



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João Tiago dos Santos Martins

Utilização duma plataforma SIG na  
predição da qualidade de sinais rádio  
em ambientes rurais e florestais

Coimbra - Portugal

10 de Setembro de 2012





FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE  
COMPUTADORES

---

**Utilização duma plataforma SIG na predição da  
qualidade de sinais rádio em ambientes rurais e  
florestais**

---

**João Tiago dos Santos Martins**

Membro do Júri:

Presidente: Professora Doutora Teresa Martinez dos Santos Gomes

Orientador: Professor Doutor Luís Alberto da Silva Cruz

Orientadora: Professora Doutora Cidália Maria Parreira Costa Fonte

Vogal: Professor Doutor Mário Gonçalo M. V. Silveirinha

10 de Setembro de 2012



# Agradecimentos

Esta dissertação resulta do apoio e do esforço de várias pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a sua realização, e às quais gostaria de deixar os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Luis Cruz, porque nem sempre foi fácil lidar comigo e com a minha falta de tempo, agradeço pela paciência, frontalidade e orientação em todos os momentos da realização deste trabalho.

À Professora Doutora Cidália Fonte, agradeço a disponibilidade e dedicação que sempre demonstrou ao longo de todas as fases e momentos do estudo.

Aos colegas e amigos, que sempre me apoiaram, me incentivaram e me auxiliaram ao longo de todo o meu percurso académico e universitário, agradeço-lhes do fundo do coração por todos os momentos vividos e por todas as conquistas realizadas.

Aos meus pais, à minha irmã e à minha avó, porque nunca duvidaram de mim, sempre acreditaram nas minhas capacidades e a quem devo tudo o que sou, um simples obrigado ou agradecimento é pouco, por isso espero conseguir no futuro retribuir com os meus atos e com as minhas conquistas.

À minha esposa, sem ela não teria conseguido. Ela mudou a minha vida, com ela cresci e a ela devo muito daquilo em que me tornei nestes últimos 6 anos. Muito obrigado por me teres cativado...

A todos um muito Obrigado!

João Tiago dos Santos Martins



# Resumo

As redes de comunicação rádio têm vindo evoluir ao longo dos anos e tornaram-se nas mais utilizadas mundialmente.

Na presente dissertação desenvolveu-se uma ferramenta que permite efetuar o estudo da qualidade de sinais rádio recorrendo a sistemas de informação geográfica (SIG). Esta ferramenta permite a um utilizador efetuar o estudo das perdas de uma propagação entre um emissor e um recetor, calculando as perdas de trajeto e perdas devidas obstáculos, presentes em zonas rurais e pouco edificadas ou em zonas de vegetação, recorrendo a modelos de propagação adequados aos dados existentes.

**Palavras-Chave:** propagação, SIG, espaço livre, knife-edge, Okumura-Hata, Weissbergers



# **Abstract**

Radio communication networks have been evolving throughout the years, becoming the most used worldwide.

In this dissertation, a tool that performs the study of the quality of radio signals was developed using geographic information systems (GIS). This tool allows the user to perform a study on the losses of propagation between the base station and the mobile station. For that purpose, it calculates path losses and obstacles losses present in rural areas with scarce constructions or vegetation zones, using propagation models appropriate to the existing data.

**Keywords: propagation, GIS, free space, knife-edge, Okumura-Hata, Weissbergers**



*“O gênio começa as grandes obras, mas é o trabalho que as termina.”*

J. Joubert



# Índice

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Ferramentas Desenvolvidas.....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Acrónimos.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivo e Enquadramento .....	1
1.3. Conteúdo.....	2
<b>2. Contextualização Teórica.....</b>	<b>3</b>
2.1. Modelos de Propagação.....	3
2.1.1. Modelo de Propagação em Espaço Livre.....	9
2.1.2. Modelo de Propagação <i>Knife-Edge</i> .....	11
2.1.3. Modelo de Propagação de Okumura-Hata .....	15
2.1.4. Modelo de Propagação em Folhagem de Weissberger's .....	18
2.2. Sistemas de Informação Geográfica.....	19
2.2.1. Model Builder do ArcGis.....	21
2.2.2. Programação em Python .....	22
<b>3. Implementação Prática .....</b>	<b>25</b>
3.1. Dados disponibilizados.....	25
3.1.1. Dados para utilização em ArcGIS .....	25
3.1.2. Dados da antena utilizada.....	27
3.2. Planeamento.....	28
3.3. Primeira Fase de Implementação .....	29
3.4. Segunda Fase de Implementação .....	37

<b>4. Análise de Resultados.....</b>	<b>41</b>
4.1. Resultados da primeira fase de implementação .....	41
4.2. Resultados da segunda fase de implementação .....	46
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo A Cálculo do Raio do Elipsoide de Fresnel.....</b>	<b>53</b>
<b>Anexo B Processo de modelação dos obstáculos em lâminas .....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo C Estrutura do ficheiro de texto auxiliar.....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo D Informação adicional relativamente ao capítulo 3 .....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>67</b>

# Lista de Figuras

FIGURA 1: PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA AO LONGO DAS CAMADAS DA ATMOSFERA [15].	4
FIGURA 2: EXEMPLO DE UMA PROPAGAÇÃO COM REFLEXÃO [4].	6
FIGURA 3: EXEMPLO DE UM OBSTÁCULO MULTIPONTO [6].	11
FIGURA 4: PERDAS DE CAMINHO DE OKUMURA-HATA [8].	17
FIGURA 5: FATOR DE CORREÇÃO PARA O EMISSOR (A) E FATOR DE CORREÇÃO PARA O RECETOR (B) [8].	17
FIGURA 6: EXEMPLO DA DEFINIÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE EM NÍVEIS DE INFORMAÇÃO.	21
FIGURA 7: EXEMPLO DE UMA FERRAMENTA DESENVOLVIDA NO <i>MODEL BUILDER</i> DO ARCGIS.	22
FIGURA 8: EXEMPLO DO INTERFACE GRÁFICO DE UMA FERRAMENTA DESENVOLVIDA NO PROJETO.	23
FIGURA 9: FICHEIRO DISPONIBILIZADO <i>IMAGEMAREAFORESTAL.GIF</i> .	26
FIGURA 10: MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS).	26
FIGURA 11: DIFERENÇA ENTRE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS) E MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT).	26
FIGURA 12: EXEMPLO DE UM MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE E UM MODELO DIGITAL DE TERRENO (DTM).	27
FIGURA 13: ESTRUTURA DO FICHEIRO DE TEXTO COM INFORMAÇÃO DA ANTENA E O DIAGRAMA DE RADIAÇÃO, DA COMPONENTE VERTICAL.	28
FIGURA 14: <i>RASTERS</i> COM VALORES COINCIDENTES.	34
FIGURA 15: EXEMPLO DE <i>CONVEX HULL</i> .	35
FIGURA 16: HISTOGRAMAS DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO.	41
FIGURA 17: <i>SCATTERPLOTS</i> DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO.	42
FIGURA 18: CLASSIFICAÇÃO RESULTANTE DA FERRAMENTA 1.	42
FIGURA 19: IMAGEM ORIGINAL (A); IMAGEM CLASSIFICADA COM ERROS DE CLASSIFICAÇÃO (B).	43
FIGURA 20: RESULTADO DA RECLASSIFICAÇÃO EFETUADA PELA FERRAMENTA 2.	43
FIGURA 21: EXEMPLO DA ORGANIZAÇÃO DAS TABELAS RESULTANTES DO PROCESSAMENTO DA PRIMEIRA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO.	44
FIGURA 22: EXEMPLO DE UM CENÁRIO 1X1 IMPLEMENTADO NESTE TRABALHO.	45
FIGURA 23: EXEMPLO DE UM CENÁRIO 1XN IMPLEMENTADO NESTE TRABALHO.	45
FIGURA 24: EXEMPLO DE UM CENÁRIO 1XN, ONDE N É UMA ÁREA, IMPLEMENTADO NESTE TRABALHO.	45
FIGURA 25: EXEMPLO DE UM CENÁRIO MX1 IMPLEMENTADO NESTE TRABALHO.	45

FIGURA 26: GRÁFICO DO PERFIL EM ESTUDO E DO MENOR CONJUNTO CONVEXO EXISTENTE (A); GRÁFICO DO PERFIL E DO TRAJETO COM PONTOS OBSTRUTORES RETIRADO DO MENOR CONJUNTO CONVEXO (B). .....	46
FIGURA 27: EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DAS PERDAS DE UMA CONFIGURAÇÃO 1xN NO ARCGIS. .....	47
FIGURA 28: TRAJETOS DAS PROPAGAÇÕES DEMONSTRADAS NA FIGURA 27. ....	48
FIGURA 29: EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DAS PERDAS DE UMA CONFIGURAÇÃO Mx1 NO ARCGIS. .....	50
FIGURA 30: EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DAS PERDAS DE UMA CONFIGURAÇÃO 1xAREA NO ARCGIS. ....	50
FIGURA 31: EXEMPLO DE UM TRAJETO DIVIDIDO EM LÂMINAS [6]. ....	55
FIGURA 32: REPRESENTAÇÕES GEOMÉTRICAS DE DIFRAÇÕES [6]. ....	57
FIGURA 33: EXEMPLOS DOS DADOS EXTRAÍDOS COM O AUXÍLIO DA FERRAMENTA 4. ....	63
FIGURA 34: EXEMPLO DA CONVERSÃO DAS LINHAS EM PONTOS COM O AUXÍLIO DA FERRAMENTA 5. .....	63
FIGURA 35: EXEMPLOS DOS DADOS EXTRAÍDOS COM O AUXÍLIO DA FERRAMENTA 5 E ORDENADOS PELA FERRAMENTA 6. ....	64
FIGURA 36: EXEMPLO DOS DADOS OBTIDOS COM A FERRAMENTA 8. ....	64

# Lista de Tabelas

TABELA 1: BANDAS DE FREQUÊNCIAS E CARACTERÍSTICAS [15].....	4
TABELA 2: GAMA DE VALORES PARA OS QUAIS O MODELO DE OKUMURA-HATA É VÁLIDO [8].....	18
TABELA 3: SCRIPTS IMPLEMENTADOS NA SEGUNDA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA. ....	37
TABELA 4: CLASSES DE CARACTERÍSTICAS OBTIDAS NO FINAL DA PRIMEIRA FASE DE IMPLEMENTAÇÃO. ....	44
TABELA 5: DADOS REFERENTES AOS TRAJETOS DA FIGURA 28. ....	49
TABELA 6: CONSTITUIÇÃO DO FICHEIRO DE TEXTO AUXILIAR AO PROGRAMA.....	61



# Lista de Ferramentas Desenvolvidas

FERRAMENTA 1: TERRAIN CLASSIFICATION TOOL ( <i>MODEL BUILDER</i> ) .....	30
FERRAMENTA 2: CLASSIFICATION OPTIMIZATION TOOL ( <i>PYTHON</i> ) .....	31
FERRAMENTA 3: CREATE TOOLS ( <i>PYTHON</i> ).....	32
FERRAMENTA 4: ADD TOOLS DATA ( <i>PYTHON</i> ) .....	33
FERRAMENTA 5: LINE TO POINT ( <i>PYTHON</i> ) .....	34
FERRAMENTA 6: ORGANIZE RASTER ( <i>PYTHON</i> ).....	35
FERRAMENTA 7: ADD COMMON FIELD ( <i>PYTHON</i> ) .....	36
FERRAMENTA 8: CONVEX HULL ( <i>PYTHON</i> ) .....	36
FERRAMENTA 9: MAIN.PY.....	38
FERRAMENTA 10: HELPERS.PY.....	39
FERRAMENTA 11: FREESPACE.PY .....	39
FERRAMENTA 12: OKUMURAHATA.PY .....	39
FERRAMENTA 13: WEISSBERGERS.PY .....	40
FERRAMENTA 14: KNIFEEDGE.PY .....	40



# Lista de Abreviaturas e Acrónimos

SIG	Sistema de Informação Geográfica
UHF	Ultra High Frequency
$P_t$	Potência transmitida
$G_t$	Ganho do transmissor
$G_r$	Ganho do recetor
$\lambda$	Comprimento de onda
L	Fator de perdas do sistema
$A_e$	Área efetiva da antena
$f / f_c$	Frequência da portadora
$\omega_c$	Frequência da portadora em radianos
c	Velocidade da luz
D	Dimensão física da abertura da antena emissora
PL	Perda de trajeto ou <i>Path Loss</i>
$P_r$	Potência recebida
DBMs	Sistemas de gestão de base de dados ou <i>Database Management Systems</i>
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno



# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

Atualmente o crescimento do número de utilizadores de redes de comunicações móveis e a crescente necessidade de melhorar os serviços de dados nos dispositivos móveis, levou as operadoras a optarem pela quarta geração de comunicações móveis. Apesar desta evolução as redes rádio continuam a ser mundialmente utilizadas devido às suas características e por serem redes com custos de implementação mais baixos, o que leva algumas empresas e associações a optarem por criar redes deste tipo para as comunicações internas. Corpos de bombeiros, polícia e empresas de transportes utilizam diariamente estas redes para comunicação, sinalização e localização dos seus operacionais e veículos. A continuação da implementação e utilização deste tipo de redes associada à crise mundial despertam nestas entidades a necessidade de rentabilizar recursos, otimizando assim os custos destas implementações. Esta mudança de comportamento leva à necessidade de procurar formas de melhorar o planeamento das redes[1].

Esta necessidade motivou o desenvolvimento deste estudo, procurando-se associar este a um sistema que tivesse aplicabilidade e utilidade para as diversas empresas e entidades. Assim, associou-se o estudo da otimização de comunicações rádio a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que, como se verá no capítulo 2, são importantes bases de dados que permitem aos seus utilizadores manipular uma grande variedade de recursos geográficos.

## 1.2. Objetivo e Enquadramento

O objetivo deste estudo é a criação de uma ferramenta com o auxílio de SIG, que permita ao utilizador final conseguir efetuar um estudo do nível de sinais rádio em ambientes rurais e florestais.

Esta dissertação surge na sequência de um projeto desenvolvido na disciplina de Comunicações Móveis, que tinha como principal objetivo efetuar o estudo de uma propagação entre emissor e recetor com o auxílio do *software* WinProp. Como o *software* utilizado permitia modelar uma propagação com base em informação cartográfica, propôs-se desenvolver uma parceria com docentes do Departamento de Matemática da Universidade de Coimbra da área de Engenharia Geográfica, para desenvolver uma ferramenta semelhante para os SIG, mais propriamente para o *software* de manipulação de sistemas SIG, ArcGIS.

Como veremos estes sistemas permitem manipular informação geográfica, de uma forma bastante abrangente e versátil, podendo por isso, ser poderosas ferramentas para empresas que operam no domínio das comunicações rádio [2] [3].

Para facilitar o desenvolvimento do trabalho dividiu-se o objetivo principal em duas tarefas, que operando em conjunto permitem atingi-lo. Na primeira pretende-se efetuar toda a manipulação de dados SIG, de forma a se conseguir extrair os dados necessários para a segunda tarefa, que passa por aplicar os dados a modelos de propagação, efetuando assim o estudo do nível de sinal recebido.

Na presente dissertação aplicaram-se métodos de modelação de perdas por propagação de sinais rádio conjuntamente com sistemas de gestão de informação geográfica, para construir um sistema que permite, por exemplo, calcular as perdas de uma propagação entre um emissor e um recetor. Veremos no capítulo 2 que existem diversos modelos de propagação, tornando necessário escolher os modelos adequados aos dados existentes e ao problema proposto. Após análise dos vários métodos de modelação de perdas por propagação de sinais rádio, foram escolhidos os seguintes:

- **Modelo de espaço livre**, que permite estudar o nível de sinal para uma propagação sem obstruções [4] [5];
- **Modelo de propagação por *knife-edge***, que permite estudar o nível de sinal para uma propagação com difrações [6];
- **Modelo de propagação de Okumura-Hata**, que permite estudar o nível de sinal para uma propagação em zonas habitacionais [5] [7] [8];
- **Modelo de propagação de Weissberger's**, que permite estudar o nível de sinal para uma propagação em zona com forte densidade de vegetação [9] [10].

### 1.3. Conteúdo

No capítulo 2 é apresentada a descrição dos conceitos básicos, bem como dos modelos implementados e é abordada a utilização dos SIG e a sua aplicação ao trabalho desenvolvido.

No capítulo 3 são descritos os procedimentos da implementação prática deste estudo.

No capítulo 4 é feita uma análise dos resultados obtidos neste estudo.

Por último, no capítulo 5, são apresentadas algumas conclusões do trabalho.

## 2. Contextualização Teórica

### 2.1. Modelos de Propagação

A seguinte contextualização baseia-se em [4], [8], [11], [12], [13], [14], [15] e [16].

Com o crescimento do número de utilizadores das redes de comunicações rádio, tornou-se evidente que era necessário otimizar as mesmas, de forma a conseguir dar uma resposta ao aumento da procura, baixando os custos de possíveis ajustes. Cedo se percebeu que seria necessário apostar no estudo da propagação do sinal de forma a melhorar a colocação, orientação e tipo da antena emissora; redimensionar o espetro de frequências, que se observava cada vez mais congestionado, desenvolvendo uma utilização mais eficiente dessas mesmas frequências; entre outras características da rede. Como resultado desses estudos surgiu uma grande diversidade de modelos de propagação para sinais rádio que se referem a diversos ambientes de propagação, características do meio e épocas do ano.

O nível de sofisticação do modelo encontra-se associado à longevidade da tecnologia a que este se aplica. Se a longevidade da tecnologia for elevada, isso leva a um maior estudo de otimização e a um conseqüente aumento da complexidade do modelo e sua sofisticação.

Contrariamente às propagações efetuadas através de fios que são estacionárias e minimamente previsíveis, as propagações de sinais rádio são afetadas por fatores que variam de forma difícil de prever. Esta aleatoriedade faz com que as propagações rádio sejam de difícil análise, tornando o estudo destas bastante complexo. Por isso, antes de detalhar os modelos, ir-se-á compreender o tipo de obstáculos que uma onda rádio pode encontrar enquanto se propaga entre dois pontos. A propagação entre dois pontos é feita através das diversas camadas da atmosfera ou até mesmo além desta [15], podemos então ter propagação:

- **Na troposfera** (primeira camada da atmosfera, é nesta que encontramos 99% dos vapores de água e aerossóis da atmosfera e que varia entre 7km de altitude nos polos e 20km nos trópicos), esta consiste na propagação da onda terrestre (*ground wave*) e da onda espaço (*space wave*).
- **Na ionosfera** (camada que engloba a termosfera e uma parte da exosfera, esta localiza-se entre os 80 e os 720km de altitude e é fortemente ionizada pela radiação solar, o que a torna uma camada refletora, refratora e condutora), que consiste na refração da onda do céu (*sky wave*) nesta camada.
- **Espacial**, que consiste na propagação para lá da atmosfera.

A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo de como são feitas as propagações descritas anteriormente.

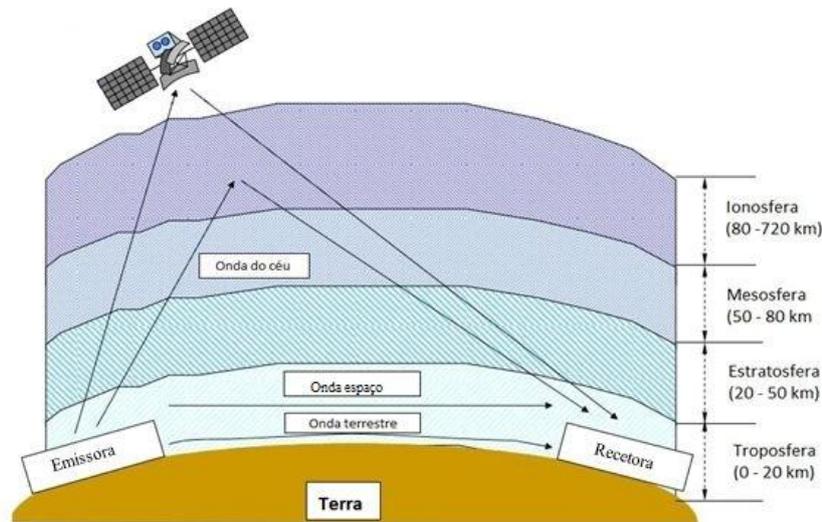


Figura 1: Propagação de uma onda ao longo das camadas da atmosfera [15].

Partindo da descrição anterior podemos generalizar em três tipos de propagação de ondas [15]:

- **Onda terrestre:** que é a onda que se propaga junto à superfície terrestre. A esta encontram-se normalmente associadas as baixas bandas de frequências.
- **Onda do céu:** que é a onda que resulta da refração na ionosfera e que regressa de novo à superfície terrestre.
- **Onda espaço:** que é uma onda que se propaga junto à superfície terrestre. A esta encontram-se normalmente associadas as altas bandas de frequência.

Estas ondas encontram-se classificadas de acordo com as suas bandas de frequência, sendo subdivididas com base nessas. Um exemplo dessa classificação é a Tabela 1.

Tabela 1: Bandas de Frequências e características [15].

Banda de Classificação	Sigla	Banda de Frequências	Características
Extremely Low Frequency	ELF	<300 Hz	Onda Terrestre
Infra Low Frequency	ILF	300 Hz – 3 kHz	
Very Low Frequency	VLF	3 kHz – 30 kHz	
Low Frequency	LF	30 kHz – 300 kHz	
Medium Frequency	MF	300 kHz – 3 MHz	Onda Terrestre / Onda do Céu
High Frequency	HF	3 MHz – 30 MHz	Onda do Céu
Very High Frequency	VHF	30 MHz – 300 MHz	Onda Espaço
Ultra High Frequency	UHF	300 MHz – 3 GHz	
Super High Frequency	SHF	3 GHz – 30 GHz	
Extremely High Frequency	EHF	30 GHz – 300 GHz	
Tremendously High Frequency	THF	300 GHz – 3000 GHz	

Com a realização desta dissertação pretende-se implementar modelos de cálculo de perdas por propagação dentro da banda de frequências UHF. Como se pode verificar através da consulta da tabela anterior, esta banda refere-se a uma onda espaço, que é uma onda que se propaga dentro dos limites da troposfera. Logo, pretende-se observar as perdas de uma propagação dentro da troposfera e nesse ambiente o tipo de obstáculos encontrados, sendo também estudados os modelos de propagação a estes associados.

Na troposfera a propagação entre um emissor e um recetor pode variar desde uma transmissão em linha de vista, sem qualquer tipo de obstáculos à sua propagação e uma transmissão extremamente obstruída por edifícios, montanhas e zonas de folhagem diversa.

Como descrito anteriormente, existe a possibilidade de não se encontrar qualquer tipo de obstáculo no caminho entre emissor e recetor, mas este facto não significa que não existam perdas associadas a esse caminho, por isso, numa implementação prática, para além de se verificar a existência de obstáculos é calculada a perda associada a esse caminho através do **modelo de espaço livre** que se descreve mais à frente neste capítulo.

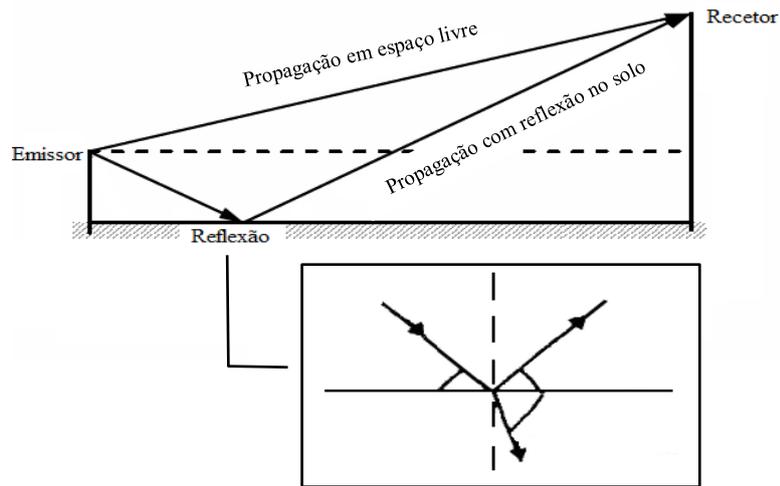
As restantes perdas que resultam dos vários tipos de obstáculos encontrados, estão associadas a diversos mecanismos que se inserem na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas, mas que se pode generalizar em três fenómenos: reflexão, difração e *scattering*.

De seguida vamos explicar resumidamente estes três mecanismos que dão origem à maioria dos modelos para perdas devidas a obstáculos.

#### Reflexão [4]:

Uma reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre um determinado objeto com propriedades elétricas diferentes ou com dimensões muito superiores comparativamente com o comprimento de onda desta. Como resultado desta incidência parte da energia desta onda é refletida pelo obstáculo de regresso ao ponto inicial e outra parte segue o seu caminho até encontrar o ponto de destino.

Na Figura 2 podemos ver um caminho em espaço livre entre emissor e recetor e um segundo caminho com reflexão no solo.



**Figura 2: Exemplo de uma propagação com reflexão [4].**

Ao analisarmos melhor a imagem no ponto de incidência no solo reparamos que, associada à reflexão existem perdas por absorção no obstáculo e facilmente se entende que a onda refletida comparativamente com a que se propagou em espaço livre sofre um atraso na propagação.

Depois desta breve explicação facilmente compreendemos a razão de este ser um dos fenómenos mais associados ao estudo das perdas de propagação, pois as ondas não se propagam apenas em linha reta entre emissor e recetor, podendo este fenómeno facilmente ocorrer no contacto desta com a superfície terrestre, edifícios, entre outros.

#### Difração [4]:

A difração ocorre quando o caminho entre emissor e recetor se encontra obstruído por uma superfície com irregularidades pontiagudas ou quando existe uma obstrução parcial deste. Neste caso as ondas secundárias resultantes do contacto com o obstáculo propagam-se através do espaço, dando origem a uma flexão das ondas em redor do obstáculo, permitindo que a onde se propague para além deste.

Este fenómeno é explicado através do princípio de Huygens [17] [18] que nos indica que todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais para a produção de ondas secundárias na direção da propagação. A difração é então causada pela propagação destas ondas que se combinam e dão origem a uma nova frente de onda.

Quando encontramos um grande obstáculo surge sempre associado a este uma zona chamada de sombra. Esta zona encontra-se relacionada com a existência de um impedimento visual entre o ponto de difração e os restantes pontos do trajeto. Quanto mais próximo desta zona se encontrar

o recetor muito menor será a potência do sinal recebido, mas a difração permite-nos contornar esta limitação e obter um sinal capaz de ser utilizado pelo aparelho recetor nestes pontos.

Este mecanismo será descrito mais aprofundadamente neste capítulo quando for explicado o **modelo de knife-edge** que é um modelo que nos permite calcular as perdas por difração e que foi utilizado na implementação prática deste trabalho.

#### Scattering [4]:

A onda que normalmente chega ao recetor é muitas vezes mais forte do que a que é prevista pelos modelos de reflexão e de difração. Isto deve-se ao facto de quando uma onda eletromagnética incide sobre uma determinada superfície a sua energia se espalhar em todas as direções originando um fenómeno de *scattering*.

Este ocorre quando uma onda eletromagnética incide num obstáculo com diversas irregularidades, estando obstáculos rugosos ou muito pequenos fortemente associados a este fenómeno. A componente resultante deste mecanismo normalmente é associada às calculadas através dos mecanismos descritos anteriormente, melhorando assim o cálculo das perdas de trajeto.

Na realidade este fenómeno pode encontrar-se em objetos como folhagem, sinais de trânsito, candeeiros, entre outros.

---

Depois de conhecermos os fenómenos que podemos encontrar ao longo de um determinado trajeto vamos começar por perceber melhor os tipos de modelos existentes para a propagação num meio com obstáculos. Podemos desde já dividir os modelos de propagação em três grandes categorias:

- **Empíricos**, que são modelos baseados em medidas e que conduzem a relações simples entre a atenuação e a distância que a onda eletromagnética percorre.
- **Teóricos**, que requerem vários dados topográficos e a utilização dos mesmos métodos que as ligações fixas.
- **Híbridos**, que são modelos que contemplam as perspetivas empírica e teórica.

Os modelos empíricos conduzem a resultados próximos da realidade, pois contabilizam grande parte dos fatores que afetam a propagação, sendo essa também a sua maior limitação por exigir, a quem os aplica, uma grande quantidade de valores que necessitam de ser sujeitos a validação no terreno.

Os modelos teóricos, por sua vez, como não abrangem todos os fatores que afetam a propagação, como, por exemplo, o estado do clima ou o local onde se efetua a propagação, tendem a permitir uma maior flexibilidade no tratamento dos dados e no manuseamento dos parâmetros envolvidos. Estes modelos teóricos dependem da existência de bases de dados geográficas.

Devido a serem modelos que contêm características empíricas e teóricas, os modelos híbridos tornam-se flexíveis e passíveis de ser aferidos com medidas reais efetuadas nos ambientes de propagação onde vão ser utilizados, minimizando desta forma o erro entre a estimação do sinal previsto pelo modelo de propagação e a posterior realidade.

Apesar de todas as características descritas anteriormente não existe um modelo de aplicação genérico em todos os tipos de ambientes, frequências e parâmetros, o que resulta numa grande diversidade de modelos.

Na presente dissertação vamos trabalhar com modelos empíricos, podendo-se definir três grandes categorias:

- Rural
- Suburbana
- Urbana

A categoria escolhida para esta dissertação é a rural, que será estudada através da utilização do **modelo de Okumura-Hata** que será descrito neste capítulo.

Existem ainda vários tipos de classificações, que geralmente se encontram associados a modelos de propagação distintos. Estas consideram, entre outros, os seguintes parâmetros:

- Densidade de vegetação
- Densidade e altura dos edifícios
- Existência de superfícies aquáticas
- Existência de áreas abertas
- Ondulação do terreno

Nesta dissertação analisamos a presença de vegetação florestal através do **modelo de Weissberger's** que será descrito neste capítulo.

Com base nestas características escolheram-se modelos adequados às condições existentes para a implementação do estudo, existindo já alguns modelos mais atualizados, mas que necessitam de informação que requer medições no terreno, algo que requer equipamento de que não dispomos, ou o grau de complexidade do modelo é demasiado exigente para o tempo disponibilizado para o estudo. Tendo em conta estas limitações são implementados neste estudo os modelos descritos de seguida.

### 2.1.1. Modelo de Propagação em Espaço Livre

A seguinte contextualização baseia-se em [4] [5].

Como foi dito anteriormente este modelo destina-se a prever a potência de sinal recebido e as consequentes perdas associadas a um trajeto sem obstáculos em que o emissor e o recetor se encontram em linha de vista.

Este é um modelo que nos permite efetuar o cálculo das perdas em grande escala e como todos os modelos deste género, prevê que a potência recebida decresce em função da distância entre emissor e recetor. Esta é nos dada através da equação de espaço livre de Friis que podemos ver de seguida.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

Verifica-se que a potência recebida resulta da relação entre a potência transmitida  $P_t$  (dBm), o ganho do transmissor  $G_t$  (dBi), o ganho do recetor  $G_r$  (dBi), da distância entre emissor e recetor  $d$ (km), do comprimento de onda  $\lambda$  e do fator de perdas do sistema  $L$  que é habitualmente devido a perdas de filtragem na antena.

O ganho de uma antena é um aumento da radiação no ponto máximo acima de um determinado valor padrão. O ganho pode ser definido pela relação entre a área efetiva da antena  $A_e$  e o quadrado da largura de banda da portadora  $\lambda$ , através equação (2):

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2)$$

Sendo que a abertura efetiva da antena se encontra relacionada com o tamanho físico da antena e a largura de banda  $\lambda$  com a frequência da portadora através de:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (3)$$

Onde  $f$  é a frequência de portadora em Hertz (Hz),  $\omega_c$  é a frequência da portadora em radianos por segundo (rad/s) e  $c$  é a velocidade da luz em metros por segundo (m/s).

Analisando a equação de espaço livre de Friis (1) verifica-se que a potência recebida decresce de acordo com o quadrado da distância  $d$ , implicando um decréscimo a uma taxa de 20 decibéis por década (dB/dec).

A equação de Friis (1) não é passível de ser aplicada para  $d=0m$ , sendo uma boa preditora para valores de  $d$  que se encontrarem na região distante ou de Fraunhofer ( $d_f$ ), que se relaciona com a maior dimensão física da abertura da antena emissora  $D$  e a largura de banda da portadora  $\lambda$  através de:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4)$$

O grande objetivo deste trabalho é o cálculo da perda de trajeto ou *path loss* ( $PL$ ). Esta representa a atenuação do sinal como uma quantidade positiva medida em decibéis (dB) entre a potência efetiva transmitida  $P_t$  e a potência recebida  $P_r$ , e pode ou não incluir o efeito dos ganhos das antenas.

A perda de trajeto para o modelo de propagação em espaço livre, com ganhos de antenas, é dada através das seguintes equações:

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log_{10} \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (5)$$

$$PL(dB) = -10 \log_{10}(G_t) - 10 \log_{10}(G_r) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) - 147.56 \quad (6)$$

Quando excluimos os ganhos das antenas, assumindo que estas têm um ganho unitário, obtemos:

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log_{10} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (7)$$

Apesar de simples, este modelo continua a ser o mais utilizado para propagação em espaço livre.

### 2.1.2. Modelo de Propagação *Knife-Edge*

A seguinte contextualização baseia-se em [6].

Como já foi referido anteriormente o modelo de propagação por *knife-edge* é um modelo que caracteriza as perdas resultantes das difrações ao longo do caminho, supondo que os obstáculos podem ser modelados como barreiras com pequenas espessuras.

Para a implementação deste modelo recorreu-se à recomendação ITU-R P.526-12 da união internacional de telecomunicações (ITU – *International Telecommunication Union*) de fevereiro de 2012.

Em primeiro lugar para o estudo da difração é necessário encontrar a zona onde esta ocorre, sendo para isso calculado o raio do Elipsoide de Fresnel que se encontra descrito no Anexo A, pois através deste é possível encontrar pontos de obstrução ou de difração. Depois de conhecidos os pontos de difração, logo se verifica que na realidade raros serão os casos em que não encontramos qualquer tipo de obstáculo ou até mesmo um único obstáculo à propagação entre emissor e recetor. O modelo de *knife-edge* tem várias formas de lidar com este tipo de problemas, mas para a implementação neste estudo escolheu-se um método que contempla casos em que temos um ou vários obstáculos em terrenos irregulares.

A Figura 3 dá-nos um exemplo do tipo de obstáculo que podemos encontrar e modelar com auxílio deste método:

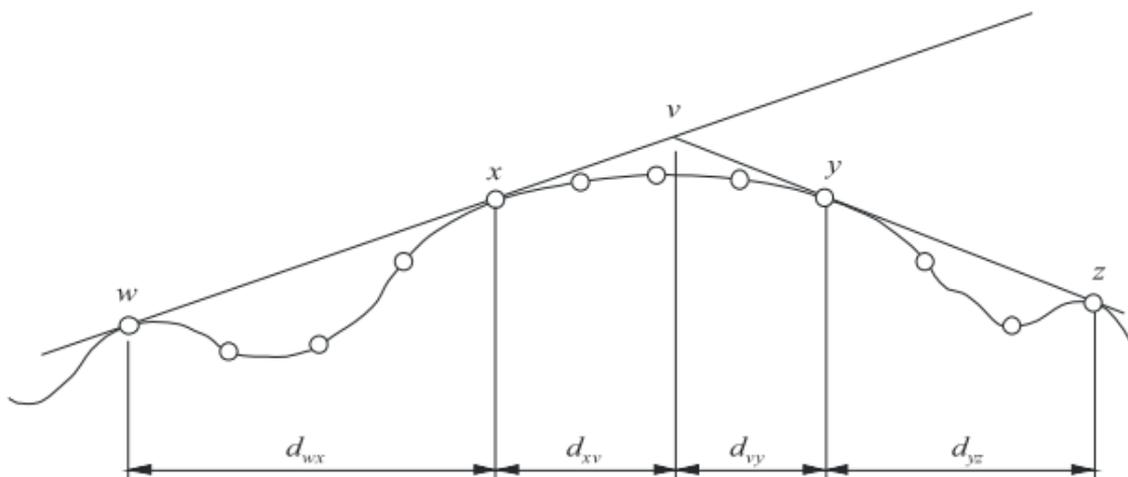


Figura 3: Exemplo de um obstáculo multiponto [6].

A Figura 3 mostra o exemplo de um obstáculo multiponto, onde,

*w*: ponto da sequência de pontos que não faz parte da obstrução e que se encontra mais próximo da parte obstruída do lado do emissor;

*x*: ponto da sequência de pontos que faz parte da obstrução, que se encontra mais próximo do emissor;

*v*: ponto resultante da interseção dos raios incidentes acima da obstrução é considerado como o vértice da obstrução;

*y*: ponto da sequência de pontos que faz parte da obstrução, que se encontra mais próximo do recetor;

*z*: ponto da sequência de pontos que não faz parte da obstrução e que se encontra mais próximo da parte obstruída do lado do recetor.

O método mencionado anteriormente começa por identificar os pontos onde ocorre o fenómeno de difração e verifica se existem entre eles pontos consecutivos no perfil a menos de 250 metros uns dos outros, caso se encontrem pontos nesta circunstância que não sejam o emissor ou o recetor, devem ser tratados com uma única obstrução.

De seguida os obstáculos são representados como uma lâmina semi-infinita de topo semicircular de raio igual ao raio de curvatura no topo do obstáculo, sendo este método por isso recomendado para casos em que se tenha informação vertical do perfil do trajeto. O procedimento de obtenção destas lâminas encontra-se descrito no Anexo B.

Depois de se definirem as lâminas apropriadas aos obstáculos encontrados ao longo do perfil do terreno e modelado o perfil ao longo do caminho, podemos definir a perda total por difração em dB relativamente à perda de uma propagação em espaço livre através de:

$$L_d = \sum_{i=1}^N L'_i + L''(wx)_1 + \sum_{i=1}^N L''(yz)_i - 20 \log_{10} C_N \quad (8)$$

Onde:

$L'_i$ : é a perda de difração na lâmina *i*;

$L''(wx)_1$ : perdas da difração de subcaminho, na secção do caminho entre *w* e *x* para a primeira lâmina;

$L''(yz)_i$ : perdas da difração de subcaminho, na secção do caminho entre *y* e *z* para todas as lâminas;

$C_N$ : fator de correção para as perdas por difusão ao longo das difrações nas sucessivas lâminas.

Perda de difração na lâmina i,  $L'_i$ :

A perda de difração na lâmina i,  $L'_i$ , é calculada através da seguinte expressão:

$$L'_i = J(v) + T(m, n) \quad (dB) \quad (9)$$

Onde  $J(v)$  corresponde à perda de Fresnel-Kirchoff devida a uma obstrução de *knife-edge* com o seu pico colocado no ponto que define o vértice.  $J(v)$  pode ser definido através de:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log_{10} \left( \sqrt[2]{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad (dB) \quad (10)$$

O parâmetro  $v$  é o valor adimensional de *knife-edge* que é dado, em unidades práticas, através de:

$$v = 0.0316h \times \sqrt[2]{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (11)$$

Onde  $h$ , que é a altura do topo do obstáculo acima das expansões das linhas retas que definem as duas pontas do caminho (calculada no Anexo B), e  $\lambda$  são em metros e  $d_1$  e  $d_2$  são em quilómetros, encontrando-se estes dados representados na Figura 32.

A atenuação adicional devida à curvatura do obstáculo  $T(m, n)$ , que aparece na expressão de  $L'_i$  é dada através de:

$$T(m, n) = \begin{cases} 7.2m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 & , mn \leq 4 \\ -6 - 20 \log_{10}(mn) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 & , mn > 4 \end{cases} \quad (12)$$

Onde:

$$m = \frac{R \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)}{\left( \frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3}} \quad (13)$$

$$n = \frac{h \left( \frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3}}{R} \quad (14)$$

$R$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $h$  e  $\lambda$  são em unidades auto-consistentes.

De notar que quando  $R$  se aproxima de zero,  $T(m, n)$  também se aproxima de zero, logo  $L'_i$  reduz-se às perdas de difração para uma lâmina de raio zero.

### Perdas da difração de subcaminho, ( $L''$ ):

As perdas da difração de subcaminho  $L''$  são calculadas para cada subsecção do caminho geral, que foi modelado anteriormente em lâminas, entre  $w$  e  $x$  ou  $y$  e  $z$ , estes dados encontram-se representados na Figura 3. Estas são secções de perdas entre obstruções ou entre terminais e obstruções, sendo aplicadas ao longo de todo o caminho.

Para efetuarmos o estudo destas perdas precisamos de definir dois índices ( $a$  e  $b$ ) adicionais entre os pontos do perfil  $u$  e  $v$ , onde  $u$  corresponde no caso de  $L''(wx)_1$  ao  $x$  e no caso de  $L''(yz)_i$  ao  $y$  e  $v$  ao  $x$  no primeiro caso e  $z$  no segundo. Estes dois índices são então definidos da seguinte forma:

$$a = u + 1 \quad (15)$$

Se  $a < v$  e  $h_a > h_{a+1}$  então o  $a$  é incrementado de uma unidade e repete-se o passo anterior.

$$b = v - 1 \quad (16)$$

Se  $b > u$  e  $h_b > h_{b-1}$  então o  $b$  é incrementado de uma unidade e repete-se o passo anterior.

Caso  $a > b$ , então  $a = b$ .

Quando estamos perante um caso em que o  $a = b$ , então as perdas neste caso são iguais a zero. Caso isso não se verifique vamos calcular o valor mínimo da folga normalizada  $C_F$ , que nos é dada através da seguinte expressão para unidades auto-consistentes:

$$C_F = \min_{i=a}^b \left[ \frac{(h_z)_i}{(R_1)_i} \right] \quad (17)$$

onde:

$h_z$ : altura do raio acima do ponto do perfil

$R_1$ : raio do primeiro elipsoide de Fresnel

$$(h_z)_i = (h_r)_i - (h_t)_i$$

$(h_r)_i$  é a altura do raio do primeiro elipsoide de Fresnel acima da linha reta que une o nível do mar em  $u$  e em  $v$  no ponto  $i$  do perfil, que é:  $(h_r)_i = (h_u d_{iv} + h_v d_{ui}) / d_{uv}$

$(h_t)_i$  é a altura do terreno acima da linha reta que une o nível do mar em  $u$  e em  $v$  no ponto  $i$  do perfil, que é:  $(h_t)_i = h_i + (d_{ui} d_{iv}) / d_{uv}$

$$(R_1)_i = \sqrt{\frac{\lambda d_{ui} d_{iv}}{d_{uv}}}$$

Calculados estes valores retiramos o valor adimensional de *knife-edge*,  $v$ , através de:

$$v = -C_F \sqrt[2]{2} \quad (18)$$

E efetuamos o cálculo da perda com base na equação (10).

Fator de correção  $C_N$ :

O fator de correção  $C_N$  é calculado através de:

$$C_N = \sqrt[2]{\frac{P_a}{P_b}} \quad (19)$$

Onde:

$$P_a = d_{wv} \prod_{i=1}^N [(d_{vz})_i] \left( d_{wv} + \sum_{j=1}^N [(d_{vz})_j] \right) \quad (20)$$

$$P_b = (d_{wv})_1 (d_{vz})_N \prod_{i=1}^N [(d_{wv})_i + (d_{vz})_i] \quad (21)$$

### 2.1.3. Modelo de Propagação de Okumura-Hata

A seguinte contextualização baseia-se em [5] [7] [8].

O modelo de propagação de Okumura-Hata é um dos modelos empíricos mais conhecidos, que nos permite efetuar o estudo de uma propagação em ambientes com obstáculos de origem humana, nomeadamente zona rurais, suburbanas e urbanas.

Este modelo foi lançado por Hata em 1980 [19] e serviu para complementar o estudo desenvolvido em 1968 por Okumura [20]. Okumura tinha desenvolvido um conjunto de curvas que permitiam obter a atenuação média relativamente a uma propagação em espaço livre. Estas curvas eram o resultado de medidas exaustivas usando antenas omnidirecionais quer na estação emissora quer na recetora, numa gama de frequências entre os 100 MHz e os 1920 MHz e em função de distâncias entre antenas a variar de 1 km até 100 km. Como este modelo era apenas baseado em medidas efetuadas no terreno, não fornecia sustento analítico, o que levou Hata a desenvolver um novo modelo.

O modelo de Okumura-Hata tem duas formas de calcular as perdas de caminho ou *path loss* descrita anteriormente. Na primeira forma as perdas do caminho, em dB, são escritas pela equação (22):

$$PL = PL_{\text{espaço livre}} + A_{\text{exc}} - H_{cb} - H_{cm} \quad (22)$$

onde,  $PL_{\text{espaço\_livre}}$  são as perdas de caminho no espaço livre,  $A_{\text{exc}}$  é o excesso de perdas no caminho (em função da frequência e distância) para um emissor de altura  $h_{BS} = 200m$ , e um recetor de altura  $h_{MS} = 3m$ . Os fatores de correção  $H_{cb}$  e  $H_{cm}$  são calculados a partir dos gráficos da Figura 5.

A forma mais comum de implementação é uma aproximação linear dos resultados originais de Okumura. Nesta implementação as perdas de caminho são descritas como:

$$PL = A + B \log_{10} d + C \quad (23)$$

Onde  $A$ ,  $B$  e  $C$  são fatores dependentes da altura de antena e frequência e podem ser calculados da seguinte forma:

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) \quad (24)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{MS}) \quad (25)$$

Onde  $f_c$  é a frequência em MHz e  $d$  a distância em km. A função  $a(h_{MS})$  e o fator  $C$  dependem do ambiente:

- Para cidades pequenas e médias temos:

$$a(h_{MS}) = [1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7]h_{MS} - [1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8] \quad (26)$$

$$C = 0$$

- Para áreas metropolitanas temos:

$$a(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29 \log_{10}(1.54h_{MS}) - 1.1 & ; f \leq 200\text{MHz} \\ 3.2 \log_{10}(11.75h_{MS}) - 4.97 & ; f \geq 400\text{MHz} \end{cases} \quad (27)$$

$$C = 0$$

- Para áreas suburbanas temos:

$$C = -2 \log_{10}\left(\frac{f_c}{28}\right)^2 - 5.4 \quad (28)$$

- Para áreas rurais temos:

$$C = -4.78 \log_{10}(f_c)^2 + 18.33 \log_{10}(f_c) - 40.98 \quad (29)$$

No caso de áreas suburbanas e rurais a função  $a(h_{MS})$  calcula-se da mesma forma que para cidades pequenas e médias.

Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros para os quais o modelo é válido. De notar que nos parâmetros da tabela não se engloba a frequência de 1800 MHz, muito utilizada para sistemas celulares de segunda e terceira geração. Este problema foi resolvido pelo modelo COST231-Hata que estende a região de validade para as frequências de 1500-2000 MHz com as definições de:

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) \quad (30)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS}) \quad (31)$$

Onde  $a(h_{MS})$  é igual à função para cidades pequenas e médias.  $C$  é 0 para pequenas e médias cidades e 3 para áreas metropolitanas.

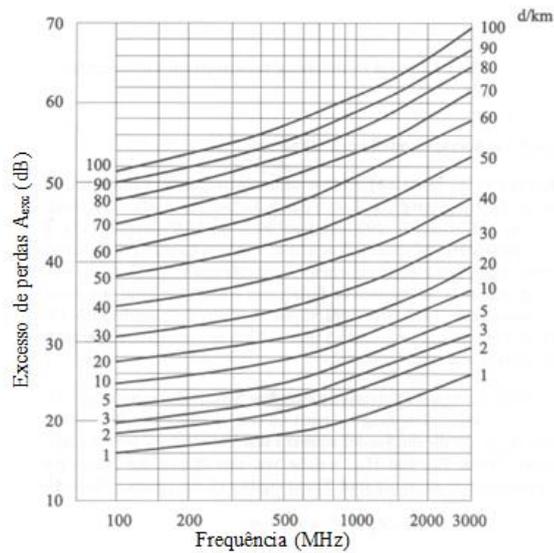


Figura 4: Perdas de caminho de Okumura-Hata [8].

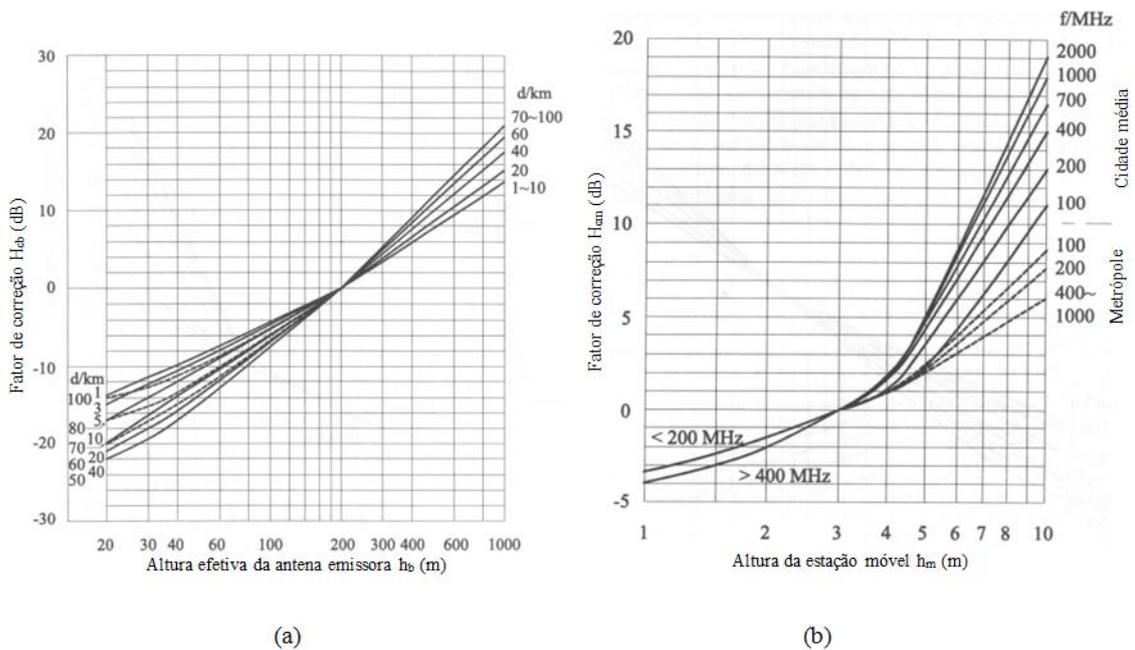


Figura 5: Fator de correção para o emissor (a) e fator de correção para o recetor (b) [8].

**Tabela 2: Gama de valores para os quais o modelo de Okumura-Hata é válido [8].**

Gama de frequências da portadora	$f_c$	150 – 1500 MHz
Altura efetiva da antena emissora	$h_{MS}$	30 – 200 m
Altura efetiva da antena recetora	$h_{MS}$	1 – 10 m
Distância	$d$	1 – 20 km

O modelo Okumura-Hata também assume que não existem obstáculos dominantes entre o emissor e o recetor, e que o perfil do terreno se altera sem grande acentuação. Badsberg [21] sugeriu alterações aos fatores de correção que visam evitar estas restrições, no entanto, não encontraram a aceitação geral que se verificou para os fatores de correção de COST231.

#### 2.1.4. Modelo de Propagação em Folhagem de Weissberger's

A seguinte contextualização baseia-se em [9] [10].

A maioria das comunicações rádio requer a passagem dos sinais por zonas de folhagem. Através de vários estudos verificou-se que as perdas por atravessamento de zonas de folhagem são significativas relativamente às perdas que ocorrem nas zonas sem vegetação.

Folhas, troncos e ramos podem provocar atenuações, difrações, reflexões e *scattering*. O número de objetos obstrutivos presentes em ambientes florestais é elevado e estão normalmente aleatoriamente distribuídos, o que gera algumas dificuldades na formulação de modelos que possam prever o comportamento do sinal ao longo do percurso de floresta.

Devido a essas limitações vários estudos foram feitos de forma a tentar prever o comportamento do sinal, como resultado destes estudos é desenvolvido o modelo escolhido.

Os tipos de atenuações existentes nos modelos de vegetação são variados e normalmente muito complexos. Estes requerem um estudo aprofundado do tipo de vegetação e do meio dentro da zona vegetada onde a onda se propaga. Os modelos mais completos requerem um grande número de dados que não possuíamos neste estudo, sendo por isso escolhido o modelo de Weissberger's que é um modelo simples, mas que devolve resultados credíveis. Com este modelo podemos calcular as perdas de propagação  $L(dB)$  da seguinte forma:

$$L(dB) = \begin{cases} 1.33f^{0.284}d^{0.588}, & 14 < d \leq 400 \\ 0.45f^{0.284}d & , \quad 0 < d \leq 14 \end{cases} \quad (32)$$

Onde:

$f$ : é a frequência da onda portadora (GHz);

$d$ : é a distância de penetração da onda na zona de folhagem (m).

Este modelo aplica-se a uma banda de frequências de 230MHz a 95GHz, sendo ideal para zonas de folhagem densa e seca em climas temperados.

## 2.2. Sistemas de Informação Geográfica

A seguinte contextualização baseia-se em [2] e [3].

Desde cedo o Homem sentiu a necessidade de armazenar informação de carácter geográfico e cartográfico. Algumas das pinturas que nos chegaram dessa época contêm muita dessa informação. Esta, em tempos, foi importante para o Homem, saber a localização de pontos de água, de zonas de caça, das zonas férteis, entre outras coisas, e fazia a diferença na luta pela sobrevivência. Com o passar dos anos e com a evolução Humana, outras utilizações foram sendo dadas a este tipo de informação, surgindo os mapas cartográficos. A revolução tecnológica levou também a uma revolução no formato dos mapas, tendo-se tornando os métodos analógicos de produção de mapas obsoleto, passando-se a armazenar a informação em bases de dados que permitiam aumentar a quantidade de informação armazenada, surgindo os mapas no formato digital. A utilização de mapas digitais permitia a utilização de ferramentas que aliavam *hardware*, *software* e a informação disponível, surgindo os Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Estas ferramentas foram sendo desenvolvidas, evoluindo, e hoje em dia permitem capturar, armazenar, manipular, analisar e gerir informação geográfica, de uma forma rápida e organizada, dando resposta ao crescente número de solicitações.

Atualmente os sistemas SIG encontram-se em diversas empresas e instituições, sendo utilizados para os mais diversos estudos, pois a sua versatilidade permite armazenar todo o tipo de informação referente a uma determinada área geográfica, como, por exemplo, recenseamentos, incêndios, localização das escolas, entre outros.

Devido a essa versatilidade resolveu-se utilizar os sistemas SIG para se realizar o estudo da propagação proposto. Através destes pode-se gerir e processar informação geográfica do meio real e a partir desta obter-se a informação necessária para implementar os modelos descritos anteriormente.

Para efetuar este estudo foi utilizada uma licença comercial do programa da Esri, ArcGIS 10.0, que é um *software* SIG. O ArcGIS é um conjunto de produtos que permitem ao utilizador implementar vários tipos de sistemas SIG. Este utiliza modelos de dados SIG para representar geografia e fornece ao utilizador todas as ferramentas necessárias para criar e manusear informação geográfica, permitindo-lhe editar, analisar e automatizar processos, mapear informação e ainda permite a colocação das aplicações desenvolvidas pelo utilizador na Internet.

Entre os vários produtos que compõem o ArcGIS encontram-se o ArcCatalog, o ArcMap e a ArcToolbox.

- O ArcCatalog é uma aplicação de gestão utilizada para percorrer, observar e encontrar ficheiros e dados existentes no computador, facilitando a utilização do ArcGIS.
- O ArcMap é uma aplicação utilizada para a visualização, edição e manipulação de informação geoespacial.
- A ArcToolbox contém uma grande variedade de ferramentas que permitem converter, analisar e manipular a informação geoespacial existente.

O ArcGIS suporta a implementação de modelos de dados geográficos para ficheiros do sistema e para sistemas de gestão de base de dados (DBMs). No caso de ficheiros do sistema podemos incluir imagens, grelhas, coberturas, redes irregulares trianguladas (TINs), entre outros, mas nas DBMs este trabalha com base de dados geográficas (*geodatabases*), sendo estas modelos para representar informação geográfica através de bases de dados relacionais.

As bases de dados geográficas do ArcGIS suportam o armazenamento e a gestão de informação geográfica na forma de tabelas. Estas tabelas podem, por exemplo, ser utilizadas para armazenar uma classe de características (*feature class*), onde cada coluna representa uma característica. Estas permitem armazenar e/ou gerir classes vetoriais e todo o tipo de dados espaciais que são armazenados em tabelas relacionais, permitindo unir tudo numa única DBM, sendo o armazenamento e a gestão de bases de dados geográficas relacional.

O ArcGIS, assim como outros *softwares* SIG tem uma organização por níveis de informação, onde cada um destes representa determinado conjunto de dados da realidade, no fundo, a realidade encontra-se dividida em varias camadas e o conjunto destas define-a. Na Figura 6 estão ilustrados alguns desses níveis que são normalmente usados no âmbito dos SIG.



**Figura 6: Exemplo da definição de uma superfície em níveis de informação.**

A extração e manipulação de dados dos níveis, que são utilizados para processamento, é complexa, envolvendo uma grande variedade de ferramentas já existentes na ArcToolbox, no caso do ArcGIS, ou requerendo o desenvolvimento de novas. Este desenvolvimento no ArcGIS pode ser feito através de uma aplicação existente chamada *Model Builder* ou através de *scripts* de programação em Python que podem mais tarde ser incorporados no sistema.

### **2.2.1. Model Builder do ArcGis**

A aplicação *Model Builder* incorporada no ArcGIS permite-nos criar, editar e manipular modelos facilmente.

Esta é uma aplicação onde os modelos são desenvolvidos em ambiente gráfico, manipulando ferramentas e dados de acordo com o que se pretende efetuar. Nesta pode-se facilmente incorporar as ferramentas já existentes no ArcToolbox, automatizando a extração e manipulação de dados.

Na Figura 7 temos um pequeno exemplo duma das ferramentas desenvolvidas ao longo deste trabalho através do *Model Builder*. Nesta estão representados a azul-escuro os dados de entrada no modelo desenvolvido, a amarelo as ferramentas utilizadas e a verde os dados finais obtidos depois de cada ferramenta.

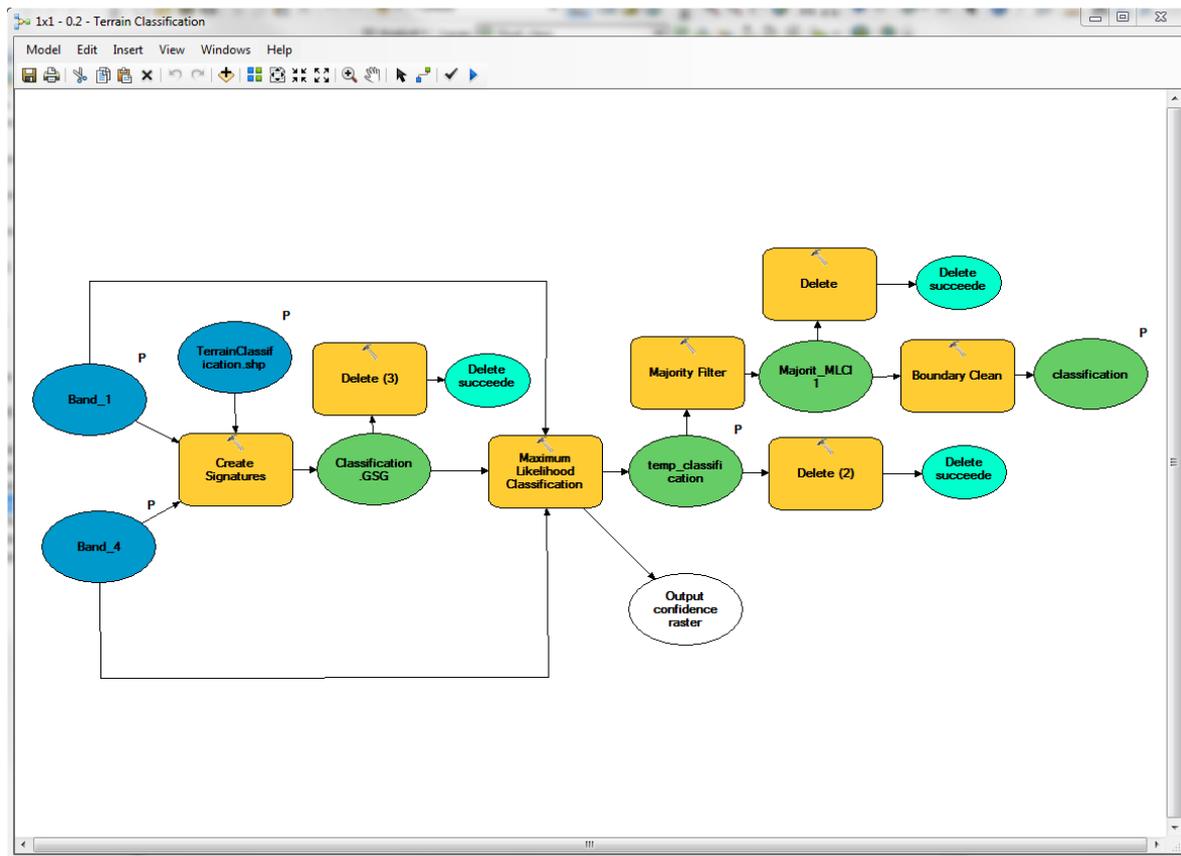


Figura 7: Exemplo de uma ferramenta desenvolvida no *Model Builder* do ArcGIS.

### 2.2.2. Programação em Python

O Python é uma linguagem de programação de alto nível desenvolvida em 1989. Esta é caracterizada por ser uma linguagem simples e de fácil aprendizagem, mas ao mesmo tempo flexível, dinâmica e poderosa, que permite ao utilizador desenvolver as suas bibliotecas e com o seu carácter de código aberto (*Open Source*), partilhar estas com toda a comunidade de programadores. Os scripts desenvolvidos em Python podem ser embutidos nas mais diversas aplicações e as suas extensões e módulos facilmente escritos em C, C++ ou Java, ou até mesmo serem integrados noutras linguagens de programação. Este encontra-se disponível para a maioria dos sistemas operativos.

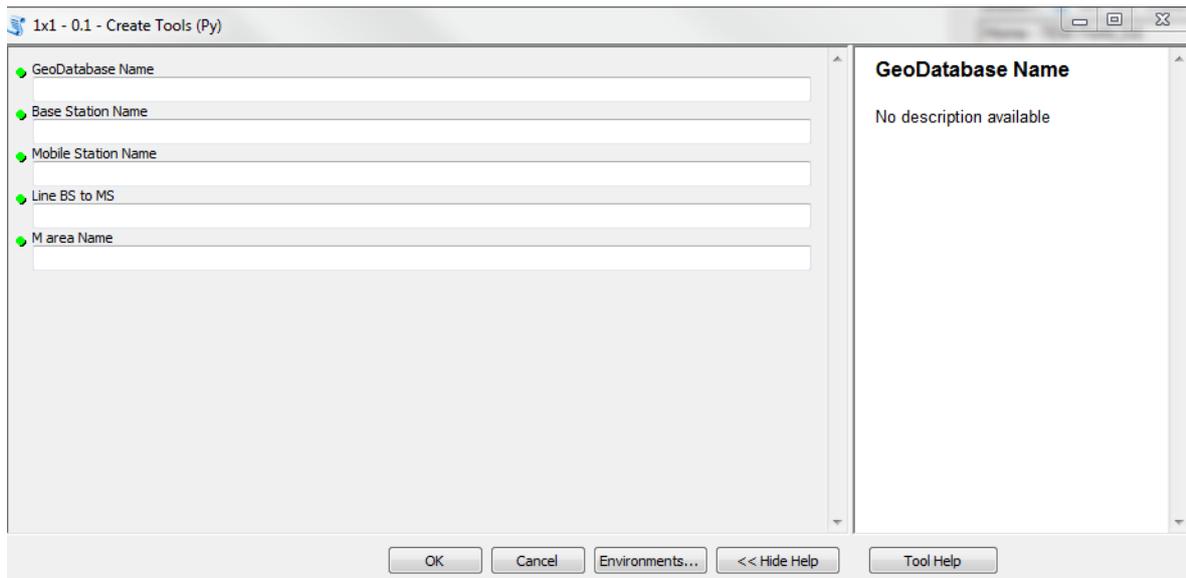
Estas características fazem com que o Python apareça ligado a várias aplicações, como no caso do ArcGIS.

Como foi dito anteriormente é possível desenvolver *scripts* Python que podem depois ser incorporados no ArcGIS. Isto é possível devido à existência da biblioteca *arcpy*, que nos permite realizar a análise, conversão e manipulação de dados geográficos. Esta fornece ainda acesso a

ferramentas de geoprocessamento, funções, classes e módulos que nos permitem assim efetuar o trabalho facilmente. O arcpy encontra-se organizado em ferramentas, funções, classes e módulos.

Os scripts desenvolvidos com o Python são depois incorporados no ArcGIS, sendo adicionados e declarados manualmente. Depois de serem importados e declarados todos os dados necessários, o utilizador pode a qualquer momento correr este script a partir do ArcCatalog.

A Figura 8 permite-nos observar como é apresentado ao utilizador de ArcGIS um dos scripts desenvolvidos neste trabalho.



**Figura 8: Exemplo do interface gráfico de uma ferramenta desenvolvida no projeto.**



## 3. Implementação Prática

Neste capítulo é descrito o funcionamento do programa desenvolvido no decorrer deste trabalho. A descrição é feita de acordo com a ordem de implementação das ferramentas para a obtenção dos resultados finais.

A implementação prática deste trabalho foi dividida em duas fases, uma primeira fase onde foram desenvolvidos *scripts* em Python e em Model Builder para a extração dos dados de informação geográfica no ArcGIS, que depois viriam a ser utilizados na segunda fase onde se efetuava o cálculo das perdas de propagação. Estes *scripts* foram desenvolvidos recorrendo a ferramentas incluídas no ArcGIS, ferramentas essas que por serem utilizadas no desenvolvimento de *scripts*, que serão denominados por Ferramentas (porque são utilizadas como uma ferramenta da ArcToolbox), são denominadas como processos.

De seguida descrevem-se os dados disponibilizados inicialmente e ainda como se procedeu à implementação deste projeto.

### 3.1. Dados disponibilizados

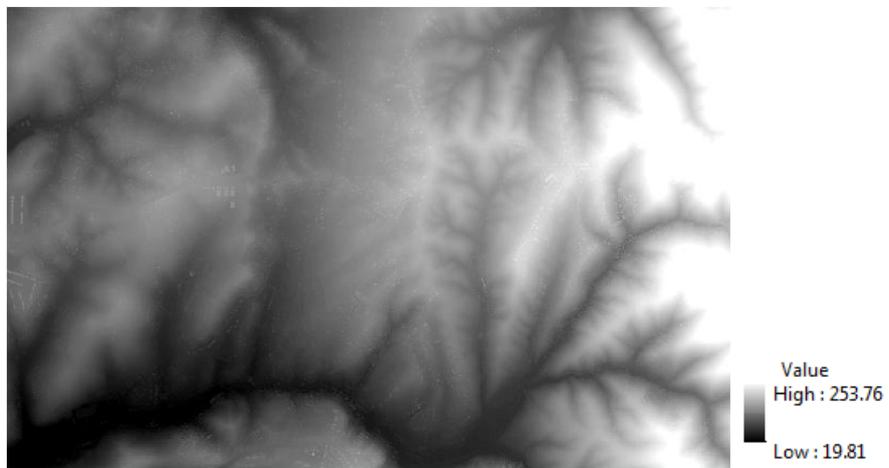
#### 3.1.1. Dados para utilização em ArcGIS

Inicialmente foram disponibilizados três ficheiros em formato de imagem. Estes eram:

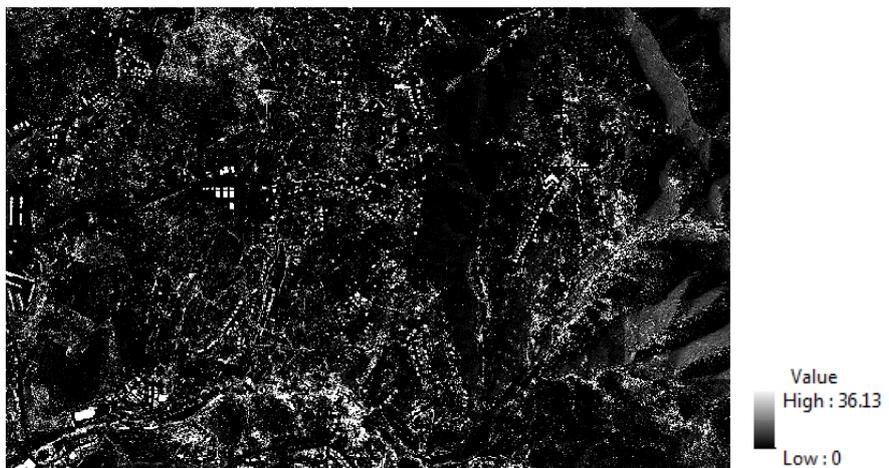
- **ImagemAreaFloresta.tif** – ficheiro imagem da zona de estudo dos ortofotos digitais, com resolução espacial de 0,50 m, com quatro bandas. Estas bandas são, as bandas RGB e a banda de infravermelhos, correspondendo a banda 1 ao vermelho, a 2 ao verde, a 3 ao azul e a 4 ao infravermelho. Foi cedido pelo Instituto Geográfico Português, atualmente Direção geral do Território. Este encontra-se representado na Figura 9.
- **DSMAreaFlorestal.tif** – Modelo Digital de Superfície (MDS), que, juntamente com o Modelo Digital de Terreno (MDT), foi cedido pela empresa Edinfor. Este contém as alturas ortométricas dos pontos da superfície, sendo essa uma soma das alturas dos pontos do terreno com as alturas dos objetos aí presentes, a Figura 12 demonstra esta relação. Este encontra-se representado na Figura 10.
- **DSMnAreaFlorestal.tif** – este ficheiro contém a diferença entre o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT), no fundo contém as alturas dos objetos encontrados no mapa em estudo. A Figura 11 apresenta-nos uma representação deste ficheiro.



**Figura 9: Ficheiro disponibilizado ImagemAreaFlorestal.gif.**

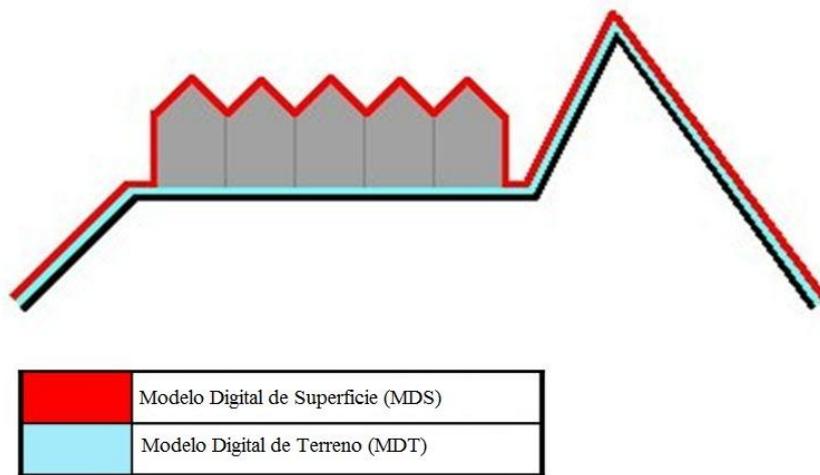


**Figura 10: Modelo Digital de Superfície (MDS).**



**Figura 11: Diferença entre Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT).**

A Figura 12 demonstra melhor a diferença entre o Modelo Digital de Superfície e o Modelo Digital de Terreno:



**Figura 12: Exemplo de um Modelo Digital de Superfície e um Modelo Digital de Terreno (DTM).**

Os ficheiros descritos anteriormente encontravam-se georreferenciados no sistema de referência Hayford Gauss - Datum 73, cujas características se encontram disponíveis na página do Instituto Geográfico Português (IGP) [22].

### **3.1.2. Dados da antena utilizada**

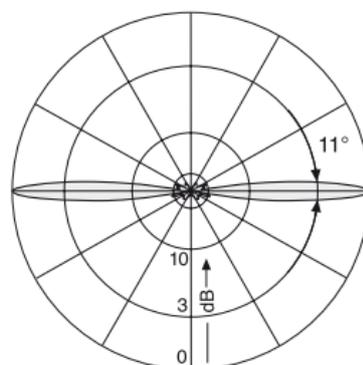
Na implementação deste trabalho foram pedidos dados de uma antena omnidirecional que se adequasse a uma propagação rádio à empresa alemã KATHREIN-Werke KG, que disponibilizou informação para o seu modelo 80010747. A escolha de uma antena omnidirecional deve-se ao facto deste ser o tipo de antena utilizada nas instituições mencionadas anteriormente (bombeiros, polícia, empresas de transportes, entre outros) nas suas comunicações internas.

Esta era ajustável para duas bandas de frequências, 790-862MHz e 870-960MHz e a sua informação foi disponibilizada em ficheiros de texto com a estrutura como a demonstrada na Figura 13.

```

NAME 80010747
FREQUENCY 902.5
GAIN 6.85 dBd
TILT ELECTRICAL
COMMENT DATE 14.06.2010
HORIZONTAL 360
0.0 0.00
1.0 0.00
2.0 0.00
3.0 0.00
4.0 0.00
5.0 0.00
.
..
...
355.0 0.00
356.0 0.00
357.0 0.00
358.0 0.00
359.0 0.00
VERTICAL 360
0.0 0.84
1.0 0.78
2.0 0.91
3.0 1.22
4.0 1.85
5.0 2.71
.
..
...
355.0 4.36
356.0 3.19
357.0 2.26
358.0 1.56
359.0 1.11

```



Componente vertical

**Figura 13: Estrutura do ficheiro de texto com informação da antena e o diagrama de radiação, da componente vertical.**

Como se pode verificar este ficheiro contém informação da frequência da portadora, do ganho da antena e os dados do diagrama de radiação. A utilização destes dados permite fazer uma validação dos resultados obtidos, aproximando o estudo desenvolvido de uma situação real.

### 3.2. Planeamento

Os modelos apresentados anteriormente em 2.1. foram selecionados de entre um grande número de modelos. Esta escolha deveu-se ao facto de para muitos dos modelos existentes ser necessário determinado tipo de dados que não dispúnhamos, por isso, para facilitar a escolha definiu-se o seguinte procedimento:

- 1) Criar entidades que permitam ao utilizador da ferramenta definir para o seu estudo um emissor, um recetor ou uma área de estudo. As antenas deveriam ser entidades do tipo ponto e a área uma entidade do tipo polígono. Criou-se ainda uma entidade para o caminho entre antenas do tipo linha.

- 2) A ferramenta desenvolvida deve verificar se existe algum tipo de obstrução ao trajeto entre antenas, caso não exista, esta deve calcular as perdas existentes para uma propagação em espaço livre. Se por outro lado a propagação contivesse algum obstáculo, esta deve associar às perdas anteriores as perdas por difração para essa propagação, através do modelo de propagação por *knife-edge*. Os dados seriam extraídos do modelo digital de superfície (MDS), que modela todos os obstáculos numa única camada, não se distinguindo os obstáculos do perfil do terreno.
- 3) No local onde se encontra definido o recetor ou a área de estudo seriam calculadas as perdas devidas ao tipo de obstruções do espaço envolvente, utilizando-se uma classificação do tipo de obstáculos existentes. Definida a classificação, a ferramenta deveria efetuar o cálculo da perda associada à obstrução encontrada, se a obstrução fosse devida a vegetação, as perdas seriam calculadas através do modelo de propagação de Weissberger's, se por outro lado fosse do tipo habitação, as perdas seriam calculadas através do modelo de propagação de Okumura-Hata, se não houvesse obstrução apenas seriam consideradas as perdas de trajeto.
- 4) Finalmente, as perdas totais resultariam da soma de todas as perdas calculadas.

Definiu-se ainda que estes procedimentos têm que ser feitos de forma que o utilizador final consiga efetuar estudos 1x1, 1xN e Mx1. Assim sendo, um estudo 1x1 é um estudo entre um emissor e um recetor, o 1xN é um estudo entre um emissor e múltiplos recetores ou uma área e Mx1 é o estudo entre múltiplos emissores e um recetor.

### **3.3. Primeira Fase de Implementação**

A primeira fase referida anteriormente resulta da implementação de nove ferramentas. Estas ferramentas destinam-se à manipulação dos dados disponibilizados de forma a se conseguir extrair a informação necessária para a aplicação dos modelos de propagação escolhidos. Identificou-se a necessidade de adicionar as coordenadas XYZ às tabelas de cada um dos pontos que definem o emissor, o recetor, área e caminho entre antenas. Também se verificou a necessidade de adicionar a distância entre antenas e a informação dos pontos obstrutores encontrados ao longo do caminho entre estações. Tendo em conta essa necessidade, criaram-se as ferramentas que se vão ver de seguida e armazenaram-se os dados considerados importantes para o estudo num ficheiro de texto, a estrutura desse ficheiro encontra-se demonstrada no Anexo C.

Vamos descrever as ferramentas desenvolvidas.

### **Ferramenta 1: Terrain Classification tool (*Model Builder*)**

Para extrairmos os dados necessários começámos por analisar os ficheiros descritos anteriormente e num destes detetámos algumas falhas na informação disponível. Comparando a Figura 9 com a Figura 11, reparámos que a DSMn, que deveria indicar as alturas dos objetos existentes no terreno, continha algumas falhas na informação representada comparativamente com a imagem da zona de estudo. Este problema estava relacionado com a diferença nas datas em que cada um dos ficheiros foi criado, provocando problemas de coerência entre estes.

Para a utilização dos modelos referidos era necessário conhecer a localização dos edifícios, zonas de vegetação, entre outros dados. Isso levou à criação de uma entidade que contivesse uma classificação supervisionada de imagens multiespectrais do ficheiro representado na Figura 9. Uma classificação deste tipo requer a definição de áreas de treino para cada uma das classes a considerar, sendo essa uma tarefa delicada devido à proximidade espectral entre zonas, que pode originar erros no classificador.

As zonas de treino foram definidas recorrendo a uma ferramenta de classificação de imagem do ArcGIS, com a qual se retiraram as amostras das classes pretendidas, recorrendo a amostras em que a qualidade fosse mais importante que o tamanho, de forma a se tentar minimizar os efeitos de proximidade espectral, referidos anteriormente.

Através da análise de histogramas e de *scatterplots* das amostras escolhidas (resultados demonstrados no capítulo seguinte), verificou-se a possibilidade de ocorrência dos efeitos mencionados anteriormente, definindo-se as classes de forma a minimizar estes efeitos, sendo estas:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1 – Vegetação alta     | 4 – Áreas artificiais e zonas queimadas |
| 2 – Vegetação rasteira | 5 – Solo nu                             |
| 3 – Cobertura cerâmica |   |

Após a escolha destas classes criou-se a ferramenta que estamos atualmente a descrever com o auxílio do *Model Builder* do ArcGIS, que permite efetuar a classificação descrita através da utilização de um classificador de máxima verosimilhança, seguido de uma filtragem para eliminar algumas imperfeições.

A ferramenta começa por receber as amostras definidas anteriormente, juntamente com as bandas de 1 a 4 da ImagemAreaFlorestal.tif e através do processo *Create Signatures*, é criado um arquivo de assinaturas ASCII das classes definidas pelas amostras escolhidas anteriormente e pelo conjunto de bandas da imagem. Obtido o arquivo de assinaturas é feita uma classificação

utilizando o classificador de máxima verossimilhança, sendo depois a cada célula atribuída a classe a que tem maior probabilidade de pertencer, este processo é feito com o auxílio do processo *Maximum Likelihood Classification* do ArcGIS.

Analisando a classificação obtida, reparou-se na presença de alguns pixels isolados, pertencentes a outras classes, que se encontravam dentro de classes mais representativas. Isto levou a uma filtragem da classificação através do processo de filtragem *Majority Filter*, que substitui as células com base no valor mais comum na sua vizinhança contígua. Como também existia alguma irregularidade nos limites entre classes foi efetuada uma limpeza destes, através do processo *Boundary Clean*, que os suaviza. O resultado destes processos é demonstrado no capítulo seguinte.

Ao analisarmos a classificação obtida reparámos que os pontos classificados como classe 3 ou classe das “coberturas cerâmicas” eram na sua maioria habitações, enquanto os das classes 4 e 5, ou seja “áreas artificiais e zonas queimadas” e “solo nu” eram na sua maioria zonas ao nível do terreno, passando a classe 3 a representar as habitações e a 4 e 5 zonas ao nível do terreno

De novo se observa que a classificação obtida contém limitações, pois obtêm-se casas e terrenos identificados com a mesma classe e o mesmo se passa com a vegetação rasteira e a vegetação alta, pois as cores são semelhantes. Devido às limitações encontradas, procurou-se melhorar a classificação através de um cruzamento entre a informação obtida com a classificação da imagem multiespectral e a existente no DSMn, sendo para isso definida uma nova ferramenta.

### **Ferramenta 2: Classification Optimization tool (Python)**

Para melhorar a classificação obtida na ferramenta anterior, analisou-se novamente os dados existentes no DSMn e verificou-se que os dados relativos às alturas das construções estavam corretos, verificando-se as maiores falhas nas alturas da vegetação. Devido a esta análise resolveu-se melhorar a classificação através do cruzamento dos dados obtidos com a ferramenta 1 e os dados do DSMn.

Para melhorar a classificação começou-se por, com o auxílio do processo *Con*, criar duas camadas em que numa apenas se tinha os valores do DSMn com alturas superiores a 3 metros e na outra os valores da classificação iguais às classes 4 ou 5, que como foi mencionado anteriormente, correspondem a zonas ao nível do terreno. De seguida comparam-se os dois níveis de informação obtidos, retirando os valores coincidentes nestes com o auxílio do processo *Boolean And*, obtendo-se uma nova entidade apenas com os valores coincidentes e que correspondem a valores classificados como terreno que têm alturas maiores que 3 metros, algo

que na realidade não existe, correspondendo por isso a uma falha de classificação, sendo estes na realidade habitações.

Como os valores obtidos no final do *Boolean And* estão referenciados aos valores da classificação original, ou seja, 4 e 5, alteraram-se esses valores para 3 através do processo *Reclassify* e substituíram-se na classificação original com o processo *Pick*, obtendo-se assim uma nova classificação.

Seguidamente fez-se o mesmo procedimento, verificando quais os pontos do DSMn que têm alturas superiores a 2 metros e que correspondem à classe 2, que é a classe de vegetação rasteira, alterando os valores coincidentes para a classe 1, que corresponde à vegetação alta.

Este procedimento não foi feito para valores DSMn inferiores a 2 metros por nessa gama de valores se verificarem muitas faltas de informação, encontrando-se obstáculos que na Figura 9 aparentam ter alturas grandes, identificados com alturas baixas, estando esta falta de informação associada às alterações que os obstáculos sofreram nos anos que separam as duas imagens.

Através de uma análise visual conclui-se que a classificação final resultante deste processo de reclassificação é melhor que a inicial, não sendo na mesma uma classificação perfeita, mas como o processo que levaria a fazer uma classificação ótima é longo, optou-se por se utilizar a classificação obtida, por ser uma aproximação razoável e válida para os modelos implementados. Finalmente é necessário pedir ao utilizador para definir o espaço de trabalho, para isso desenvolveu-se uma ferramenta em Python, **folder.py**, que pede ao utilizador para introduzir o caminho onde quer criar o espaço de trabalho e de seguida essa informação é guardada num ficheiro de texto para futuras utilizações.

### **Ferramenta 3: Create Tools (Python)**

Como os dados que vamos utilizar serão retirados do ArcGIS e neste trabalhamos com pontos georreferenciados, necessitamos de criar os pontos que vão representar o emissor e o recetor, uma linha para representar o caminho percorrido e um polígono para um possível estudo de perdas para uma área. Para isso desenvolveu-se esta ferramenta, que começa por criar uma base de dados geográfica no espaço de trabalho definido anteriormente pelo utilizador, através do processo *Create File GDB*. De seguida, com o auxílio do processo *Create Feature Class*, é criada uma classe de características do tipo ponto para a estação base e outra para a estação móvel, uma do tipo linha para o caminho entre estações e uma do tipo polígono para uma área de estudo, sendo estas criadas com o nome indicado pelo utilizador e todos estes nomes adicionados ao ficheiro de texto definido anteriormente.

Depois de executar a ferramenta o utilizador pode editar o seu projeto no ArcMap, editando-o e colocando o emissor e o recetor nos locais onde pretende efetuar o seu estudo, sendo estas mais tarde conectadas com uma linha. Nas Figura 22, 23, 24 e 25 podemos observar o tipo de espaços de trabalho possíveis de obter nesta dissertação.

Definidos os objetos que vão representar o emissor e o recetor no estudo, é necessário atribuir-lhes as coordenadas respetivas, tendo sido para isso definida a seguinte ferramenta:

#### **Ferramenta 4: Add Tools Data (Python)**

Esta ferramenta adiciona a informação das coordenadas XYZ às tabelas dos pontos e das áreas definidas anteriormente pelo utilizador, sendo o processo dos pontos diferente do processo das áreas.

Esta começa por pedir ao utilizador para definir o MDS, o DSMn, a classificação que pretende utilizar e ainda ângulo de orientação do emissor, potência transmitida e ganho do recetor utilizado. De seguida verifica se existem estações base e estações móveis definidas por pontos, caso existam, a ferramenta adiciona, através do processo *Add XY Coordinates*, as coordenadas X e Y do local onde se encontra o ponto, que correspondem à distância à meridiana e à distância à perpendicular respetivamente. De seguida, com o auxílio do processo *Add Surface Information*, este adiciona a coordenada Z, que corresponde à altura verificada no MDS do ponto em estudo.

Caso o utilizador defina uma área de estudo para a receção do sinal (polígono), o programa primeiro tem que converter o polígono para *raster* através do processo *Polygon to Raster* e de seguida o *raster* para pontos, com o processo *Raster to Point*, ficando assim a área representada por pontos de estudo. Depois de definidos os pontos a ferramenta efetua os passos descritos anteriormente para pontos.

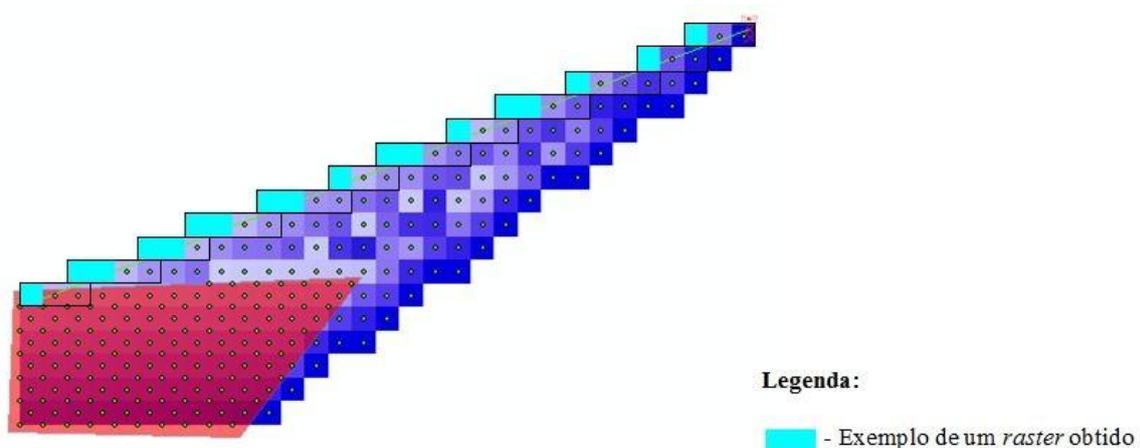
No final a ferramenta cria ainda uma circunferência com um raio de 50 metros à volta de cada ponto que define uma estação móvel, através do processo *Buffer*, e vai estudar o tipo de classificação existente nos pontos situados no interior da circunferência, através do processo *Zonal Statistics*, extraindo o valor da classificação mais representativo com o processo *Extract Multi Values to Points*, sendo depois esse valor adicionado à tabela da estação móvel. O processo guarda ainda toda a informação necessária no ficheiro de texto definido anteriormente. Podemos verificar o resultado desta ferramenta no Anexo D.

Depois de processados os emissores e os recetores, é necessário processar a linha entre antenas e estudar o caminho percorrido. Para isso primeiro é necessário adicionar a informação XYZ a todos os pontos da linha, o que levou ao desenvolvimento da seguinte ferramenta:

### **Ferramenta 5: Line to Point (Python)**

Esta ferramenta começa por verificar o tipo de estações definidas, se estas forem definidas por pontos, as linhas existentes entre antenas ficam agrupadas num único ficheiro, mas como vamos necessitar de processar as linhas separadamente torna-se necessário converter este ficheiro em múltiplos ficheiros. Se for um estudo entre um emissor e uma área, que foi convertida em pontos, a ferramenta começa por efetuar as ligações entre a antena e os diversos pontos da área de estudo (Figura 24) gravando estas em múltiplos ficheiros, isto porque neste caso a linha que une o emissor à área de estudo não pode ser definida pelo utilizador. Em ambos os casos o código que produz a separação em múltiplas linhas teve que ser desenvolvido em Python.

Após definirmos as linhas estas são processadas separadamente, por se ter verificado que se as linhas forem muito próximas, os pontos resultantes da conversão dos *rasters* acabam por ser coincidentes, o que faz com que o ArcGIS apenas considere um ponto para um dos caminhos, ficando os outros incompletos, sendo isso evitado se processarmos os dados separadamente. Na Figura 14 encontra-se representado um exemplo do problema com os *rasters* coincidentes, onde a azul (  ) está representado um dos *rasters* obtidos e com retângulos de contorno preto encontra-se representado o *raster* esperado, pode-se verificar que o *raster* não foi bem extraído faltando pontos.



**Figura 14: Rasters com valores coincidentes.**

Devido a isto o processo foi efetuado separadamente começando por se converter cada linha para *raster* através de um processo de *Polyline to Raster* e depois converte-se o *raster* resultante para pontos com um processo de *Raster to Point*.

Depois da conversão da linha para pontos atribuem-se as coordenadas XYZ e o tipo de classificação de cada ponto, através do mesmo procedimento usado na ferramenta 4 para as antenas.

No final é novamente efetuada a gravação de dados importantes no ficheiro de texto auxiliar.

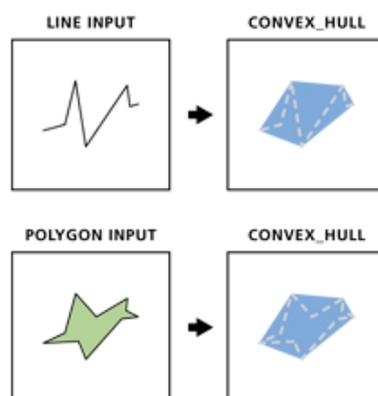
Os dados obtidos estão organizados de acordo com o processo de conversão da linha para *raster* e o necessário para o nosso estudo é uma organização por distância, algo que levou ao desenvolvimento da seguinte ferramenta.

### **Ferramenta 6: Organize Raster (Python)**

Esta ferramenta importa os dados obtidos através da ferramenta anterior e começa por encontrar a distância entre o emissor e cada um dos pontos da linha em estudo, adicionando a distância à tabela, através do processo *Point Distance* e do processo *Join Field*. De seguida a linha é organizada por distância de forma crescente através do processo *Sort* e é criada uma cópia da linha em estudo apenas com os valores da distância e dos Z's, sendo essa linha mais tarde necessária para o cálculo dos pontos de obstrução.

Este procedimento é semelhante tanto para ligações ponto a ponto como para ligações ponto a área. É novamente efetuada a gravação de dados importantes no ficheiro de texto auxiliar.

Como foi dito encontram-se os pontos obstrutores para cada trajeto através do ArcGIS com o auxílio de um processo que nos permite calcular o *convex hull* ou os polígonos convexos. De seguida calcula-se o *convex hull* para as alturas de cada trajeto em função da distância, porque este calcula o menor conjunto convexo que contém todos os pontos do sistema. No nosso caso interessa-nos a parte superior de *convex hull*, que nos devolve os pontos mais externos do trajeto, ou seja, os pontos que representam as obstruções. A Figura 15 demonstra o resultado da aplicação do *convex hull* a uma linha e a um polígono:



**Figura 15: Exemplo de *convex hull*.**

Para que o processo referido efetue um estudo adequado é necessário que o início e o fim das linhas correspondam ao emissor e ao recetor respetivamente, para isso criou-se a seguinte ferramenta:

### **Ferramenta 7: Add Common Field (Python)**

Esta ferramenta começa por pedir ao utilizador as alturas dos emissores e dos recetores e guarda estes dados no ficheiro de texto auxiliar.

De seguida abre o ficheiro de texto e verifica qual o tipo de ligação estabelecida anteriormente, ou seja, se é ponto a ponto ou ponto a área. Depois de efetuar essa verificação este vai carregar os dados das linhas, estações base, estações móveis ou áreas existentes.

Agora o programa vai em cada uma das linhas substituir os dados do ponto inicial e do ponto final, que correspondem à origem do trajeto e ao fim deste, pelos dados do emissor ou do recetor correspondentes às quais são somadas as alturas definidas no início da ferramenta pelo utilizador, seja a ligação em estudo resultante de um ponto ou de uma área. Esta substituição é feita porque anteriormente, quando se passou a linha para *raster* e depois para pontos, ao se extrair o *raster* o ponto inicial e o final são extraído por aproximação, ficando a linha a começar e a terminar em pontos próximos ao emissor e ao recetor, respetivamente. Este processo é feito para as tabelas de pontos que definem cada uma das linhas e que foram retiradas na ferramenta 5 e nas cópias efetuadas na ferramenta 6 que vão ser utilizadas para o cálculo das obstruções por trajeto.

Esta ferramenta foi totalmente implementada em Python, não recorrendo a nenhum processo existente no ArcGIS.

Finalmente resta obter os pontos obstrutores, sendo para isso desenvolvida a seguinte ferramenta.

### **Ferramenta 8: Convex Hull (Python)**

Esta ferramenta carrega as tabelas de pontos que contêm as alturas em função das distâncias e que foram copiadas através da ferramenta 6. A cópia referida foi feita de forma a forçar os pontos X a corresponderem à distância e os Y às alturas, isto foi feito para se modelar o trajeto num caminho com duas dimensões, onde se poderia estudar o perfil do terreno ao longo da distância e assim identificar as obstruções existentes. Com os dados carregados é efetuado o estudo dos pontos obstrutores calculando o *convex hull* para cada uma das linhas, através do processo *Minimum Bounding Geometry*. O processo anterior cria um polígono com os vértices obstrutores, como o da Figura 15, que não é adequado para os cálculos pretendidos, sendo por isso necessário de seguida converter os pontos com um *Feature Vertices to Points* para que lhes seja atribuída a informação relativamente à distância e ao Z respetivo com a ferramenta *Add XY Coordinates*, isto porque, como foi dito anteriormente, os pontos X e Y devolvidos estão

“forçados” a serem distância e  $Z$ , respetivamente. Um exemplo do resultado obtido no final desta ferramenta encontra-se descrito no Anexo D.

Depois de serem executadas todas estas ferramentas estão definidos os pontos onde serão efetuados os estudos das perdas de propagação e os pontos que definem os trajetos em estudo entre emissor e recetor. Para cada um dos pontos mencionados obteve-se a informação relativa às coordenadas XYZ, a altura, a distância relativamente ao emissor de origem e o tipo de obstrução envolvente que foi retirada da classificação da imagem multiespectral. Disponibiliza-se ainda a informação da posição dos pontos obstrutores ao longo do trajeto através do *convex hull*. Estes dados permitem implementar a segunda fase que se refere à aplicação dos modelos definidos para a obtenção das perdas de trajeto.

A informação que foi sendo obtida ao longo desta fase de implementação e que foi sendo avaliada como importante, por existir a possibilidade de esta poder vir a ser necessária em *scripts* seguintes, foi sendo guardada num ficheiro de texto, a informação deste ficheiro encontra-se disponibilizada no Anexo C.

### 3.4. Segunda Fase de Implementação

Apesar de se terem obtido os dados que nos permitem implementar os modelos apresentados no capítulo 2, nesta etapa ainda é necessário fazer algum pré-processamento desses dados antes de se aplicar diretamente nos modelos, para se obter as perdas de propagação. Foram então desenvolvidos seis *scripts Python* que partindo desses dados permitem aplicar os modelos escolhidos e efetuar o estudo das perdas ao longo do trajeto. Os *scripts* definidos são indicados na Tabela 3, tecendo-se de seguida uma explicação sobre cada um deles.

**Tabela 3: Scripts implementados na segunda fase de implementação prática.**

<b><i>Scripts Definidos</i></b>
Main.py
Helpers.py
Freespace.py
KnifeEdge.py
OkumuraHata.py
Weissbergers.py

### **Ferramenta 9: Main (Python)**

É o *Script* principal onde são processados todos os dados obtidos no ArcGIS e onde são efetuadas chamadas de funções que se encontram definidas noutros scripts e que facilitam o cálculo das perdas ao longo do trajeto entre outros dados explicados de seguida.

Este começa por carregar alguma da informação guardada no ficheiro de texto auxiliar e ainda carrega o ficheiro de texto com os dados da antena, percorrendo as linhas de ambos os ficheiros e guardando a informação necessária em variáveis adequadas.

De seguida o programa verifica se o tipo de propagação é entre duas estações definidas por pontos, se for este importa a informação relativa às antenas e ao número de percursos existentes e começa a percorrer cada um dos trajetos, fazendo para cada um destes o seguinte procedimento:

1. Calcula o ângulo formado pelo trajeto entre emissor e recetor, relativamente ao ângulo de orientação do emissor que foi definido pelo utilizador;
2. Obtido o ângulo anterior é de seguida encontrada a informação do diagrama de radiação respetivo, procurando a informação na variável que contém as linhas carregadas do ficheiro de texto com informação da antena;
3. É definida uma linha entre emissor e recetor, recorrendo a uma função que se encontra implementada na ferramenta 10;
4. Calcula o raio do primeiro elipsoide de Fresnel que se encontra implementado numa função encontrada na ferramenta 10;
5. Carrega a informação das obstruções obtidas pelo processo do *convex hull* e vai encontrar os pontos que se encontram na parte superior do *convex hull*, porque este trata o trajeto como pontos e retira o menor conjunto convexo que contém todos os pontos do sistema, estando neste os pontos mais altos e mais baixos que definem o conjunto que contém todos os pontos do trajeto introduzidos;
6. Depois de calcular os pontos anteriores são calculadas as perdas de propagação em espaço livre através da chamada de uma função implementada na ferramenta 11, estas perdas são calculadas para trajetos com e sem obstruções;
7. De seguida é verificado se o trajeto tem obstruções e se tiver são calculadas as perdas por difração através da chamada de uma função implementada na ferramenta 14;
8. Agora é calculada a distância de penetração em zonas arborizadas, recorrendo a informação extraída na fase anterior, este procura o ponto mais próximo do recetor onde o trajeto inicia a propagação em zona arborizada, calculando depois a distância entre esse ponto e o recetor;

9. Consecutivamente são calculadas as perdas na zona do recetor, sendo verificada a zona calculada na fase anterior. Se a zona for do tipo de vegetação alta, são calculadas as perdas recorrendo a uma função implementada na ferramenta 13, caso seja uma zona rural as perdas são calculadas recorrendo a uma função implementada na ferramenta 12.

Se a propagação for feita entre um emissor definido por um ponto e uma área que representa a zona onde se pretende estudar as perdas de propagação, o programa carrega a informação referente a esse tipo de propagação e efetua os passos descritos anteriormente para uma propagação entre um emissor definido por ponto e um recetor definido por ponto.

No final as perdas por trajeto são somadas, sendo assim encontrada a perda total de cada trajeto.

### **Ferramenta 10: Helpers (Python)**

Este *script* contém um par de funções que são chamadas pela ferramenta 9 durante o seu processamento e que foram definidas num novo *script* por uma questão de facilidade de implementação e simplificação do código do *script* principal. Estas são:

1. Função *l\_BS2MS* que recebe a informação das alturas ao longo do trajeto e o número de pontos existentes, depois esta devolve uma linha entre estação base e estação móvel com base nessa informação;
2. Função *r\_fresnel* que recebe a informação das distâncias ao longo do trajeto, o número de pontos existentes, a linha entre estação base e estação móvel e a frequência da portadora. Depois este calcula o raio do primeiro elipsoide de Fresnel ( $n=1$ ) definido na equação (34) e devolve o resultado desse cálculo.

### **Ferramenta 11: Freespace (Python)**

Neste *script* é definida uma função em Python que recebe como variáveis de entrada a frequência da portadora, o ganho do emissor, o ganho do recetor e a distância entre antenas.

Este depois implementa a equação (6) e devolve o resultado desta.

### **Ferramenta 12: OkumuraHata (Python)**

Neste *script* é definida uma função que recebe como variáveis de entrada as alturas do emissor e do recetor, a frequência da portadora e a distância entre antenas.

São implementadas as equações (26), (29), (23), (24) e (25) que nos permitem calcular as perdas no emissor devidas a construções. No final é devolvido o resultado da equação (23).

### **Ferramenta 13: Weissbergers (Python)**

Neste script é definida uma função que recebe como variáveis de entrada a frequência e a distância de penetração da onda na floresta.

É implementada a equação (32) e é devolvido o resultado desta.

### **Ferramenta 14: KnifeEdge (Python)**

Neste script é definida uma função que recebe como variáveis de entrada os índices dos pontos obstrutores, o número de pontos, a informação das distâncias e das alturas ao longo do trajeto e a largura de banda.

Esta função começa por verificar o tipo de obstrução encontrada, verificando se é uma obstrução do tipo uni-ponto ou multiponto e de seguida efetua o processo de modelação dos obstáculos em lâminas descrito no Anexo C.

Calculados os parâmetros que permitem modelar as obstruções em lâminas, calcula de seguida as perdas por difração definidas em 2.1.2. e é devolvido o resultado deste cálculo.

## 4. Análise de Resultados

Neste capítulo, para facilitar a compreensão dos resultados, definimos duas etapas para a análise dos resultados obtidos. A primeira etapa seria para a análise dos resultados obtidos na primeira fase de implementação e a segunda etapa para a análise dos resultados obtidos na segunda fase de implementação, definidas em 3.3. e 3.4. respectivamente.

### 4.1. Resultados da primeira fase de implementação

Nesta fase começou-se por fazer a classificação da área de estudo usando a imagem multiespectral e o DSMn, de forma a se conseguir obter a informação dos tipos de obstáculos existentes. Para essa classificação foram definidas amostras com o espectro de cada uma das obstruções que deveriam ser identificadas pelo classificador que, como foi descrito anteriormente, encontravam algumas falhas devidas à proximidade entre as classes definidas, procurando-se minimizar estas interferências com o auxílio dos histogramas e *scatterplots*, que foram obtidos através da ferramenta *Training Sample Manager* do ArcGIS e que se encontram representados na Figura 16 e na Figura 17.

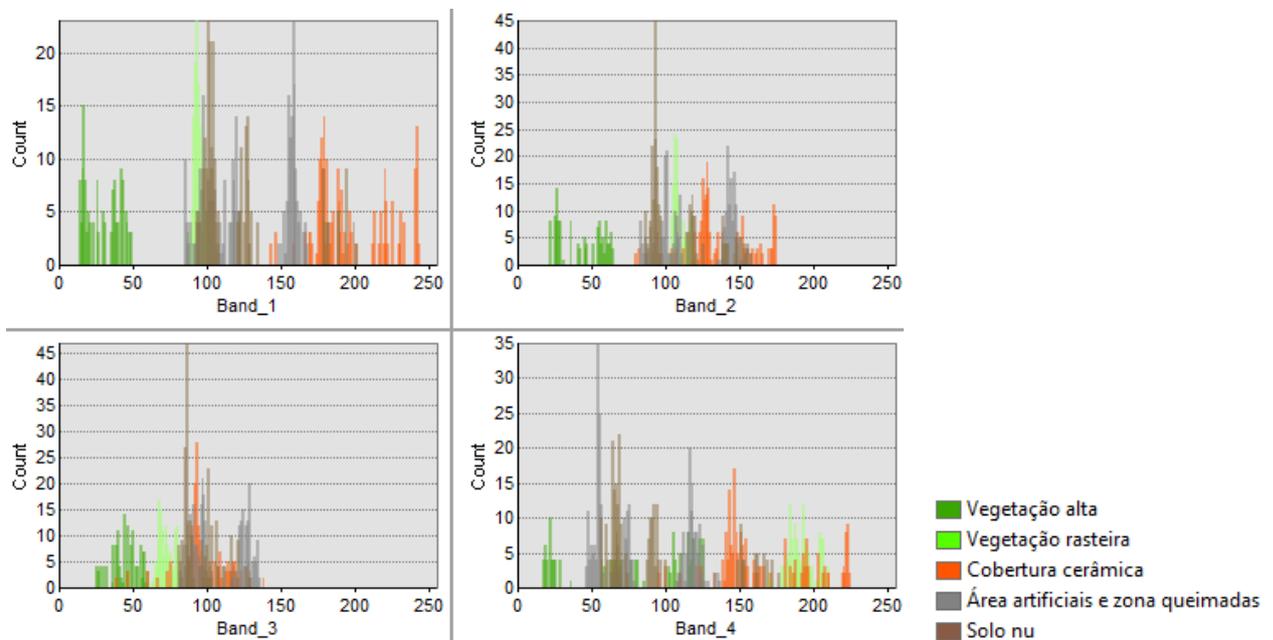
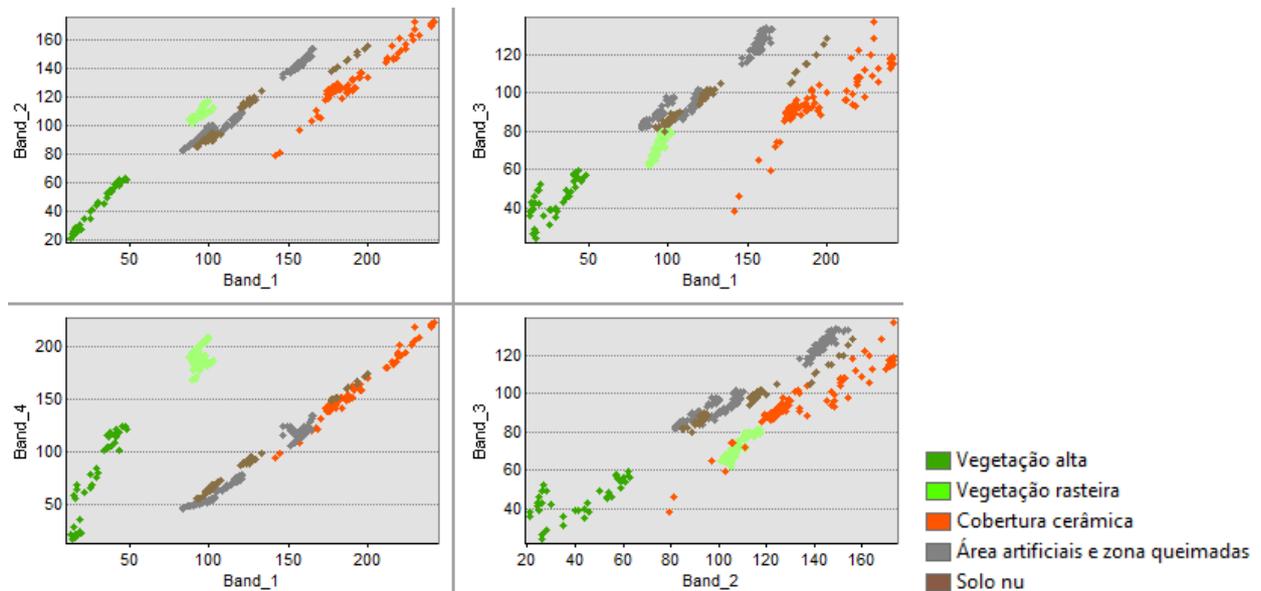


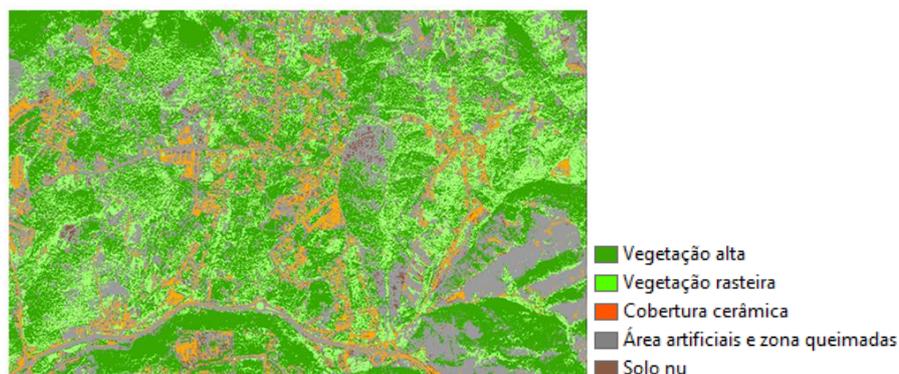
Figura 16: Histogramas das amostras utilizadas na classificação.



**Figura 17:** *Scatterplots* das amostras utilizadas na classificação.

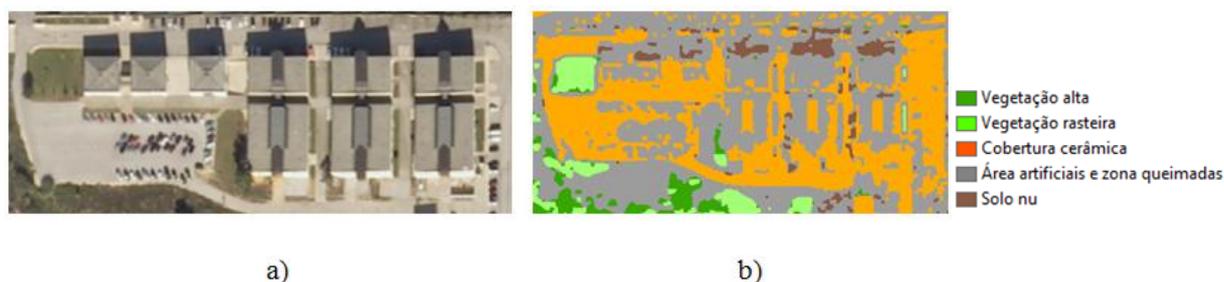
Analisando a Figura 16 e a Figura 17 observamos que existem alguns valores coincidentes nas amostras escolhidas. O ideal seria obter amostras distintas sem valores próximos ou coincidentes, os pontos da mesma amostra deveriam formar um único conjunto, não havendo pontos espalhados no *scatterplot* e não se deveriam verificar múltiplos picos nos histogramas, tendo uma amostra um único pico. Apesar de se terem definido amostras pequenas com elevado grau de representatividade é muito complicado encontrar todas estas condições, procurando-se encontrar a melhor relação para o nosso estudo. Os resultados representados nestas figuras são os melhores de entre um grande número de testes efetuados, logo são aceitáveis para o desenvolvimento do trabalho, visto não ser um dos objetivos deste trabalho a classificação imagens.

Definidas as amostras, o resultado obtido de seguida foi a classificação resultante da aplicação da ferramenta 1. Este encontra-se demonstrado na Figura 18.



**Figura 18:** Classificação resultante da ferramenta 1.

A Figura 19 ilustra alguns dos problemas identificados.



**Figura 19: Imagem original (a); imagem classificada com erros de classificação (b).**

Ao analisarmos as Figuras 19 a) e b) reparamos que a classificação efetuada com a ferramenta 1 contém falhas que, como já foi referido, se devem à ineficácia da classificação. Para minimizar estas falhas criou-se a ferramenta 2 e com essa obtiveram-se algumas melhorias, como podemos observar de seguida:



**Figura 20: Resultado da reclassificação efetuada pela ferramenta 2.**

Ao efetuarmos uma comparação visual entre a Figura 19 e a Figura 20 verificamos a existência de melhorias na identificação da classe dos edifícios, embora também sejam visíveis falhas de classificação, como identificamos ao analisar a Figura 19 a), onde verificamos que solo alcatroado e carros aí estacionados se encontram representados como edifícios. Estas falhas são difíceis de evitar com os dados disponibilizados.

Como a classificação de obstáculos e de imagens não era o objetivo principal deste trabalho, consideraram-se os dados anteriores como suficientes para a elaboração deste, mas reconhece-se que uma melhoria nestes dados resultaria numa melhoria nos resultados finais, principalmente se a classificação por classes fosse mais abrangente e, por exemplo, uma zona rural fosse identificada como o conjunto de zonas ao nível do terreno e edifícios presentes. Isto, porque em alguns modelos é necessário calcular a distância percorrida dentro de uma classe da classificação, tornando-se muito difícil para o programa efetuar esse cálculo devido à constante variação das classes.

Os restantes resultados desta fase são classes de características (*features class*) que contêm as informações extraídas dos modelos digitais (MDS e DSMn) e que permitem efetuar os cálculos da segunda fase. Estes resultados são coordenadas, alturas, distâncias, classificação de cobertura do solo, entre outros, que são organizados para cada uma das classes de características em formato de tabela como a demonstrada na Figura 21.

MS						
	OBJECTID *	Shape *	POINT X	POINT Y	Z	zonal MS
▶	1	Point	-24499.1604	61921.6873	49.770421	3
	2	Point	-24896.8083	63240.4692	75.612216	3
	3	Point	-24156.8811	63713.6199	109.324607	1
	4	Point	-23140.1104	63552.5473	137.918036	4
	5	Point	-22616.6244	62852.8882	141.952999	1

**Figura 21: Exemplo da organização das tabelas resultantes do processamento da primeira fase de implementação.**

Cada uma das classes de características obtidas contém uma tabela deste género com toda a informação processada, sendo esta a forma de os dados serem demonstrados ao utilizador pelo ArcGIS. No final desta fase obtivemos várias classes de características que contêm os dados necessários para a próxima fase, estas são:

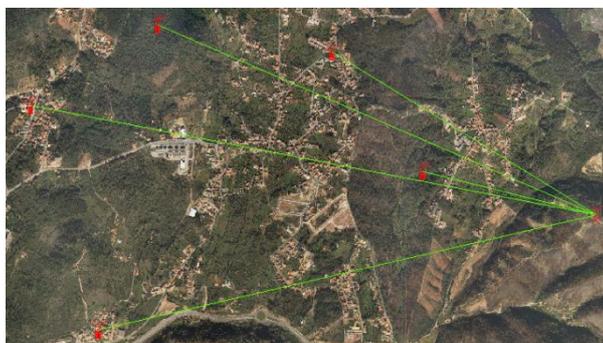
**Tabela 4: Classes de características obtidas no final da primeira fase de implementação.**

Classe de características	Tipo	Dados contidos
Estação base	Ponto	Coordenadas XY Altura
Estação móvel	Ponto	Coordenadas XY Altura Tipo de classificação da área envolvente
Linha entre estações	Polilinha	Coordenadas XY Altura Distância relativamente ao emissor Tipo de classificação da área envolvente
Área	Polígono	Comprimento do polígono Área do polígono
Pontos extraídos da área	Ponto	Coordenadas XY e altura para cada ponto Distância de cada ponto relativamente ao emissor Tipo de classificação da área envolvente aos pontos
Pontos obstrutores	Ponto	Altura Distância relativamente ao emissor

Estas classes são o resultado da aplicação das ferramentas descritas em 3.3. para os cenários de uma propagação 1x1, 1xN e Mx1, como podemos ver nas seguintes imagens:



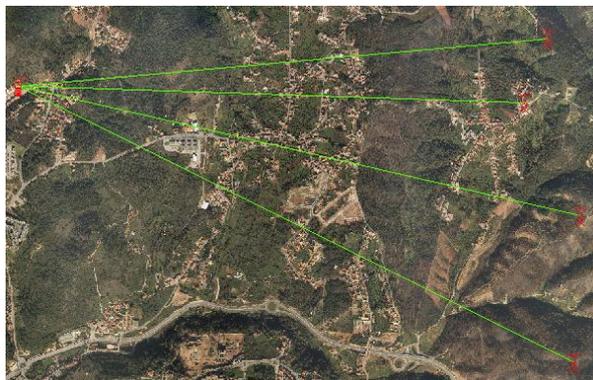
**Figura 22: Exemplo de um cenário 1x1 implementado neste trabalho.**



**Figura 23: Exemplo de um cenário 1xN implementado neste trabalho.**



**Figura 24: Exemplo de um cenário 1xN, onde N é uma área, implementado neste trabalho.**



**Figura 25: Exemplo de um cenário Mx1 implementado neste trabalho.**

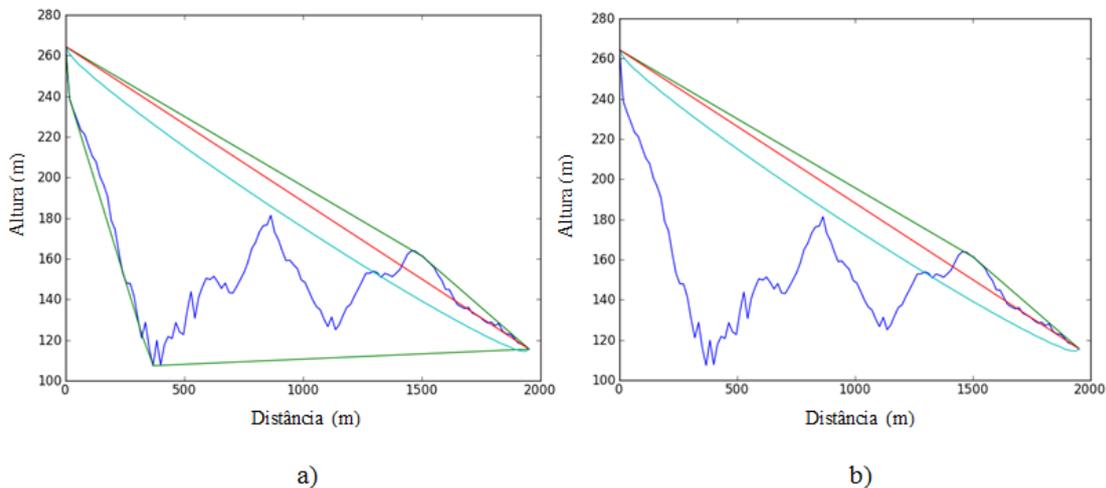
Estes cenários são o principal resultado do trabalho desenvolvido até ao momento, pois, quando se trabalha com informação SIG a extração dos dados pretendidos poder ser penosa e demorosa, sendo muitas vezes necessário procurar a melhor solução e configuração de ferramentas até se conseguir obter o resultado pretendido.

No Anexo D temos uma demonstração de mais alguns resultados obtidos nesta fase, através da aplicação das ferramentas desenvolvidas.

## 4.2. Resultados da segunda fase de implementação

Na segunda fase são implementados os modelos descritos anteriormente no capítulo 2.

Esta fase, independentemente da configuração escolhida, processa cada trajeto isoladamente, verificando se existem objetos obstrutores à propagação da onda. Se a propagação não for em espaço livre, como descrito no capítulo 3, é necessário efetuar algum pré-processamento aos dados resultantes da implementação do processo que calcula o *convex hull*, que contém a informação do menor conjunto convexo dos dados introduzidos. Este pré-processamento destina-se a conseguir extrair os pontos superiores do conjunto convexo, que são os pontos obstrutores da propagação. Na Figura 26 podemos observar os dados iniciais resultantes da ferramenta 8 e o resultado do pré-processamento descrito.



**Figura 26:** Gráfico do perfil em estudo e do menor conjunto convexo existente (a); gráfico do perfil e do trajeto com pontos obstrutores retirado do menor conjunto convexo (b).

Na Figura 26, a azul encontra-se representado o perfil de um dos trajetos em estudo. Em a) encontra-se representado a verde o menor conjunto convexo que foi calculado através do *convex hull* do perfil e em b) encontra-se o trajeto superior que foi extraído dos dados de a). A vermelho encontra-se representada a linha reta que une o emissor ao recetor e a azul a parte inferior do primeiro elipsoide de Fresnel.

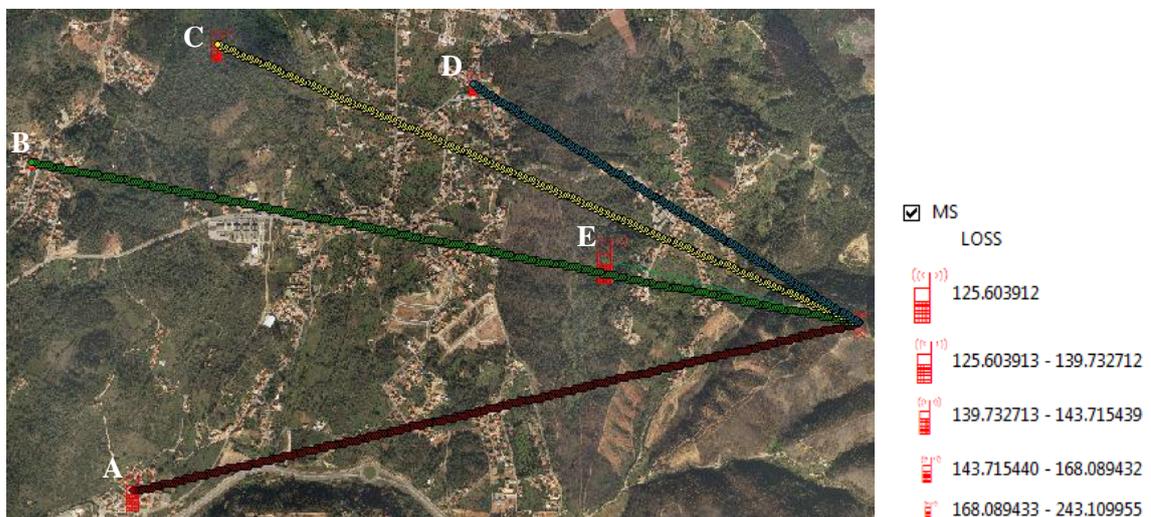
Independentemente da existência de obstrução são sempre calculadas as perdas de uma propagação em espaço livre através da equação (6). Então, no caso de um trajeto com  $f = 902.50$  MHz,  $G_b = 6.849$  dBd =  $6.849 + 2.15 = 8.949$  dBi,  $G_m = 3$  dBi e  $d = 2174.312$  m, as perdas calculadas com a ferramenta desenvolvida são de 83.982 dB enquanto que as perdas calculadas analiticamente são aproximadamente de 84.011 dB, esta diferença deve-se a aproximações efetuadas ao longo dos cálculos. Foram efetuados novos testes e compararam-se os resultados

obtidos com cálculos analíticos, mantendo-se um ligeira discrepância devida a algumas aproximações efetuadas nos valores.

Analicamente avaliaram-se os resultados obtidos para todos os modelos implementados, verificando-se semelhança entre os resultados, podendo-se concluir que, para os resultados extraídos na primeira fase, os modelos foram bem implementados.

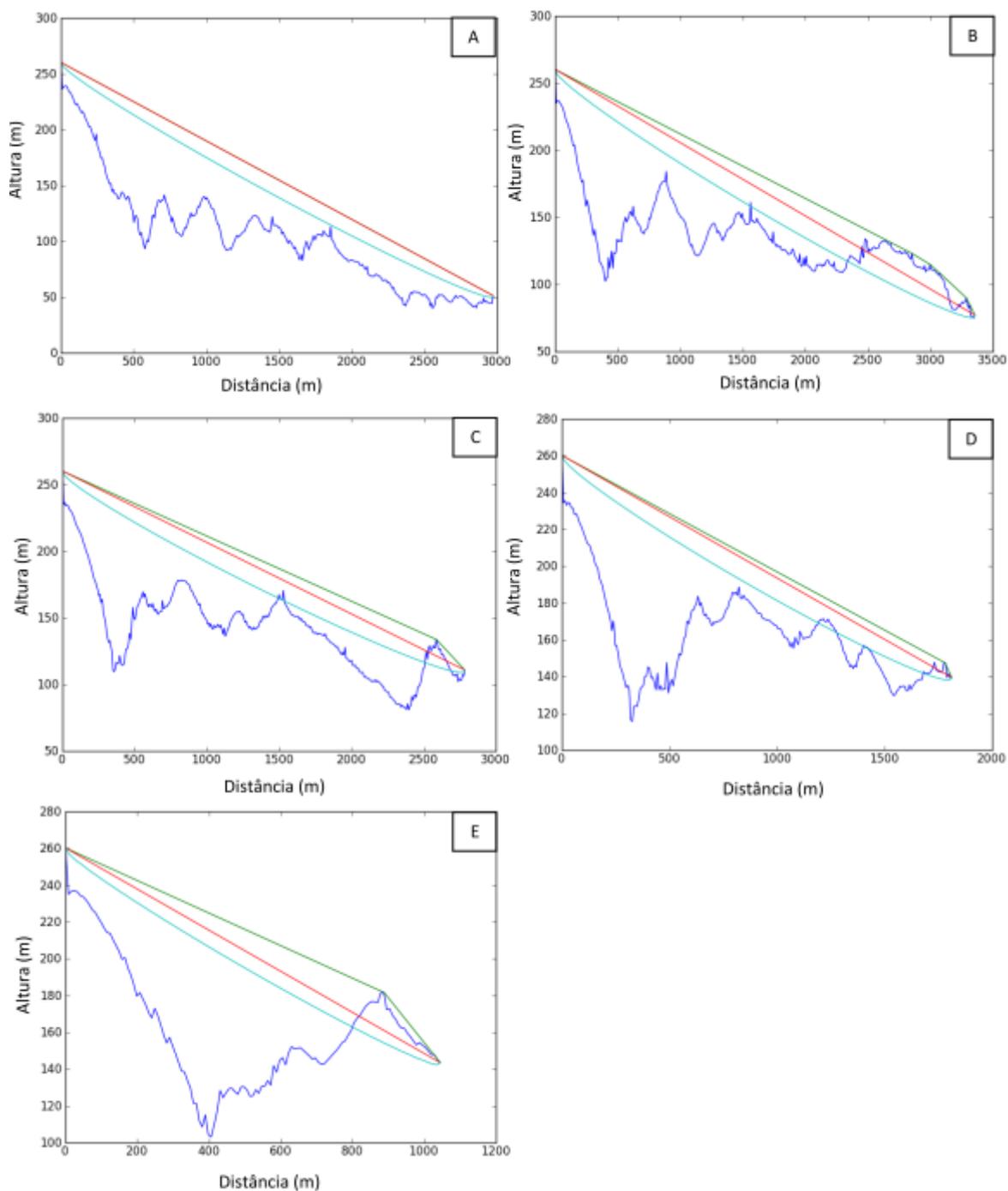
Os resultados obtidos por esta ferramenta necessitam de uma validação prática através de medições efetuadas no terreno em estudo, algo que não foi possível realizar neste estudo por falta de equipamento, deixando-se esta análise para futuros trabalhos.

Estes resultados são depois associados aos dados do ArcGIS e é mostrado ao utilizador o nível do sinal recebido, como podemos observar na seguinte figura:



**Figura 27: Exemplo de representação das perdas de uma configuração 1xN no ArcGIS.**

Como podemos verificar pela figura anterior, que quanto menor for a perda, maior será o ícone apresentado ao utilizador, ou seja melhor o nível de sinal na zona. Observamos ainda que são obtidos valores de perdas bastante elevados, que vamos analisar de seguida.



**Figura 28: Trajetos das propagações demonstradas na Figura 27.**

Analisando os trajetos representados na figura anterior observa-se que, apenas num dos trajetos não são encontradas obstruções à propagação. Na tabela seguinte tem-se informação referente aos trajetos anteriores.

**Tabela 5: Dados referentes aos trajetos da Figura 28.**

Trajeto	Perdas em espaço livre (dB)	Número de Obstruções	Perdas por difração (dB)	Tipo de obstrução no ponto	Perdas no ponto (dB)	Perdas totais (dB)
A	86.699	0	0	Rural	53.034	139.733
B	87.750	5	80.205	Rural	75.154	243.109
C	86.129	1	15.740	Florestal	41.851	143.720
D	82.398	1	11.553	Rural	74.138	168.089
E	77.613	1	25.931	Florestal	22.059	125.603

Dados obtidos para  $P_t = 15$ ,  $G_b = 9$ ,  $G_m = 3$  e  $f = 902.5$  MHz.

Analisando a tabela anterior vamos analisar os trajetos A, B e C que representam casos diferentes.

Analisando o trajeto A verifica-se que as perdas finais se devem a propagação em espaço livre e a propagação numa zona rural, pois não existe nenhuma obstrução à propagação entre o emissor e o recetor.

No trajeto B verifica-se desde logo que este contém 5 difrações no seu caminho que provocam grandes perdas na propagação. É possível identificar ainda que existe uma grande perda associada à zona envolvente do recetor, esta perda deve-se ao facto de a propagação percorrer mais do que 100 metros dentro de uma zona rural.

Por fim, no trajeto C identifica-se neste perdas referentes a propagação no interior de uma zona com vegetação. O sinal percorre 370 metros até chegar à estação móvel, encontrando-se esta distância no limite (400 m) em que se deve considerar uma propagação efetuada no interior de uma floresta para o modelo de Weissberger's. Para valores de distâncias de penetração na floresta superiores a 400 metros as perdas são consideradas demasiado elevadas, efetuando-se o cálculo do nível de sinal recebido através de outros modelos, que consideram a propagação da onda lateral, ou que modelam a floresta como um dielétrico e que de seguida efetuam o calculo das perdas, entre outros modelos, que como foi referido, requerem dados de que não se dispunha para a realização desta dissertação.

A análise anterior pode ser efetuada para as várias configurações disponíveis, desde 1x1, 1xN, 1xArea e Mx1. As perdas são associadas de forma diferente, paras as diferentes configurações, como podemos observar nas seguintes figuras.



**Figura 29: Exemplo de representação das perdas de uma configuração Mx1 no ArcGIS.**

No caso de uma configuração Mx1 as perdas encontram-se armazenadas na tabela das linhas. Se o utilizador pretender estudar as perdas, estas são graduadas por cor, como na Figura 29, e consegue-se perceber qual o melhor local para a colocação do emissor, de forma a minimizar as perdas de propagação.



**Figura 30: Exemplo de representação das perdas de uma configuração 1xArea no ArcGIS.**

Na Figura 30 encontra-se representado um exemplo de um estudo de 1xArea e de como os resultados podem ser apresentados ao utilizador.

Como os dados das perdas são adicionados às tabelas existentes no ArcGIS a representação gráfica da variação das perdas pode ser adaptada ao estilo do utilizador.

## 5. Conclusão

A necessidade de baixar os custos de implementação de pequenas redes rádio, através de um melhor planeamento, levou, na presente dissertação, ao desenvolvimento de uma ferramenta que permitisse a um utilizador de sistemas de informação geográficos, que tivesse a informação necessária, efetuar o estudo do nível de sinal rádio numa propagação em ambiente rural e florestal.

Foram desde logo identificadas algumas dificuldades na implementação deste projeto, que levaram a uma divisão deste em duas fases, começando-se por extrair dados com o auxílio do ArcGIS. Esta tarefa, apesar de inicialmente ser difícil, levou a um enriquecimento dos conhecimentos de Sistemas de Informação Geográfica, complementados com conhecimentos de ArcGIS e de Python, que permitiram obter os dados necessários para a implementação da segunda fase e dos modelos escolhidos.

Apesar das dificuldades encontradas pode-se afirmar que o objetivo principal do trabalho foi atingido, visto se ter conseguido, através dos dados extraídos no ArcGIS, obter valores para as perdas de trajeto praticamente idênticos aos valores analíticos esperados. Faltando validar a ferramenta com valores medidos no terreno, ficando essa análise como proposta para futuros estudos, por não se ter neste momento condições para esta.

Sabendo que tanto a tecnologia como a informação têm custos elevados, com a realização desta dissertação pode-se concluir que o desenvolvimento de uma ferramenta deste género é uma forte mais-valia para o estudo de todo o tipo de redes. Otimizando os modelos e a ferramenta desenvolvida, de forma a se conseguir efetuar o estudo recorrendo a dados com uma resolução espacial inferior, comparativamente com a resolução das figuras utilizadas, consegue-se desenvolver uma ferramenta à disposição de grande parte das instituições, otimizando também o custo desta, pois esse tipo de informação encontra-se na Internet de forma gratuita ou com custos reduzidos.

Como trabalhos futuros para otimizar a ferramenta desenvolvida, define-se a otimização da classificação utilizada e ainda, como foi referido no parágrafo anterior, a otimização dos modelos para dados com uma resolução espacial inferior à utilizada. Também se define para trabalhos futuros a implementação de outros modelos para o estudo das perdas de propagação e ainda a validação dos resultados através de medições no terreno.

Finalmente pode-se concluir que a versatilidade dos sistemas SIG, aliada a dados geográficos permite aos utilizadores ter uma ferramenta, que tanto pode permitir obter dados estatísticos sobre clientes, equipamentos, entre outros, como obter informação relativa a tráfegos, qualidade de sinal, etc.

## Anexo A

### Cálculo do Raio do Elipsoide de Fresnel

Este anexo baseia-se em [6].

No estudo da propagação entre dois pontos A e B, o espaço interveniente pode ser subdividido em famílias de elipsoides, conhecidos como elipsoides de Fresnel. Estes têm os seus pontos focais em A e em B, de tal forma que qualquer ponto M de um elipsoide satisfaz a seguinte relação:

$$AM + MB = AB + n \frac{\lambda}{2} \quad (32)$$

Onde  $n$  é o número que caracteriza o elipsoide, sendo que  $n=1$  corresponde ao primeiro elipsoide de Fresnel,  $\lambda$  corresponde à largura de banda.

Na prática uma propagação realiza-se em linha de vista (LOS), ou seja, sem qualquer tipo de fenómeno de difração se não encontrar obstáculos que obstruam mais do que 60% do raio do primeiro elipsoide de Fresnel ( $R_1$ ). Quando não se verifica a relação descrita estamos perante uma zona de difração.

Os raios dos elipsoides de Fresnel num determinado ponto entre o emissor e o recetor podem ser aproximados em unidades auto-consistentes da seguinte forma:

$$R_n = \left[ \frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2} \quad (33)$$

ou, em unidades práticas através de:

$$R_n = 550 \left[ \frac{nd_1 d_2}{(d_1 + d_2)f} \right]^{1/2} \quad (34)$$

Onde  $f$  é a frequência em MHz,  $d_1$  e  $d_2$  as distâncias em km entre recetor e emissor no ponto onde se está a calcular o raio do elipsoide em m.



## Anexo B

### Processo de modelação dos obstáculos em lâminas

Este anexo baseia-se em [6].

As obstruções encontradas entre uma estação base e uma estação móvel podem ser modeladas em lâminas semi-infinitas de topo semicircular como as demonstradas na Figura 31. O processo de obtenção dos parâmetros que definem estas lâminas é descrito neste anexo.

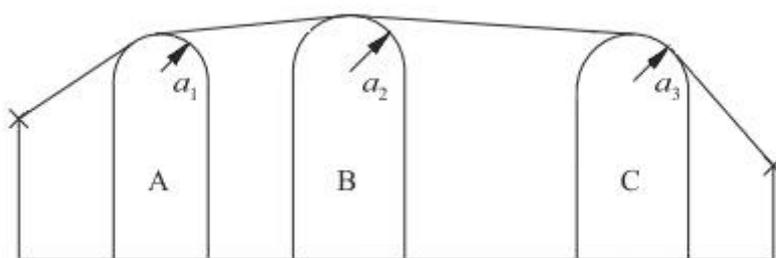


Figura 31: Exemplo de um trajeto dividido em lâminas [6].

Inicialmente, apesar de não ser usado diretamente como parâmetros para o cálculo das lâminas, começa-se por calcular o ângulo de difração no obstáculo  $\theta$ . Este pode ser obtido da seguinte forma:

$$\theta = \alpha_w + \alpha_z + \alpha_e \quad (35)$$

Onde  $\alpha_w$  e  $\alpha_z$  são as elevações angulares para os pontos  $x$  e  $y$  acima da linha do horizonte vistas de  $w$  e  $z$ , respetivamente.  $\alpha_e$  é o ângulo subtendido pela distância entre  $w$  e  $z$  ( $d_{wz}$ ), sendo  $w, x, v, y$  e  $z$  os pontos da Figura 3. Podemos obter as elevações anteriores da seguinte forma:

$$\alpha_w = \frac{(h_x - h_w)}{d_{wx}} - \frac{d_{wx}}{2a_e} \quad (36)$$

$$\alpha_z = \frac{(h_y - h_z)}{d_{yz}} - \frac{d_{yz}}{2a_e} \quad (37)$$

$$\alpha_e = \frac{d_{wz}}{a_e} \quad (38)$$

A distância  $d_{wx}$  é a distância entre o ponto  $w$  e  $x$ ,  $d_{yz}$  é a distância entre o ponto  $y$  e  $z$  e  $a_e$  é o raio efetivo da Terra em km que pode ser calculado da seguinte forma:

$$a_e = k \times 6371 \quad (km) \quad (39)$$

$$k = \frac{1}{1 + a \left( \frac{dn}{dh} \right)} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (40)$$

Onde  $k$  é o fator efetivo do raio da Terra, que pode ser calculado por intermédio da lei de Snell em geometria esférica e simplificado como verificámos anteriormente, ficando dependente do cálculo do gradiente de refratividade vertical  $\Delta N$ , que varia de local para local. O raio efetivo da Terra,  $a_e$ , nesta dissertação foi definido com o valor generalizado de 8500 km por falta de dados.

A distância entre o ponto  $w$  e o vértice  $v$  é calculada de acordo com o tipo de obstrução, sendo por isso necessário definir dois tipos de obstruções, as uni-ponto e as multiponto. Uma obstrução uni-ponto é uma obstrução que é apenas representada através de um ponto obstrutor, sendo uma obstrução multiponto uma obstrução representada por mais do que um ponto obstrutor, um exemplo duma obstrução deste género é a da Figura 3. Depois de se definir os tipos de obstruções podemos calcular  $d_{wv}$  através da seguinte forma:

Uni-ponto:

$$d_{wv} = d_{wx} \quad (41)$$

Multiponto:

$$\begin{cases} d_{wv} = \frac{\left[ \left( \frac{\alpha_z + \alpha_e}{2} \right) d_{wz} + h_z - h_w \right]}{\theta} & ; \quad \theta \times a_e \geq d_{xy} \\ d_{wv} = \frac{(d_{wx} + d_{wy})}{2} & ; \quad \theta \times a_e < d_{xy} \end{cases} \quad (42)$$

A distância entre o ponto  $z$  e o vértice  $v$ , é nos dada através de:

$$d_{vz} = d_{wz} - d_{wv} \quad (43)$$

Sabendo as distâncias entre pontos, as alturas e as elevações angulares podemos agora calcular a altura acima do nível do mar no vértice  $v$  ( $h_v$ ), dependendo esta também do tipo de obstrução encontrado, tendo então:

Uni-ponto:

$$h_v = h_x \quad (44)$$

Multiponto:

$$h_v = \frac{d_{wv}\alpha_w + h_w + d_{wv}^2}{2a_e} \quad (45)$$

Definidos os parâmetros necessários, vamos agora calcular os parâmetros das lâminas utilizando os valores encontrados anteriormente. Na Figura 32 temos alguns exemplos dos tipos de valores que vamos definir:

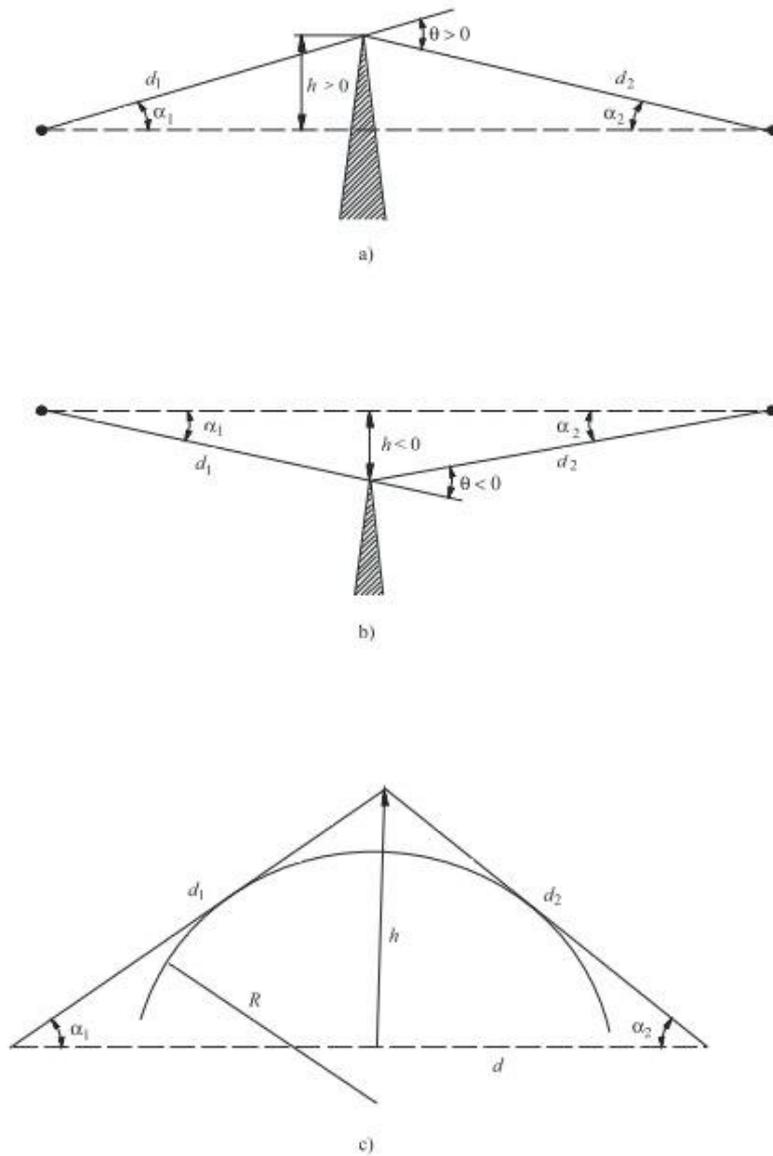


Figura 32: Representações geométricas de difrações [6].

Na imagem anterior temos:

$h$ : altura do topo do obstáculo acima das expansões das linhas retas que definem as duas pontas do caminho;

$d_1$ : distância do caminho em linha reta entre o ponto  $w$  e o topo do vértice  $v$ ;

$d_2$ : distância do caminho em linha reta entre o ponto  $z$  e o topo do vértice  $v$ ;

$d$ : distância do caminho horizontal entre  $w$  e  $z$ ;

$\Theta$ : ângulo de difração em radianos (rad);

$\alpha_1$  e  $\alpha_2$ : ângulo da linha entre uma ponta do trajeto e o topo do obstáculo.  $\alpha_1$  corresponde ao trajeto entre  $w$  e  $v$  e  $\alpha_2$  ao trajeto entre  $z$  e  $v$ .

$R$ : raio do topo semicircular da lâmina semi-infinita

A altura  $h$  pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$h = h_v + \frac{d_{wv}d_{vz}}{2a_e} - \frac{h_w d_{vz} + h_z d_{wv}}{d_{wz}} \quad (46)$$

As distâncias  $d_1$  e  $d_2$  retiram-se através da informação existente do terreno e de um cálculo trigonométrico.

Faltando apenas calcular o raio da lâmina  $R$ . Para este cálculo precisamos de definir mais alguns valores, por isso vamos definir mais duas amostras do perfil, que nos são dadas através de:

$$p = x - 1 \quad (47)$$

$$q = y + 1 \quad (48)$$

O raio da lâmina é calculado como a diferença de declive entre a secção de perfil definida por  $p-x$  e a definida por  $y-q$ , tendo em conta a curvatura da Terra e divididas pela distância entre  $p$  e  $q$ . É então necessário calcular as distâncias entre pontos do perfil, por isso:

$$d_{px} = d_x - d_p \quad (49)$$

$$d_{yq} = d_q - d_y \quad (50)$$

$$d_{pq} = d_q - d_p \quad (51)$$

A diferença de declive entre a secção de perfil definida por  $p-x$  e a definida por  $y-q$ , que podemos representar através da letra  $t$ , é obtida através da seguinte expressão:

$$t = \frac{h_x - h_p}{d_{px}} + \frac{h_y - h_q}{d_{yq}} - \frac{d_{pq}}{a_e} \quad (52)$$

Onde  $a_e$  é o raio efetivo da Terra definido anteriormente.

Finalmente podemos calcular o raio da lâmina através de:

$$R = \frac{d_{pq}}{t} \times [1 - e^{-4v}]^3 \quad (53)$$



## Anexo C

### Estrutura do ficheiro de texto auxiliar

Toda a informação necessária para a implementação prática foi gravada num ficheiro de texto auxiliar ao longo desta e este tem a seguinte organização:

**Tabela 6: Constituição do ficheiro de texto auxiliar ao programa.**

<b>Índice</b>	<b>Dados guardados</b>
0	Caminho onde o utilizador pretende guardar o espaço de trabalho
1	Nome dado à base de dados geográficos
2	Nome definido pelo utilizador para o emissor
3	Nome definido pelo utilizador para o recetor
4	Nome definido para a linha entre antenas
5	Nome definido pelo utilizador para a área de estudo
6	Número de emissores
7	Número de recetores
8	Número de caminhos entre antenas definidas como pontos
9	Nome da MDS utilizada
10	Nome da DSMn utilizada
11	Nome do ficheiro de classificação utilizado
12	Orientação em graus do emissor relativamente ao eixo XY definida pelo utilizador
13	Potência transmitida pelo emissor, que foi definida pelo utilizador
14	Ganho do recetor, definido pelo utilizador
15	Nome da tabela de pontos que definem linha entre emissor e recetor para o caso de antenas definidas como pontos
16	Nome da tabela de pontos que definem a linha entre emissor e recetor para o caso de um recetor definido como uma área
17	Número de caminhos entre emissor e recetor para o caso de um recetor definido como uma área
18	Nome do ficheiro que define o emissor
19	Nome do ficheiro que define o recetor
20	Nome da tabela de pontos ordenados que definem a linha entre emissor e recetor para o caso de antenas definidas como pontos
21	Nome da tabela de pontos ordenados que definem a linha entre emissor e recetor para o caso de um recetor definido como uma área

22	Nome do ficheiro que contém a linha a ser utilizada para o cálculo do <i>convex hull</i> entre antenas definidas como pontos
23	Nome do ficheiro que contém a linha a ser utilizada para o cálculo do <i>convex hull</i> entre emissor e recetor para o caso de um recetor definido como uma área
24	Altura do emissor
25	Altura do recetor
26	Nome do ficheiro que contém o resultado do <i>convex hull</i> entre antenas definidas por pontos.
27	Nome do ficheiro que contém o resultado do <i>convex hull</i> entre emissor e recetor para o caso de um recetor definido como uma área

## Anexo D

### Informação adicional relativamente ao capítulo 3

#### Resultado da aplicação da ferramenta 4:

Na ferramenta 4 são adicionadas informações relativas às coordenadas XYZ, criando-se ou convertendo-se as linhas definidas na ferramenta anterior em pontos, como descrito em 3.3.

Nas seguintes figuras encontra-se uma demonstração da apresentação dos dados ao utilizador.

BS					
OBJECTID*	Shape*	POINT X	POINT Y	Z	Z
1	Point	-21599.8537	62596.1788	235.250369	0.118453

MS						
OBJECTID*	Shape*	POINT X	POINT Y	Z	Z	zonal MS
1	Point	-24499.1604	61921.6873	49.770421	6.401121	3
2	Point	-24896.8083	63240.4692	75.612216	0	3
3	Point	-24156.8811	63713.6199	109.324607	0	1
4	Point	-23140.1104	63552.5473	137.918036	0	4
5	Point	-22616.6244	62852.8882	141.952999	0	1

Figura 33: Exemplos dos dados extraídos com o auxílio da ferramenta 4.

Através da figura anterior observa-se o tipo de dados utilizados e extraídos com o auxílio da ferramenta 4, identificando-se as coordenadas X e Y, as alturas Z retiradas da DSM e as retiradas da DSMn que são o segundo Z, para uma estação base e para múltiplas estações móveis.

#### Resultado da aplicação da ferramenta 5:

Nesta ferramenta é modelado o caminho entre a estação base e a estação móvel, convertendo-se as linhas em pontos ou, no caso de o destino ser uma área, criando-se as linhas entre estações que são de seguida convertidas em pontos.



Figura 34: Exemplo da conversão das linhas em pontos com o auxílio da ferramenta 5.

Na figura anterior encontra-se representado o resultado da aplicação da ferramenta 5 às linhas definidas anteriormente e que agora se encontram representadas em pontos. De seguida temos uma demonstração do tipo de dados resultantes da aplicação desta ferramenta e ordenados pela ferramenta 6.

OBJECTID *	Shape *	pointid	grid_code	RASTERVALU	POINT X	POINT Y	Z	Z
1	Point	3	1	1	-21599.8537	62596.1788	235.250369	0.060719
2	Point	2	1	1	-21614.1604	62596.6873	236.682861	0.074519
3	Point	1	1	1	-21624.1604	62596.6873	237.749531	0
4	Point	8	1	1	-21624.1604	62586.6873	239.337281	0
5	Point	7	1	1	-21634.1604	62586.6873	239.339206	0
6	Point	6	1	1	-21644.1604	62586.6873	238.600115	0.278797
7	Point	5	1	1	-21654.1604	62586.6873	235.513781	0
8	Point	4	1	1	-21664.1604	62586.6873	233.606563	0.139541
9	Point	13	1	1	-21664.1604	62576.6873	233.185215	0.139925
10	Point	12	1	1	-21674.1604	62576.6873	230.484011	0
11	Point	11	1	1	-21684.1604	62576.6873	228.080662	0
12	Point	10	1	1	-21694.1604	62576.6873	225.019684	0
13	Point	9	1	1	-21704.1604	62576.6873	222.502656	0.118076
14	Point	18	1	1	-21704.1604	62566.6873	223.605653	0
15	Point	17	1	1	-21714.1604	62566.6873	221.918058	0
16	Point	16	1	1	-21724.1604	62566.6873	219.552001	0.112712
17	Point	15	1	1	-21734.1604	62566.6873	217.12129	0
18	Point	14	1	1	-21744.1604	62566.6873	215.244184	0
19	Point	24	1	1	-21744.1604	62556.6873	216.359031	0.209315
20	Point	23	1	1	-21754.1604	62556.6873	213.772605	0
21	Point	22	1	1	-21764.1604	62556.6873	210.628538	0
22	Point	21	1	1	-21774.1604	62556.6873	208.138975	0
23	Point	20	1	1	-21784.1604	62556.6873	205.761466	0
24	Point	19	1	1	-21794.1604	62556.6873	202.806929	0.224959
25	Point	29	1	1	-21794.1604	62546.6873	203.019243	0.192352
26	Point	28	1	1	-21804.1604	62546.6873	199.351848	0
27	Point	27	1	1	-21814.1604	62546.6873	196.344075	0.116302
28	Point	26	1	1	-21824.1604	62546.6873	193.31008	0
29	Point	25	1	1	-21834.1604	62546.6873	190.403942	0.492847
30	Point	34	1	1	-21834.1604	62536.6873	196.150471	4.674078
31	Point	33	1	1	-21844.1604	62536.6873	185.674128	0.061846
32	Point	32	1	1	-21854.1604	62536.6873	182.542785	0.139541
33	Point	31	1	1	-21864.1604	62536.6873	179.213843	0.913077
34	Point	30	1	1	-21874.1604	62536.6873	174.506949	0.030923
35	Point	40	1	1	-21874.1604	62526.6873	174.713264	0.389888
36	Point	39	1	1	-21884.1604	62526.6873	169.433213	0.331792
37	Point	38	1	1	-21894.1604	62526.6873	167.236961	1.905547
38	Point	37	1	1	-21904.1604	62526.6873	160.721086	0.532824
39	Point	36	1	1	-21914.1604	62526.6873	156.847803	0.107149
40	Point	35	1	1	-21924.1604	62526.6873	154.676461	0.115562

Figura 35: Exemplos dos dados extraídos com o auxílio da ferramenta 5 e ordenados pela ferramenta 6.

### Resultado da aplicação da ferramenta 8:

Na ferramenta 8 são calculados os pontos obstrutores, através do cálculo do *convex hull* do trajeto, obtendo-se os dados da seguinte figura:

OBJECTID *	Shape *	ORIG FID	POINT X	POINT Y
1	Point	1	2550.9979	39.9961
2	Point	1	2366.6179	42.2001
3	Point	1	578.9733	93.3576
4	Point	1	353.3638	144.6364
5	Point	1	14.3157	236.6829
6	Point	1	0	260.2504
7	Point	1	2972.7691	51.2704
8	Point	1	2960.987	44.5966
9	Point	1	2849.3187	40.4365
10	Point	1	2550.9979	39.9961

Figura 36: Exemplo dos dados obtidos com a ferramenta 8.

Analisando os dados anteriores pode-se afirmar que não existe nenhuma obstrução na parte superior do conjunto convexo, pois entre a estação base  $POINT\_X = 0$  e a estação móvel  $POINT\_X = 2972.7691$  não temos nenhum ponto obstrutor, sendo os outros pontos referentes à componente inferior do conjunto convexo, logo não existe nenhuma obstrução à propagação.



# Bibliografia

- [1] Jochen Schiller, *Mobile Communications*, 2nd ed. Inglaterra: Addison-Wesley, 2003.
- [2] esri. (2012) What is GIS? [Online]. [http://www.esri.com/what-is-gis/overview.html#overview\\_panel](http://www.esri.com/what-is-gis/overview.html#overview_panel)
- [3] ESRI, What is ArcGIS?, 2002.
- [4] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*, 2nd ed. Texas, Estados Unidos da América: Prentice Hall, 2002.
- [5] Ke-Lin Du e M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems, From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*, 1st ed. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 2010.
- [6] "Propagation by diffraction," International Telecommunication Union, Geneva, Recommendation ITU-R P.526-12, 2012.
- [7] F. Pérez Fontán e P. Mariño Espiñeira, *Modeling the Wireless Propagation Channel*, 1st ed. Vigo, Espanha: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [8] Andreas F. Molisch, *Wireless Communication*, 2nd ed. California, Estados Unidos da América: Wiley, 2011.
- [9] Mark A. Weissberger, "An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees," Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, 82 08 18 023, 1982.
- [10] Y. S. Meng, Y. H. Lee, e B. C. Ng, "Study of propagation loss prediction in forest environment," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 17, pp. 117-133, 2009.
- [11] Secção de Sistemas de Telecomunicações, "Propagação II - Modelos de Propagação para Comunicações Móveis," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações e de Computadores, Lisboa,.
- [12] H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Maciel, e H. H. Xia, "UHF propagation prediction for wireless personal," *Proceedings of IEEE*, vol. 82, pp. 1333-1359, Setembro 1994.
- [13] William C. Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, 2nd ed. Ohio, Estados Unidos da América: McGraw-Hill Professional, 1995.
- [14] Sylvain Ranvier, "Path loss models - Physical layer methods in wireless," SMARAD Centre of Excellence, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Helsínquia, 2004.
- [15] Mian Shahzad Iqbal, "Raio Propagation - Propagation Ways, Models and Path Loss

Calculation," University of engineering and technology from Taxila, Taxila,.

- [16] Li Quing, "GIS Aided Radio Wave Propagation Modeling and Analysis," Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, Tese de Mestrado 2005.
- [17] Grupo Virtuoso. (2012) Só física. [Online].  
<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/principiodehuygens.php>
- [18] Christiaan Huygens, *Traité de la Lumiere*. Leyden, 1690.
- [19] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services.," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 29, pp. 317-325, 1980.
- [20] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, e K. Fukuda, "Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service.," *Review of the Electrical Communication*, vol. 16, pp. 825-873, Setembro-Outubro 1968.
- [21] M. Badsberg, J. Bach Andersen, e P. Mogensen, "Exploitation of the Terrain Profile in the Hata Model," 1995.
- [22] Instituto Geográfico Português (IGP). (2012, Setembro) [Online].  
[http://www.igeo.pt/produtos/Geodesia/inf\\_tecnica/sistemas\\_referencia/Datum\\_73.htm](http://www.igeo.pt/produtos/Geodesia/inf_tecnica/sistemas_referencia/Datum_73.htm)