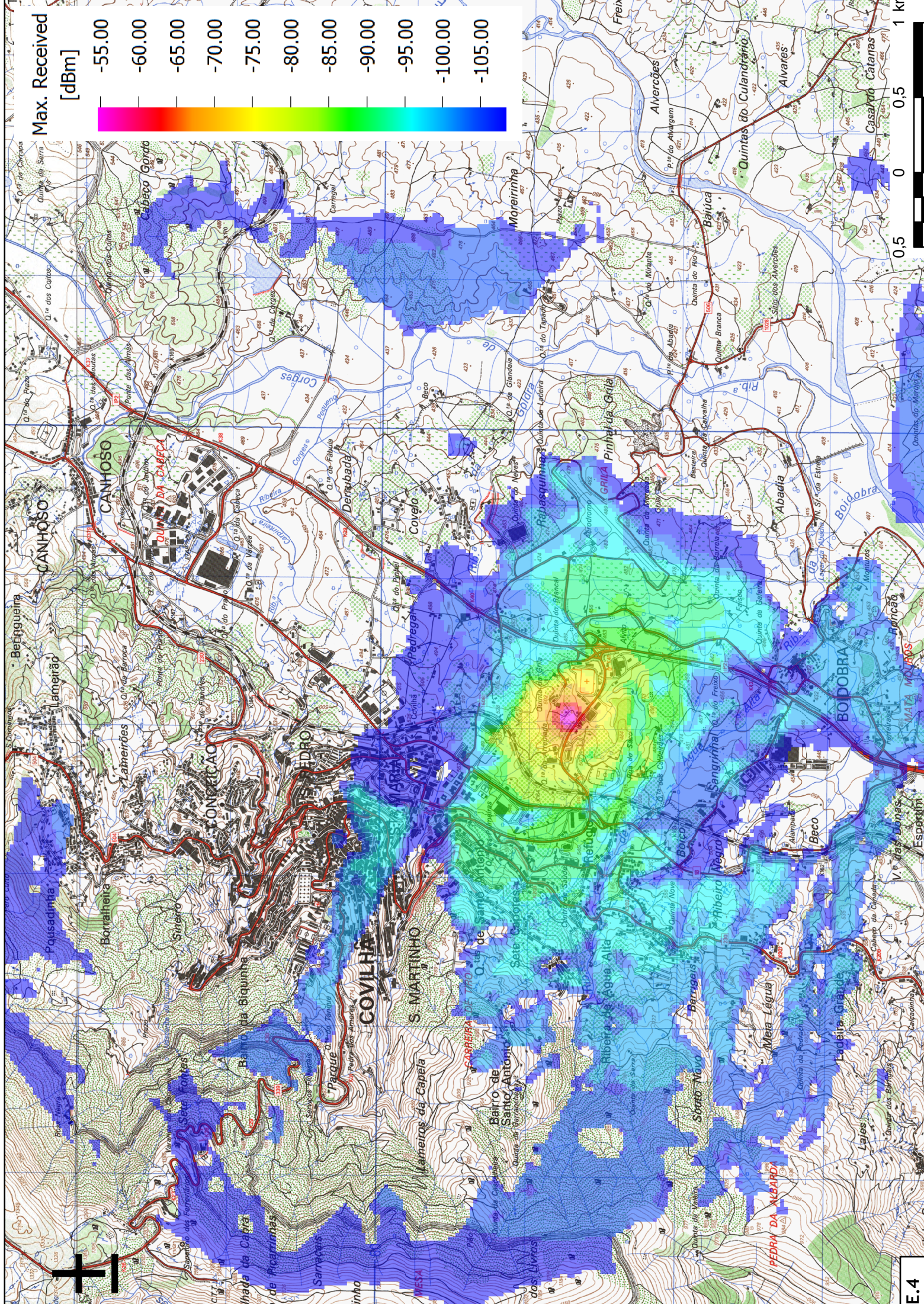
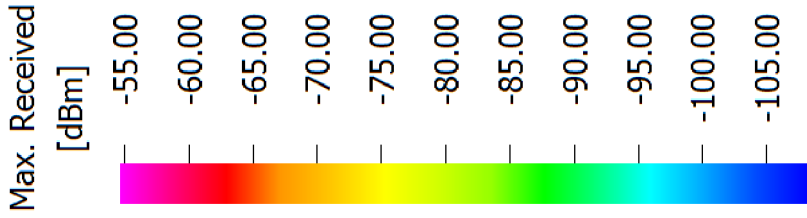
E:1

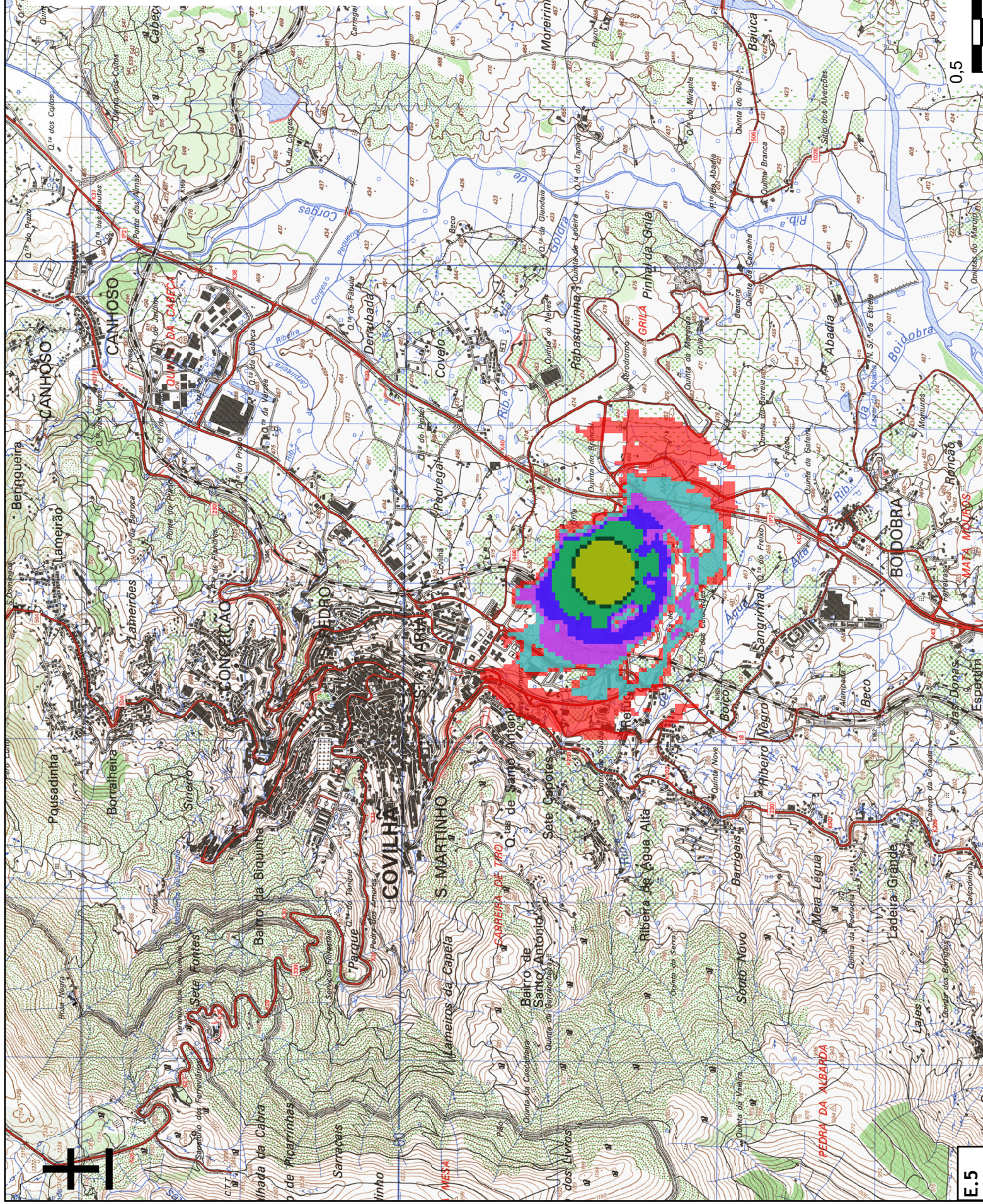
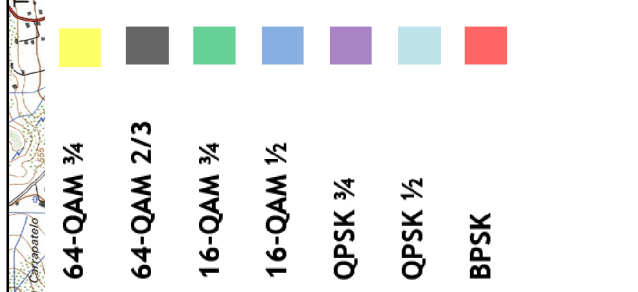


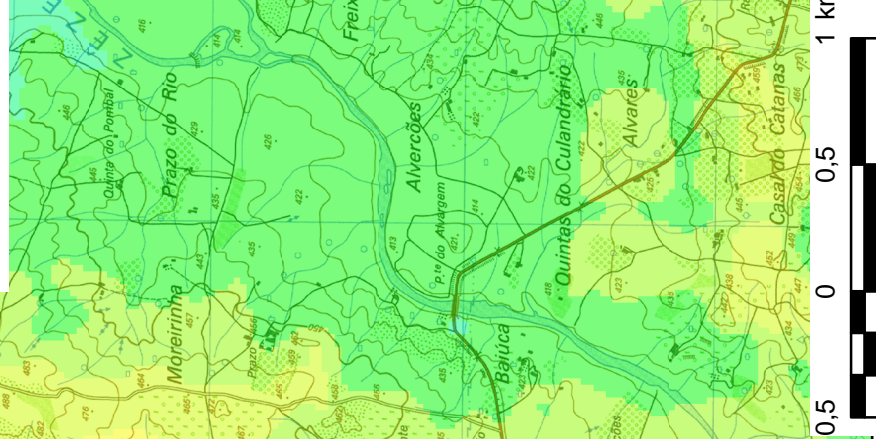
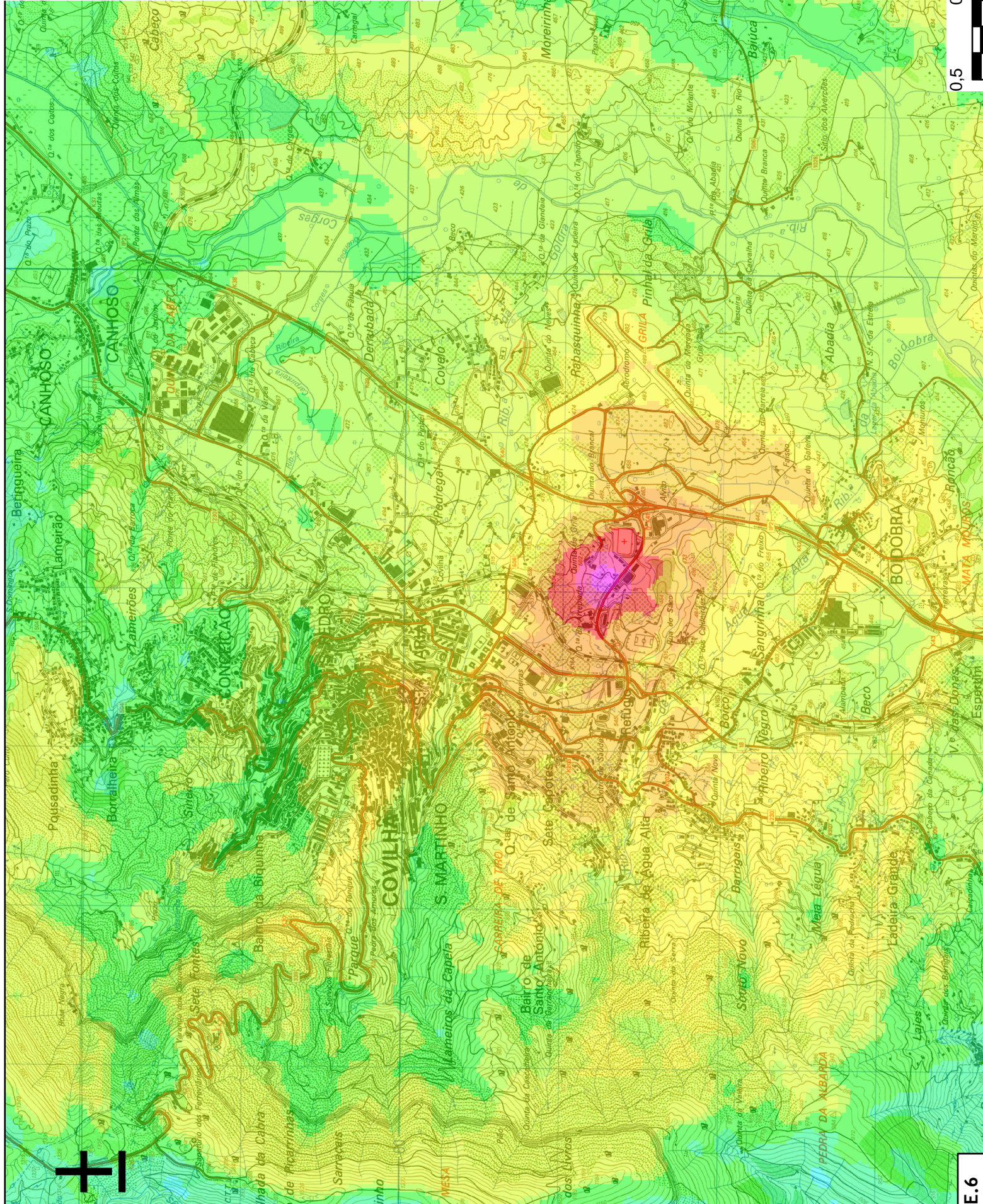
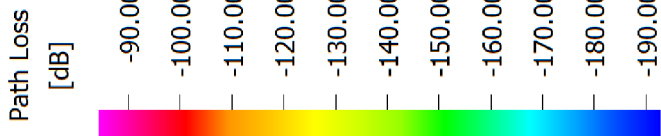
Max Data Rate
[MBit/s]

- = 12.71
- = 11.29
- = 8.47
- = 5.64
- = 4.23
- = 2.82
- = 1.41

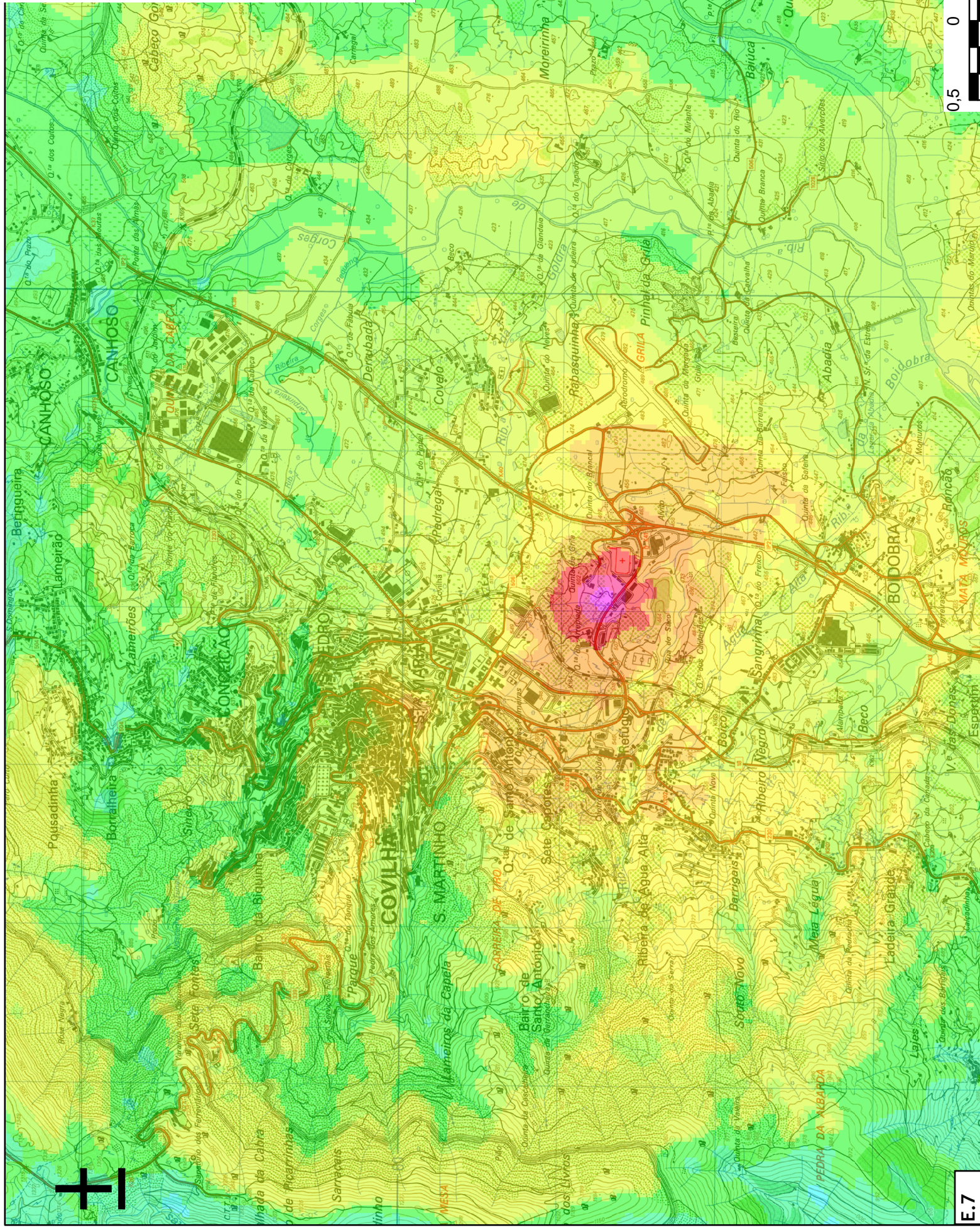
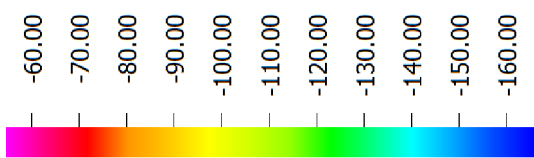




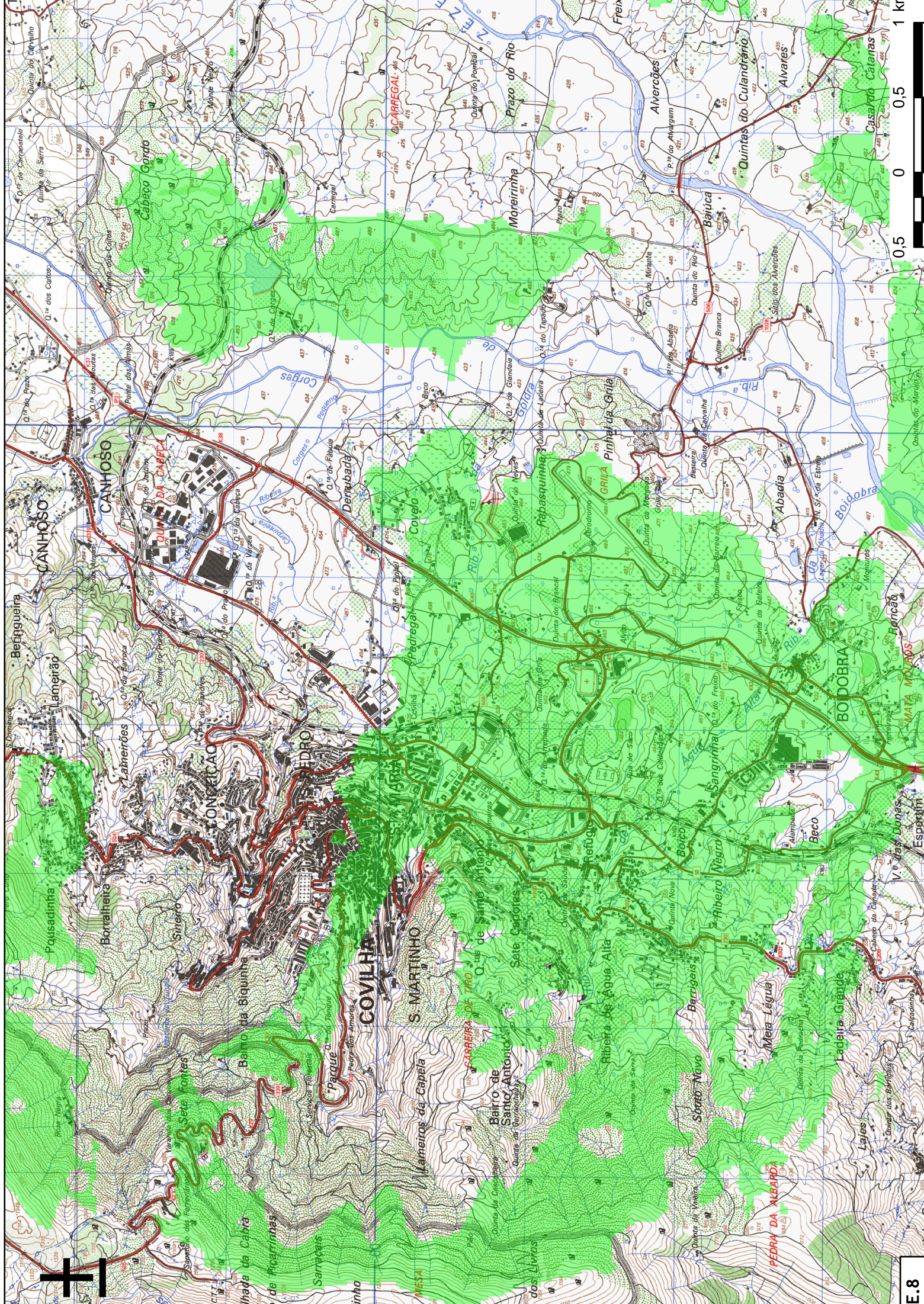




Power [dBm]

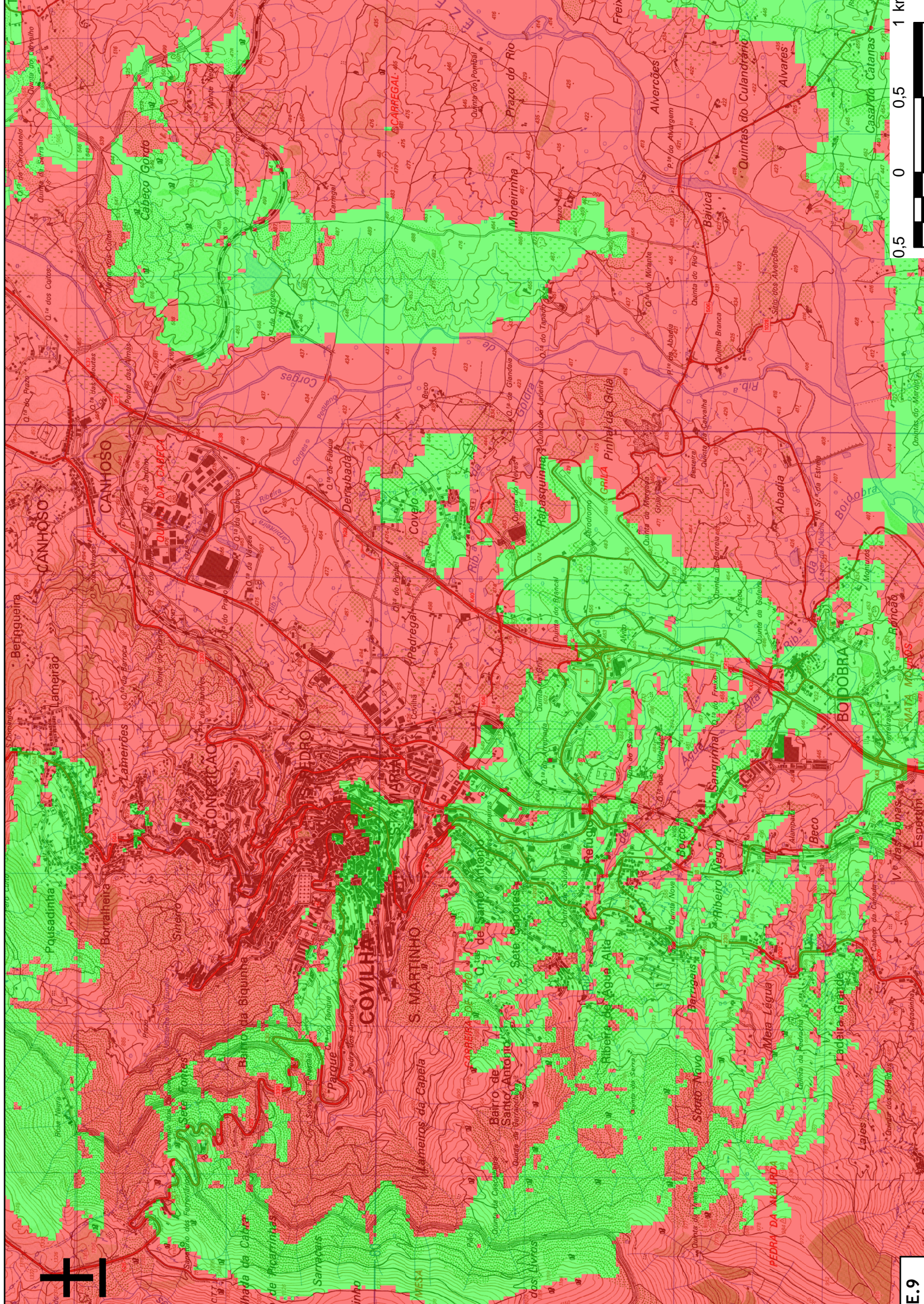


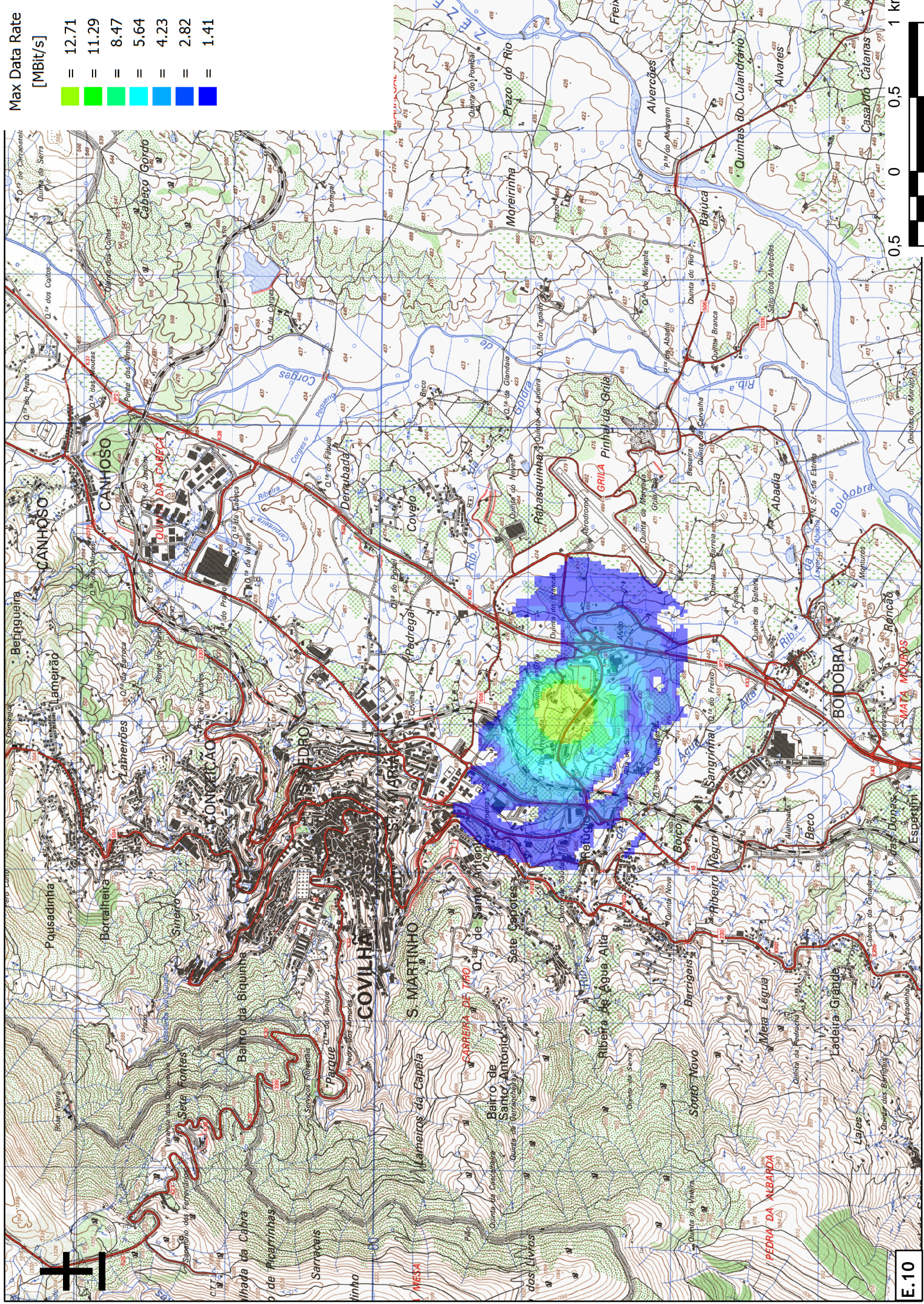
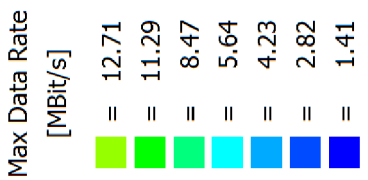
E:7



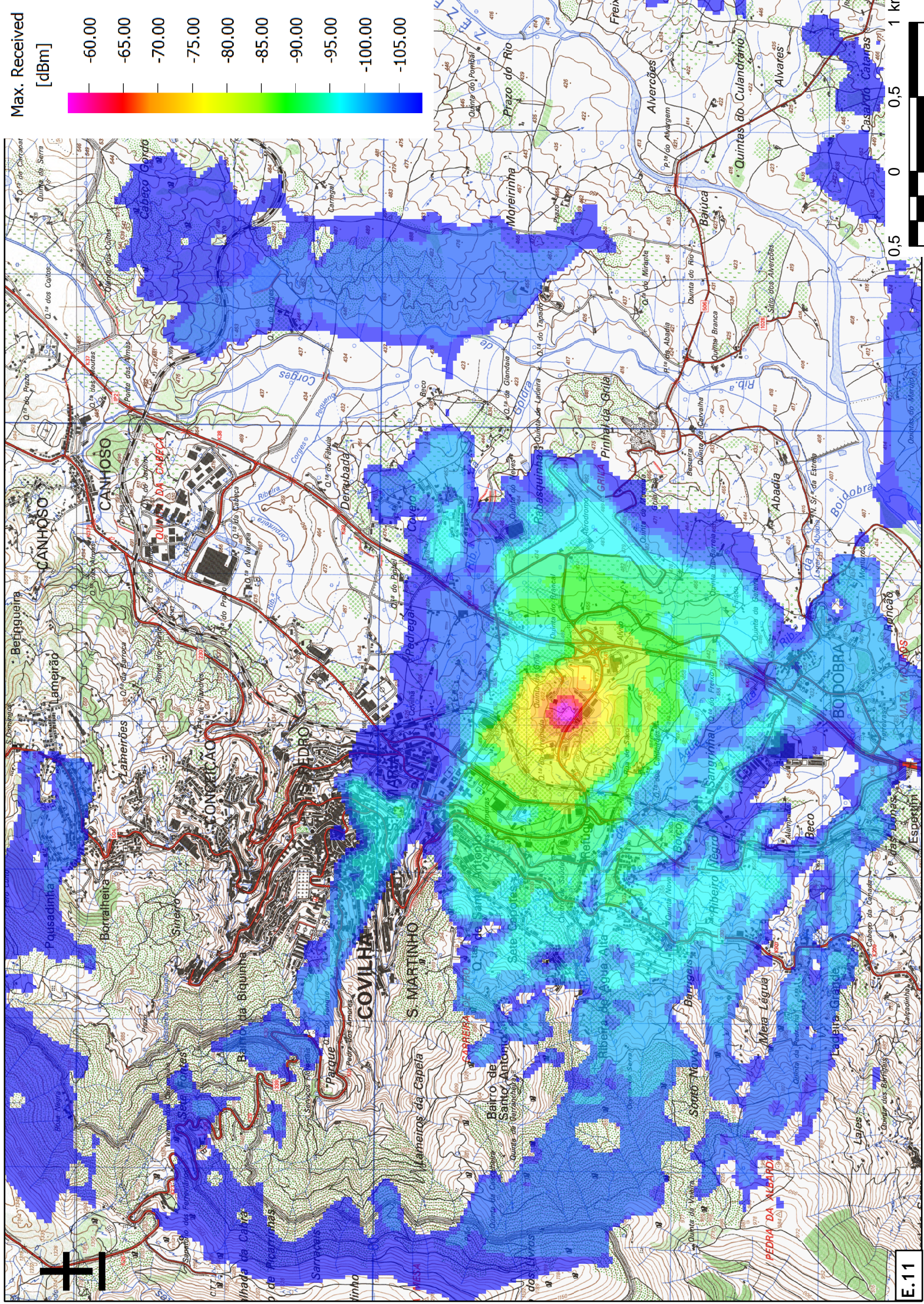
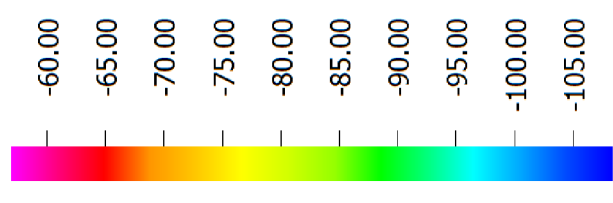
1 km
0,5
0

E.8



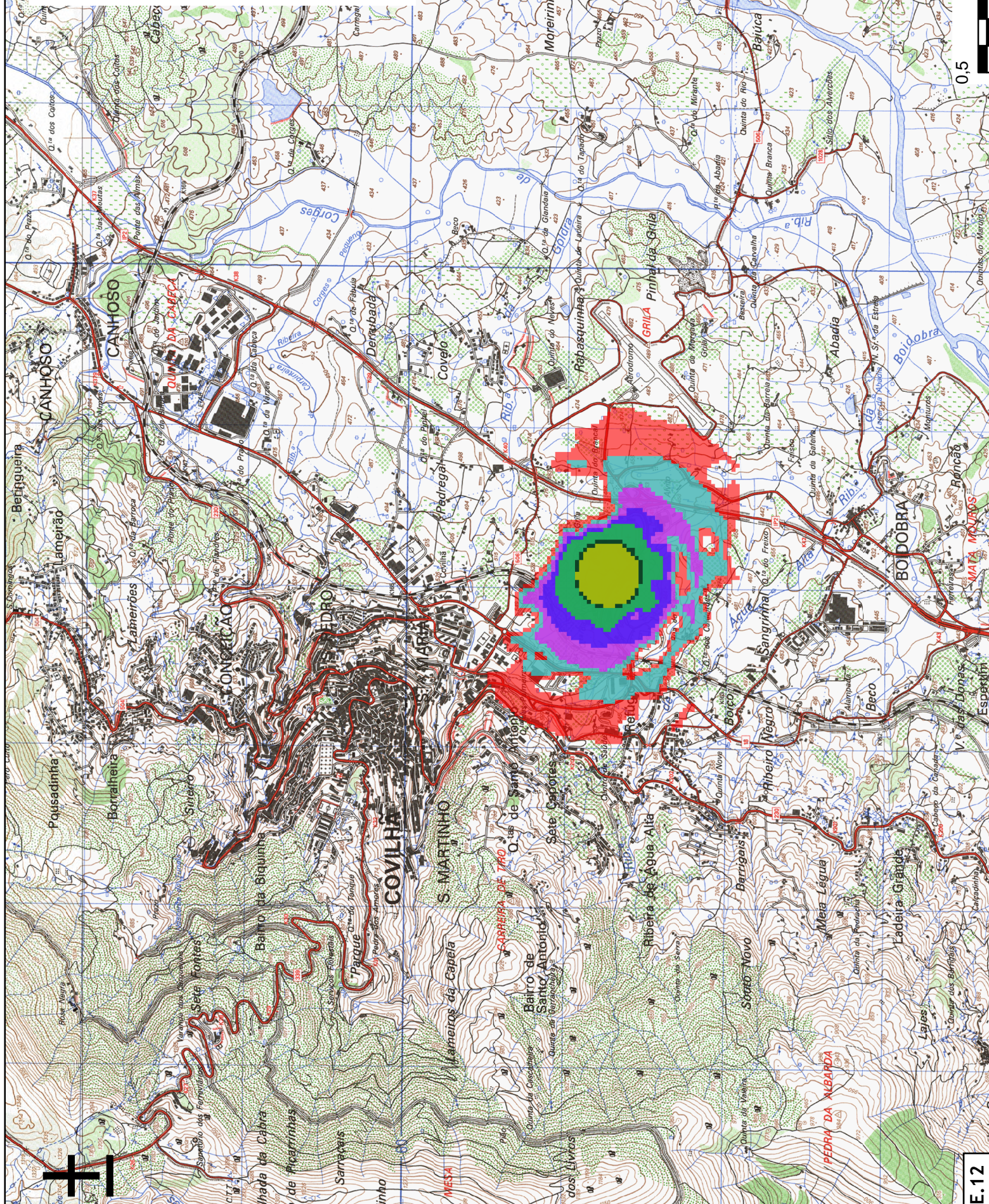
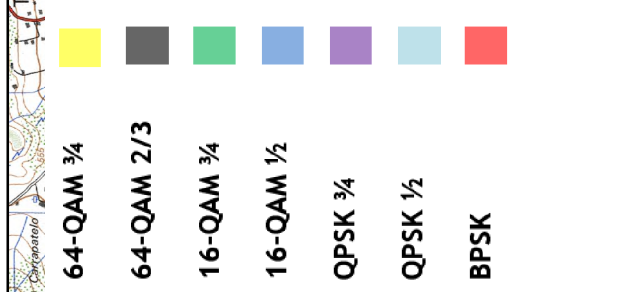


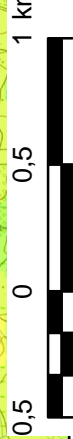
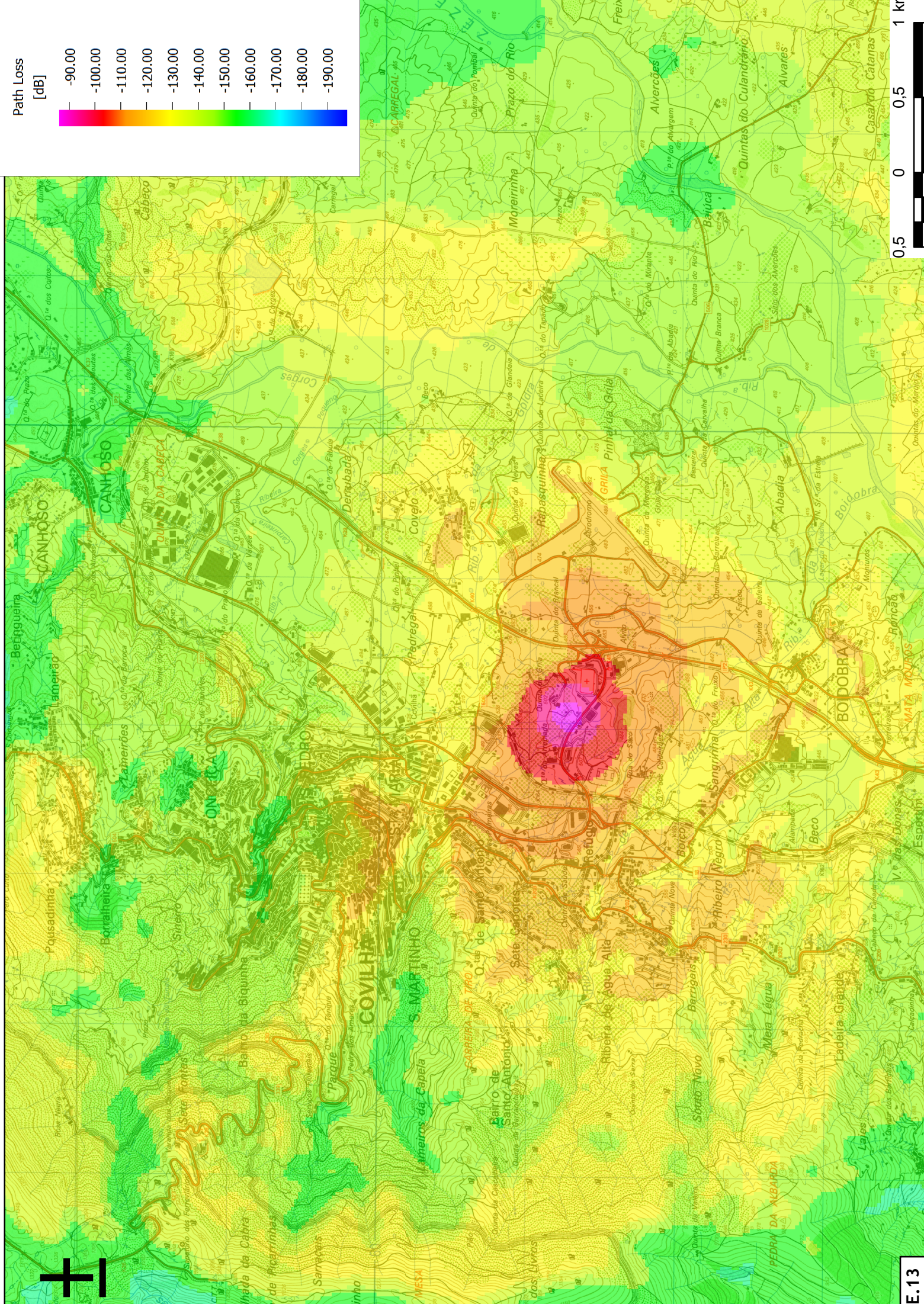
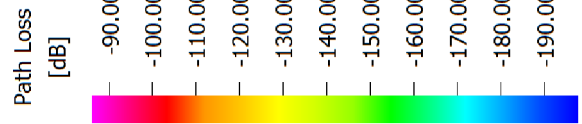
Max. Received [dBm]



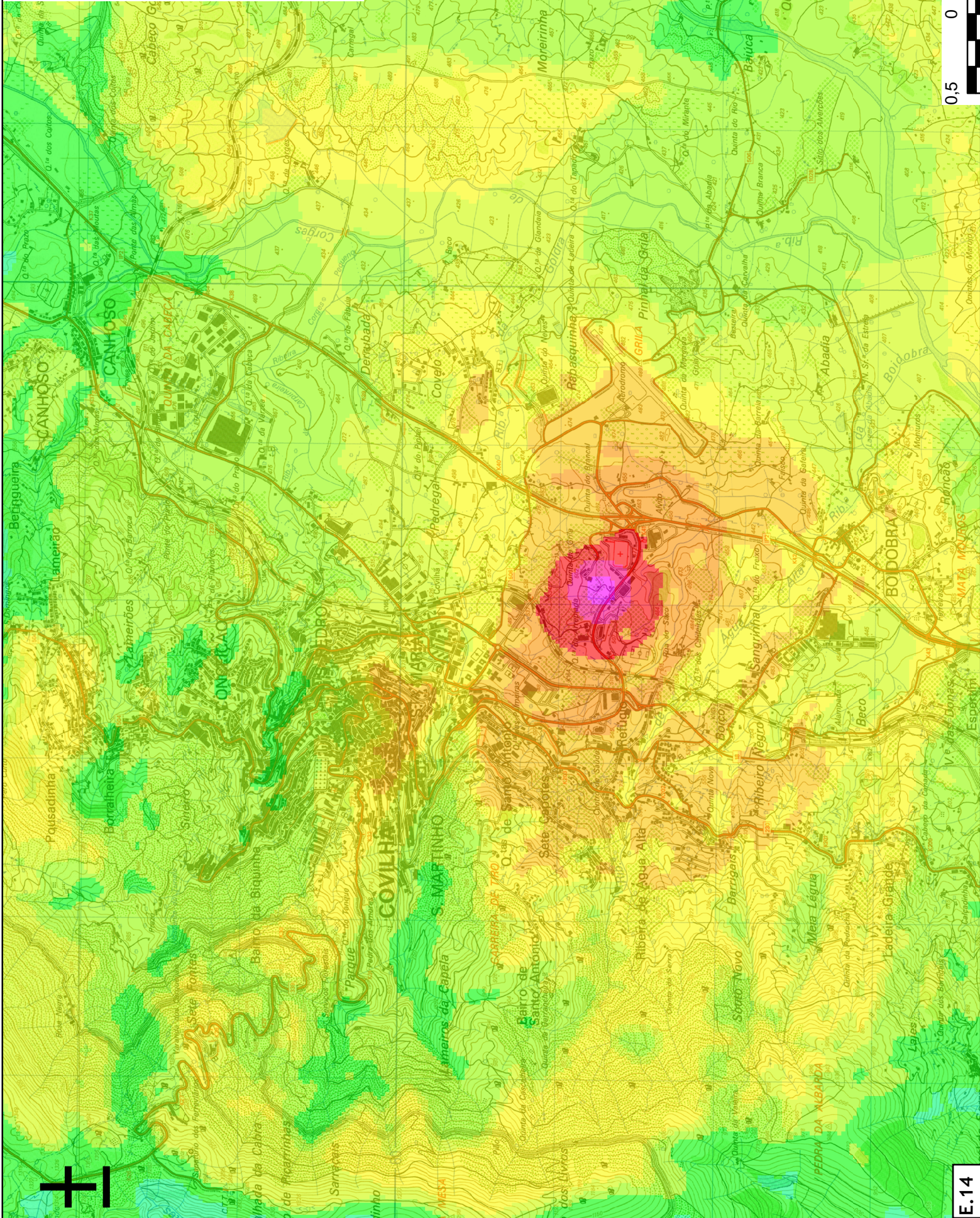
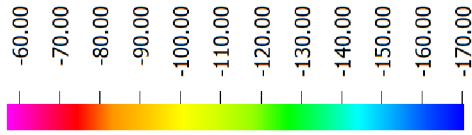
0 0,5 1 km

E:11





Power [dBm]



Anexo F

Scripts em MatLAB™

F.1 Script AnalyzeValues

Este script serviu para a recolha dos valores recolhidos pelo analisador, numa folha Excel.

```
% AnalyzerValues.m
%
close all
clear all
clc

Data=dir('C:\.....'); % Path
x=length(Data);          % Carrega Dados
v=0;

i=1;

for i=3:x

    a=Data(i).name;      % Selecciona ficheiro
    dado=importdata(a, ' ',38); % Importa 38 linhas do ficheiro
    valor=char(dado(38,1)); % Carrega dados
    inc=valor(1,7:12);   % Valor pretendido
    inc(1,4)='.';       % Troca , para .

    clk(i,1)=dado(3,1); % Vector Time
    v(i,1)=str2num(inc); % Vector RSSI
    i=i+1;

end

xlswrite('namefile.xls',v); % Escreve Excel
xlswrite('namefile.xls',clk);
```

F.2 Script Time

Depois de todos os dados (do GPS e analisador de espectro) serem gravados em folhas Excel, foi feito este *script* em MATLAB™, para cruzar o ficheiro de dados do GPS com os dados obtidos pelo analisador de espectro, de modo a obter uma correspondência temporal dos dados.

```
% SameTime.m
%
% Select equal times and record the RSSI value
% The values that doesn't match assumes zero
%
close all
clear all
clc

Analyzer=xlsread('nomeficheiro'); % Lê Excel tempo analisador
GPS=xlsread('nomeficheiro'); % Lê Excel tempo GPS
RSSI=xlsread('nomeficheiro'); % Lê valores RSSI
x=length(Analyzer);
xl=length(GPS);
i=1;
v=0;

for i=i:xl
    j=1;
    for j=j:x
        fprintf('i= %d \n',i) % Teste
        fprintf('j= %d \n',j) % Teste

        if GPS(i,1)==Analyzer(j,1)
            fprintf('The number of data points is %d \n',j)
            v(i,1)=RSSI(j,1);
            i=i+1;
        else v(i,1)=0
        end
    end
end
end

xlswrite('namefile.xls',v) % Escreve Excel
```

Referências

- [3GPP09] 3GPP TR 25.814 V7.1.0 (2006-09), "Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7)", 3rd Generation Partnership Project, Valbonne, França, 2007 (<http://www.3gpp.org/>).
- [Alva06] Alvarion®, "BreezeMAX datasheet", "WiMAX Forum™" and "WiMAX Forum CERTIFIED™", 2006.
- [Alva06b] Alvarion®, "BreezeMAX™ 3000 Micro - System Manual v2.5", "WiMAX Forum™" and "WiMAX Forum CERTIFIED™", Jun. 2006.
- [Ande03] Anderson, H. R., *Fixed Broadband Wireless System Design*, John Wiley&Sons Ltd., Inglaterra, 2003.
- [AnGM07] Andrews, J. G., Ghosh, A., Muhamed, R., *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, USA, 2007.
- [AWCSB05] Abhayawardhana, V. S., Wassell, I. J., Crosby, D., Sellars, M. P., Brown, M. G., "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems", IEEE Vehicular Technology Conference, Volume 1, pp.73-77, 2005.
- [Conn10] <http://www.conniq.com/WiMAX/aas.htm> (acedido em Junho 2010).
- [Cost09] Costa, Rui, *Rede Metropolitana sem Fios com Aplicação Hospitalar*, MSc Thesis, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2009.
- [COST98] COST-231, *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems: COST-231 Final Report*, European Commission COST Telecommunications, Bruxelas, Bélgica, 1998.
- [EICC03] Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT), *The analysis of the coexistence of FWA cells in 3.4-3.8 GHz band*, ECC Report - 33, Maio 2003. (<http://www.erdocdb.dk/default.aspx>)
- [EFIS10] <http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/difracao/huygens/> (acedido em Junho de 2010)
- [ESRI10] <http://www.esriportugal.pt/entrada.html> (acedido Agosto de 2010)

- [GeMü07] Geßner, C., Müller, M., "Comparing WiMAX and LTE - Technology&Test Approaches", in European Microwave Week 2007, Munique, Alemanha, Out. de 2007.
- [IEEE03] IEEE 802.16 Working Group, *Channels models for fixed wireless applications*, Document 802.16a-03/01. New York, USA, Jun. 2003.
- [IEEE09] IEEE Std 802.16-2009 (Revisão do IEEE Std 802.16-2004): *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, 2009.
(<http://ieeexplore.ieee.org/articleSale/Sarticle.jsp?reload=true&arnumber=5062485>)
- [IEEE10] IEEE 802.16 Working Group, IEEE 802.16p Machine to Machine (M2M) System Requirements Document (SRD) (initial working document revised), 2010.
- [ITU-07] ITU-International Telecommunication Union, *Attenuation in Vegetation, Recommendation ITU-R P.833-6*, ITU Radiocommunication Assembly, 2007.
- [GaSW09] Grayson, M., Shatzkamer, K., Wainner, S., "IP Design for Mobile Networks", Cisco Press, Indianapolis, USA, 2009.
- [MCVS05] Rui P. Marcos, Rui Costa, Fernando J. Velez, Pedro Sebastião, António Rodrigues, José Riscado, José Romão, Victor Cavaleiro, Vítor Carvalho, Dany Santos, "*Concepção e Planeamentos de Redes sem Fios IEEE 802.16*", Instituto de Telecomunicações, Lisboa, Portugal, 2005.
- [MiBo01] Mitchell, A., Booth, B., "Getting Started with ArcGIS", ESRI Press, Redlands, California, USA, 2001.
- [PrGr58] Price, R., Green, P.E., "A Communication Technique for Multipath Channels", Mar. 1958.
- [PrVe10] Prasad, R., Velez, F. J., *WiMAX Networks-Techno-Economic Vision and Challenges*, Springer, Dordrecht, Holanda, 2010. (ISBN: 978-90-481-8751-5).
- [Rapp02] Rappaport, Theodore S., *Wireless Communications: Principles and Practice 2nd Edition*, Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.

- [Roba08] Robalo, Daniel, *Planeamento, Desenvolvimento e Optimização de Redes WiMAX*, MSc Thesis, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2008.
- [RoSc08] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, "*Handheld Spectrum Analyzer - Quick Start*", Holanda, 2008.
- [Sale02] Salema, Carlos, *Feixes Hertzianos*, IST Press, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002.
- [Seyb05] Seybold, J. S., *Introduction to RF Propagation*, John Wiley and Sons Ltd., Canada, 2005.
- [VAHR09] Velez, F. J., Aghvami, H., Holland, O., Robalo, D., "Cost/Revenue Trade-off in the Optimization of Fixed WiMAX Deployment with Relays", submitted to IEEE transaction on Vehicular Technology, Jul. 2010.
- [Vare09] Varela, Frederico F., *Desenvolvimento de um Modelo de Propagação Unificado para o Planeamento de Redes Wi-Fi, UMTS e WiMAX*, MsC Thesis, Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa - Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.
- [VSCC10] Varela, F., Sebastião, P., Correia, A., Cercas, F., Velez, F. J., Robalo, D., Rodrigues, A., "Unified Propagation Model for Wi-Fi, UMTS and WiMAX Planning in Mixed Scenarios", in Proc. of PIMRC 2009 - 21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Istanbul, Turquia, Set. 2009.
- [WWWL05] Wahl R., Wölfle, G., Wertz, P., Wildbolz, P., Landstorfer, F., "Dominant Path Prediction Model for Urban Scenarios", 14th IST Mobile & Wireless Communications Summit, Dresden, Alemanha, Jun de 2005.
- [WiFo04] WiMAX Forum, "WiMAX's technology for LOS and NLOS environments", "WiMAX Forum™" and "WiMAX Forum CERTIFIED™", Main contributors: Eugene Crozier (System Architect, SR Telecom) e Allan Klein (VP System and Technology, SR Telecom) , Ago. 2004 (<http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf>)
- [WiFo05] Westech Communications Inc., "*Can Wimax Address Your Applications?*", "WiMAX Forum™" and "WiMAX Forum CERTIFIED™", Out. 2005
- [WiFo08] WiMAX Forum, *WiMAX System Evaluation Methodology - versão 2.1*, "WiMAX Forum™" and "WiMAX Forum CERTIFIED™", 2007.

[Wiki10] http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone (acedido em Junho de 2010)

[WiMo10] WiMo - Antennas and Acessories, "GP3500-xx - 3.5 GHz Omnidirectional antenna for WIMAX", Alemanha. (http://wimo-antenna.com/cgi-bin/verteiler.pl?url=wimax-antennas_e.html)

[Winp09] <http://www.awe-communications.com> (acedido em 2009)

[Wölf00] Wölfle, G., Hoppe, R., Binzer, T., Landstorfer, F. M., Radio Network Planning and Propagation Models for Urban and Indoor Wireless Communication Networks, Millenmium Conference on Antennas & Propagation, Davos, Suíça, 2000.

[Yagh03] Yaghoobi, Hassan, "802.16 Broadband Wireless Acess: the next big thing in wireless", IDF Fall 2003 Conferences, Intel Broadband Wireless Division, Wireless Networking Group, Intel, Set. 2003.