

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UMA NOVA ABORDAGEM DA RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1546 PARA A
PREDIÇÃO DE COBERTURA EM ENLACES CURTOS SOBRE TERRENOS MISTOS

Marco Antônio de Souza Mayrink

1 de Novembro de 2005



GAPTEM – Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética

**Departamento de Engenharia Eletrônica
Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas Gerais**

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Uma Nova Abordagem da Recomendação ITU-R P.1546 para a Predição de Cobertura em Enlaces Curtos sobre Terrenos Mistos

Marco Antônio de Souza Mayrink

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Fernando José da Silva Moreira

Co-orientador: Cássio Gonçalves Rego

Belo Horizonte, novembro de 2005

"Prediction is very difficult, especially about the future."
(Niels Bohr 1885 - 1962)

"O aprendizado é do ser, o conhecimento é apenas da memória, da mente."
(George Ivanovitch Gurdjieff 1866-1949)

Agradecimentos

Expresso a minha gratidão a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para esta conquista.

Aos meus pais e às minhas irmãs pelo carinho e apoio.

À Franciane pelo amor, paciência e força nos momentos difíceis.

Ao Professor Fernando, pela imensa ajuda, companheirismo, paciência e confiança.

Ao Professor Cássio, pelas valiosas conversas e dicas.

Ao Chiquinho, pelo grande auxílio com a linguagem C++.

Ao Mateus, pela ajuda com o tratamento das medições em Belo Horizonte.

Ao Luciano, pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

À turma da banda, Leo, Felipe, Luis, Raíssa, Dandan, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo.

Ao Professor Silva Mello - PUC-RJ, pelo auxílio nas dúvidas sobre a ITU-R P.1546.

Aos companheiros da UnB, especialmente ao amigo Elmo, Professor Paulo Carvalho, Professor Antônio Martins, pelos resultados das medições em Brasília e ajuda no desenvolvimento do CoP.

À Dra. Margaret Lübs, pela gentileza no fornecimento da documentação sobre o modelo de propagação do ITS - *Institute for Telecommunication Sciences*.

Ao Dr. Roland Beutler, pela ajuda na implementação computacional da ITU-R P.1546.

À MOTOROLA, pelo apoio financeiro.

A Deus.

Resumo

A *International Telecommunication Union* - ITU tem na Recomendação ITU-R P.1546 um método de predição ponto-multi-ponto para serviços terrestres na faixa de frequência de 30 MHz a 3000 MHz. Essa recomendação foi proposta para cobrir conhecidas limitações associadas a faixas de distâncias e frequências, na tentativa de combinar vários métodos de predição de cobertura existentes em apenas um.

No presente trabalho, motivados por uma conhecida deficiência da recomendação na predição de cobertura para percursos mistos com visada direta, sugerimos em caráter inovador um melhoramento da recomendação no que diz respeito ao tratamento destes percursos, baseado na intersecção do primeiro elipsóide de Fresnel com o perfil do relevo.

Foi desenvolvido um *software* para a simulação dos modelos e, através deste, alguns resultados preliminares (medidos e teóricos) realizados nas cidades de Belo Horizonte-MG e Brasília-DF são também apresentados e discutidos. No caso de Belo Horizonte, o modelo proposto foi capaz de predizer com boa exatidão a intensidade de campo medido, apresentando uma melhoria de aproximadamente 15 dB em relação aos outros métodos de predição considerados na análise, resultando num erro médio (MVE) de $-1,40$ dB com desvio-padrão (STD) de $2,26$ dB, enquanto outros métodos apresentaram erros muito maiores. No caso de Brasília, o MVE das medições em comparação com o sinal predito pela nova abordagem foi de $0,15$ dB, com STD de $6,15$ dB. Para o modelo ITU-R P.1546 original, o MVE foi igual a $-6,49$ dB, com STD de $6,36$ dB.

Abstract

The International Telecommunication Union has in the Recommendation ITU-R P.1546 a method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. That recommendation was proposed to mitigate known limitations associated to distances and frequencies range, combining several existent methods in one.

In the present work, motivated by an acquainted deficiency of the recommendation in the covering prediction for short mixed-paths with a clear line-of-sight, we suggest an improvement of the recommendation in what concerns the treatment of these paths, based on the intersection of the first Fresnel's ellipsoid and terrain profile.

A software was developed for the simulation of the models and some preliminary results (measured and theoretical) accomplished in the cities of Belo Horizonte-MG and Brasilia-DF are presented and discussed. In the study case of Belo Horizonte, the new model presented a good prediction of the measured power, with an improvement of approximately 15 dB when compared to the other methods in the analysis, with an mean value error (MVE) of 1.44 dB and standard deviation (STD) of 2.26 dB, while other methods had presented bigger errors. In the study case of Brasilia, the MVE was 0.15 dB, with a STD of 6.15 dB, while for the original ITU-R P.1546, the MVE was 6.49 dB, with a STD of 6.36 dB.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos e Metodologia	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 A Recomendação ITU-R P.1546	5
2.1 Introdução	5
2.2 Medidas em Base Tabular	6
2.3 Índice de Refração da Atmosfera	8
2.4 Variabilidade Local	9
2.5 Variabilidade Temporal	12
2.6 Determinação da Altura Efetiva da Antena Transmissora	14
2.6.1 Enlaces Inferiores a 15 km sobre Terra	15
2.6.2 Enlaces Superiores a 15 km sobre Terra	18
2.6.3 Enlaces sobre Água	18
2.7 Correção de Ângulo de Visada do Terreno	19

2.8	Correção para Altura da Antena Receptora	21
2.9	Correção Urbano-Suburbano para Percursos Curtos	25
2.10	Correção para Terrenos Mistos	26
2.11	Perda Correspondente	31
2.12	Outras Correções da ITU-R P.1546	33
2.13	Caso de Estudo	33
3	Uma Nova Abordagem para o Tratamento de Enlaces sobre Terrenos Mistos	37
3.1	Percursos sobre Terrenos Mistos	38
3.2	Uma nova formulação para o tratamento de terrenos mistos	38
3.3	Caso de Estudo	42
4	<i>Software</i> para Predição de Cobertura e Estudo de Caso em Brasília	46
4.1	<i>Software - Coverage Predictor - CoP</i>	46
4.2	Caso de Estudo	50
5	Conclusões	59
5.1	Propostas de Continuidade	60
	Referências Bibliográficas	64

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de uma curva de propagação: Figura 9 do Anexo 3 da Recomendação ITU-R P.1546.	7
2.2	Valores de dN para 1% do tempo.	9
2.3	Comparação entre os ábacos da ITU-R P.1546 com e sem a correção baseada no índice de refração para a costa oeste da África.	10
2.4	Função cumulativa complementar inversa normal de probabilidade.	12
2.5	Determinação de h_1 para enlaces inferiores a 15 km e com uma descrição detalhada do relevo.	15
2.6	Determinação de h_1 para percursos inferiores a 15 km e sem uma descrição detalhada do relevo do enlace.	16
2.7	Determinação de h_1 para percursos superiores a 15 km e sem uma descrição detalhada do relevo do enlace.	17
2.8	Determinação de h_1 para percursos sobre a água.	17
2.9	Ângulo θ (a) positivo e (b) negativo utilizados na obtenção de θ_{tca}	20
2.10	Ângulo de correção para a curvatura da Terra (θ_r).	20
2.11	Correção (δE_{tca}) em função do ângulo de visada do terreno (θ_{tca}).	21
2.12	Exemplo de $R' \neq h_2$, resultando em uma correção (δE_{h_2}) não-nula.	23
2.13	Exemplo de $R' = h_2$, resultando em uma correção (δE_{h_2}) nula.	23
2.14	Fluxograma da correção δE_{h_2}	24
2.15	Correção Percursos Curtos em Terrenos Planos.	26
2.16	Situações fisicamente diferentes que recebem o mesmo tratamento matemático pela Recomendação ITU-R P.1546.	27

2.17	Fator Básico de Interpolação A_0	28
2.18	Exemplificação de percurso sobre terreno misto.	29
2.19	Mapa de localização.	34
2.20	Comparação entre medidas, ITU-R P.1546 original aplicada para Enlaces somente sobre a terra e enlaces sobre caminhos mistos e modelo de Okumura-Hata.	35
3.1	Geometria de análise de percursos mistos.	39
3.2	Comparação entre Okumura-Hata, medições, ITU-R P.1546 original aplicada para Enlaces somente sobre a terra, ITU-R P.1546 original aplicada para enlaces sobre caminhos mistos e a ITU-R P.1546 com a nova abordagem proposta.	43
3.3	Comparação das Atenuações da ITU-R P.1546 Original para caminhos mistos e da Atenuação da Nova Abordagem x Atenuação Medida.	44
3.4	Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo predito pela ITU-R P.1546 original.	45
3.5	Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo predito pela Nova abordagem.	45
4.1	Tela principal do CoP mostrando o relevo digitalizado da cidade de Brasília-DF e janela auxiliar de visualização do perfil de relevo em corte.	47
4.2	Modelos de predição disponíveis para simulação.	49
4.3	Variáveis de entrada.	49
4.4	Exemplo de diagrama de radiação.	49
4.5	Exemplo de predição de cobertura.	50
4.6	Análise estatística das medidas e distância entre o transmissor e receptor no decorrer do percurso de medição.	51
4.7	Comparação entre medidas e um modelo de propagação.	51
4.8	Mapa de localização às margens do lago Paranoá.	52
4.9	Comparação entre medidas, ITU-R P.1546 com caminho misto original, ITU-R P.1546 com enlace puramente sobre a terra, ITU-R P.1546 com a a nova abordagem proposta e modelo de Hata	55

4.10	Diferença entre a ITU-R P.1546 original e as medidas de intensidade de campo.	56
4.11	Diferença entre a ITU-R P.1546 modificada e as medidas de intensidade de campo.	56
4.12	Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo predito pela ITU-R P.1546 original.	57
4.13	Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo predito pela Nova abordagem.	57

Lista de Tabelas

II.I	Valores típicos de desvio-padrão (σ) para algumas situações.	11
IV.I	Valor médio ($\bar{\epsilon}$) e desvio-padrão (σ) do erro entre medições e o modelo de propagação.	54

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

Num contexto global, é impossível imaginar o mundo de hoje sem a utilização dos sistemas de comunicação sem fio. Sistemas de comunicação móvel de dados, serviços de comunicação pessoal (PCS), sistemas de TV e rádio digitais e a terceira geração de telefonia móvel são exemplos de aplicações típicas. Quando são analisados sistemas deste tipo, é imprescindível dedicar uma atenção especial aos mecanismos de propagação, que são os vários modos pelos quais a onda eletromagnética contendo a informação (geralmente através da modulação de uma portadora) propaga desde a antena transmissora até a antena receptora. Tais mecanismos são, principalmente, a visibilidade direta, difração, refração ionosférica, reflexão, comunicação por satélite, difusão troposférica e onda de superfície [1].

As comunicações a longas distâncias (sem fio) receberam um grande impulso em 1895, quando Guglielmo Marconi [2] colheu o primeiro êxito, transmitindo a partir da *Shepherdess Stone* no vilarejo de Salvan (Suíça) os três pontos da letra "S" em código morse a uma distância inferior a 1,5 km. Na época, os mecanismos de propagação de ondas de rádio não eram bem conhecidos. Por exemplo, a existência da ionosfera não tinha sido ainda estabelecida. Outros pesquisadores complementaram o trabalho de Marconi, até que, em 1909, Sommerfeld [3] obteve a solução da equação de onda para um dipolo elétrico vertical situado sobre a interface plana entre um dielétrico e um condutor, o que

auxiliou no desenvolvimento de teorias sobre a propagação de ondas eletromagnéticas.

A partir daí, observa-se uma expansão no uso da rádio-propagação e chega-se ao cenário atual, com um espectro de rádio-freqüências densamente utilizado e com a oferta cada vez maior de serviços de comunicação sem fio, o que obriga o estabelecimento de uma política de gerenciamento deste espectro. Observa-se também o uso cada vez maior de freqüências mais elevadas, o que pode ser explicado pela necessidade de aumento de banda disponível para trafegar grande quantidade de dados, ou mesmo pela inexistência de freqüências mais baixas disponíveis.

Para um bom gerenciamento do espectro de freqüências é necessário um conhecimento mais apurado dos vários mecanismos de propagação das ondas de rádio para a obtenção de projetos de redes de comunicação sem fio mais otimizados, com menores custos de implementação e gerenciamento. Tal melhoria de gestão está estritamente ligada ao desenvolvimento de modelos de propagação que consigam descrever o fenômeno de forma mais eficiente. Dentre os modelos existentes na literatura científica, pode-se agrupá-los em métodos empíricos, semi-empíricos e modelos analíticos [4].

De forma geral, os métodos empíricos baseiam-se em observações da potência medida para vários ambientes de propagação, a partir das quais o modelo de previsão e suas regras de aplicação são estabelecidas. Métodos semi-empíricos são estabelecidos a partir de técnicas analíticas para a determinação do espalhamento de campos eletromagnético, as quais podem ser ajustadas através de medidas. Modelos analíticos desconsideram quaisquer incertezas no fenômeno físico, contendo-se a modelos matemáticos exatos que geralmente são estabelecidos através de aproximações do fenômeno físico real. Uma curiosa observação é que as várias técnicas existentes hoje, tanto empíricas como semi-empíricas, não concordam mutuamente para aplicações similares ou mesmo idênticas. Por esse motivo, têm sua validade fortemente questionada, não havendo um consenso geral sobre qual delas seja a melhor [4].

Vários modelos e trabalhos interessantes vêm sendo publicados na literatura científica. Até mesmo alguns modelos mais antigos ainda preservam de forma bastante consistente a sua aplicabilidade, como, por exemplo, o modelo de Okumura-Hata [5]. A

Recomendação ITU-R P.1546 [6] é um modelo recém publicado pela *International Telecommunication Union* (ITU) e, por ser recente, encontra-se sobre forte análise da comunidade científica. O artigo publicado por Östlin [7] é um exemplo de tal preocupação, onde medidas de campo são comparadas com a predição da Recomendação ITU-R P.1546. Porém, essa recomendação surgiu com a contribuição de várias outras, como por exemplo, a ITU-R P.341 [8], ITU-R P.453 [9], ITU-R P.528 [10], ITU-R P.617 [11], ITU-R P.452 [12], ITU-R P.1411 [13], ITU-R P.530 [14] e principalmente a ITU-R P.370 [15].

Neste trabalho de dissertação deseja-se fazer uma análise crítica da Recomendação ITU-R P.1546 [6], a qual se enquadra como um modelo de propagação semi-empírico. Tal recomendação foi publicada recentemente pela *International Telecommunication Union* (ITU) e trata da comunicação ponto-multi-ponto para a faixa de frequências de 30 MHz a 3 GHz, para diferentes parâmetros de transmissor e receptor, nas mais diversas condições de percurso, em ambientes densamente urbanos ou puramente rurais, incluindo a possibilidade de enlaces terrestres mistos (formados por uma parte localizada sobre a terra e outra parte sobre a água). Na próxima seção será apresentada a metodologia proposta para o alcance dos objetivos.

1.2 Objetivos e Metodologia

Os principais objetivos do presente trabalho são a implementação numérica da Recomendação ITU-R P.1546, a descrição objetiva dos procedimentos adotados por ela e a apresentação de uma nova abordagem de cálculo de predição para enlaces curtos sobre terrenos mistos. A implementação computacional da recomendação proporciona uma ferramenta de análise para a comparação dos resultados do modelo ITU-R P.1546 com os de outro modelos: Okumura-Hata [5] e medidas de campo. A descrição dos procedimentos de cálculo adotados pela Recomendação ITU-R P.1546 visa complementar as informações presentes no documento original [6].

A apresentação de uma nova abordagem [16], [17] aplicada a percursos sobre terrenos mistos curtos é uma contribuição inédita desta dissertação. Deseja-se com essa abordagem melhorar a aplicabilidade da Recomendação ITU-R P.1546 para o tipo espe-

cífico de enlace em questão (com distâncias inferiores a 20 km e sobre perfis de terreno com presença de espelho d'água). É importante ressaltar que a nova abordagem a ser apresentada não se aplica aos enlaces com frequências relativamente baixas, pois as ondas de superfície, fortemente presentes nesse tipo específico de enlace, não serão consideradas, podendo induzir a um erro de predição de cobertura.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada da seguinte maneira. No Capítulo 2 o modelo de cobertura da Recomendado ITU-R P.1546 para comunicação ponto-multi-ponto de 30 MHz a 3 GHz é apresentado. Na apresentação haverá uma breve discussão sobre as variáveis de entrada e seus significados.

O Capítulo 3 apresenta uma contribuição inédita à recomendação. O intuito é suprir uma deficiência já conhecida do modelo ITU-R P.1546 ao predizer cobertura em terrenos mistos, ou seja, para enlaces radioelétricos sobre a terra e água. A sugestão de melhoria baseia-se na intersecção do primeiro elipsóide de Fresnel com o relevo sobre o qual o enlace se encontra (perfil de relevo analisado) e é válida para percursos curtos, tipicamente inferiores a 20 Km. O novo modelo será analisado frente a medidas realizadas no entorno da Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte, MG, apresentando seus resultados em comparação com a ITU-R P.1546 original e com o modelo de cobertura de Okumura-Hata [5].

No Capítulo 4 será apresentado outro caso de estudo realizado na cidade de Brasília-DF. Também será apresentado um programa de computador com a implementação da ITU-R P.1546 e de outros modelos de propagação, no sentido de possibilitar a comparação da ITU-R P.1546 com outros modelos de cobertura e medidas de campo. Tal *software* possui uma interface de fácil manuseio, o que auxilia na análise de resultados numéricos provenientes de simulações e medidas.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho e traz algumas sugestões para trabalhos futuros, complementares ou correlatos.

Capítulo 2

A Recomendação ITU-R P.1546

Neste capítulo será apresentada a versão principal de agosto de 2005 da Recomendação ITU-R P.1546 [6], a qual apresenta algumas diferenças em relação à versão anterior, de março de 2004. Desde a publicação da versão de março de 2004, vários itens têm sido questionados e várias melhorias propostas, como, por exemplo, a definição da correção baseada no ângulo de visada do terreno, a correção de terrenos mistos, altura efetiva de recepção, dentre outras. Mesmo com a recente publicação da versão principal, vários questionamentos ainda perduram, o que continua motivando a discussão. Ao final do capítulo será apresentada a comparação da Recomendação ITU-R P.1546 com algumas medidas realizadas no entorno da lagoa da Pampulha em Belo Horizont, MG.

Aqui não se deseja transcrever a recomendação assim como ela está no documento original da ITU, mas explicar, de forma sucinta e não menos interessante e enriquecedora, o funcionamento da mesma.

2.1 Introdução

As recomendações publicadas pela ITU têm como objetivo fornecer técnicas eficazes no planejamento de cobertura e se encaixam no grupo dos métodos semi-empíricos. Antes da publicação da ITU-R P.1546, a recomendação utilizada de forma geral para fins de projeto de enlaces ponto-multi-ponto para a faixa de VHF e UHF era a Recomendação ITU-R P.370 [15], que já existe há mais de 50 anos e ainda continua em utilização (versão de 2001). Tal recomendação já sofreu várias revisões, mantendo-se, porém, a mesma idéia

principal, com métodos de cálculo questionáveis e restrições de aplicabilidade.

A criação da ITU-R P.1546 busca trazer, de certa forma, uma extensão da faixa de aplicabilidade da Recomendação ITU-R P.370, sendo o único método ponto-multi-ponto para frequências de 30 MHz a 3 GHz da ITU-R, abrangendo distâncias entre 1 km e 1000 km, aplicada às percentagens de tempo entre 1% e 50%, apresentando curvas de 10 m até 1200 m de altura efetiva de transmissão, correção do campo baseada no ângulo de visada do terreno, correção para terrenos mistos, dentre outras peculiaridades. Todos esses parâmetros e correções serão melhor discutidos ao longo deste capítulo.

2.2 Medidas em Base Tabular

A Recomendação ITU-R P.1546 tem como principal característica a utilização de curvas de propagação apresentadas na forma tabular, obtidas através de medidas realizadas em regiões temperadas dos EUA e da Europa. Tais curvas encontram-se nos Anexos 2, 3 e 4 da recomendação [6]. De forma geral, o que a recomendação faz é o seguinte: dadas as principais características ou parâmetros reais do caso em análise (comprimento do enlace, frequência, variabilidade temporal e variabilidade local desejadas, altura do transmissor e do receptor, localização geográfica, tipo de ambiente no qual o enlace está inserido, etc.), busca-se primeiramente, através das variáveis de entrada, as curvas de medidas que mais se aproximam do caso real a ser analisado. Por exemplo, considere a realização de um cálculo de enlace para a distância de 22 km. Através da base de medidas, observa-se que a recomendação possui medições para as distâncias de 20 km e 25 km (distâncias nominais), não possuindo curvas para 22 km. Dessa forma, buscam-se as curvas de 20 km e 25 km e realiza-se uma interpolação logarítmica para a determinação da intensidade do campo para a distância desejada de 22 km [6].

O mesmo princípio descrito no parágrafo anterior é adotado para as outras variáveis de entrada, através das curvas com parâmetros nominais que mais se aproximam do valor real da variável em questão (um valor imediatamente acima e outro imediatamente abaixo). Contudo, outras formas de interpolação/extrapolação são utilizadas, o que será melhor discutido em seções posteriores. Caso o parâmetro em questão coincida com o valor

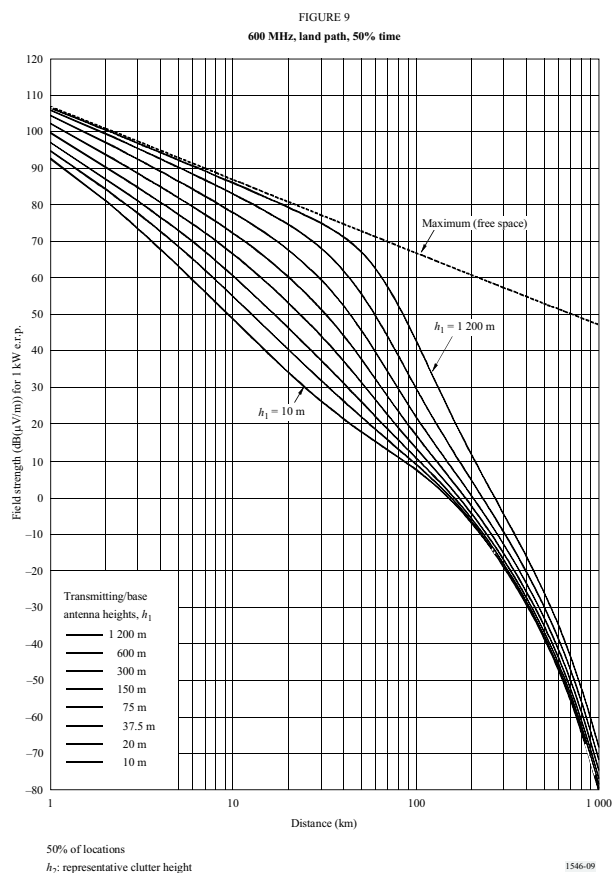


Figura 2.1: Exemplo de uma curva de propagação: Figura 9 do Anexo 3 da Recomendação ITU-R P.1546.

nominal contido na base tabular, apenas uma curva é resgatada, não sendo necessária nenhuma interpolação/extrapolação.

Todas as curvas de medidas foram determinadas para as frequências nominais de 100 MHz, 600 MHz e 2000 MHz, para percentagens nominais de tempo excedidos de 1%, 10% e 50%, para variabilidade local de 50%, com diferentes valores de altura efetiva de antena de transmissão (10 m até 1200 m), com altura de recepção de 10 m, 20 m ou 30 m para ambientes em terra e 10 m para ambientes sobre água. Na Fig. 2.1 pode-se observar um ábaco típico, contendo medidas para a frequência de 600 MHz, sobre terra seca e para 50% do tempo. Além dos ábacos que ilustram bem o comportamento da intensidade de campo, existem os mesmos valores tabelados, o que é utilizado no caso de implementação computacional da Recomendação ITU-R P.1546. As medidas referem-

se a uma transmissão com E.R.P de 1kW [6, Anexo 1]. A E.R.P é definida como o produto da potência fornecida à antena pelo seu ganho relativo a um dipolo de meia-onda, numa dada direção [4]. Comumente utiliza-se E.I.R.P para informações de potência transmitida [4]. A definição de E.I.R.P é o produto da potência fornecida à antena pelo seu ganho, mas relativo a uma antena isotrópica. Como o dipolo de meia-onda possui uma diretividade de 1,633 (em relação a antena isotrópica), uma E.R.P de 1 kW equivale a uma E.I.R.P de 1,633 kW.

2.3 Índice de Refração da Atmosfera

Em tese, a Recomendação ITU-R P.1546 é válida em todas as regiões do planeta, apesar das curvas de medidas discutidas na Seção 2.2 terem sido realizadas em regiões temperadas dos EUA e Europa. Isso só é possível porque existe uma correção baseada na variação do índice de refração da atmosfera (representado pela refratividade N , em N -unidades/km), que é peculiar a cada região do planeta. Uma outra recomendação, a ITU-R P.453 [9], contém um mapeamento global do gradiente do índice de refração (em N -unidades/km) nos 65 m mais próximos do solo. Na Fig. 2.2 pode-se observar valores de gradiente de refratividade (dN) para 1% do tempo [18].

O ajuste que levará em consideração essa diferença no índice de refração acontece com as famílias de curvas da base tabular e não com o valor final de campo obtido após outras interpolações e demais tratamentos. Essa correção é o primeiro ajuste a ser feito no cálculo de cobertura. Na Fig. 2.3 pode-se observar a correção aplicada na base de medidas para a frequência de 100 MHz, 50% do tempo para a costa oeste da África [18].

A teoria para o cálculo de correção das curvas é empírica. Assim, não será apresentada a formulação matemática, que pode ser encontrada no Anexo 9 da ITU-R P.1546 [6, Anexo 9].

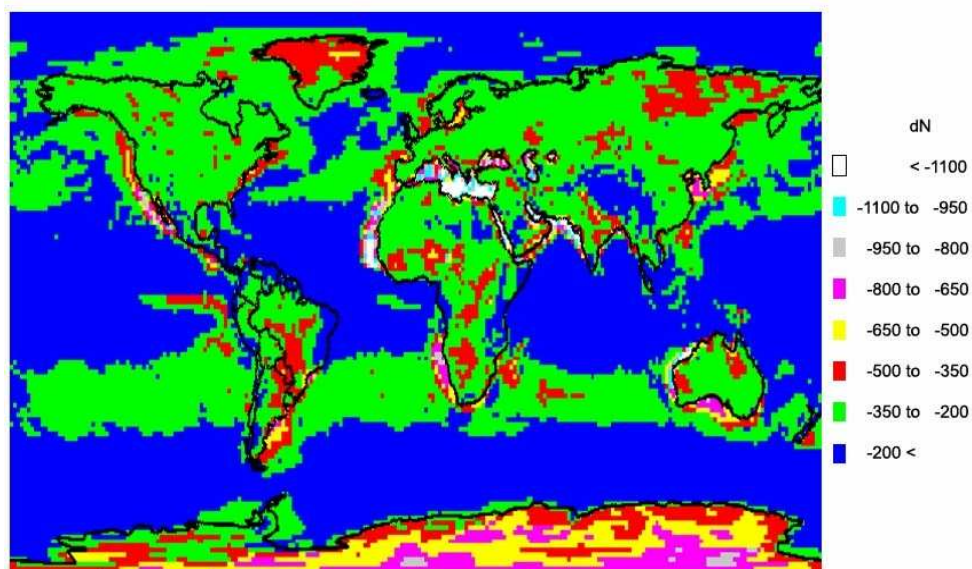


Figura 2.2: Valores de dN para 1% do tempo.

2.4 Variabilidade Local

A variabilidade local (VL) refere-se ao comportamento da intensidade do campo elétrico dentro de uma determinada área de cobertura de dimensões definidas, ao invés de um determinado ponto. Para o caso de frequências nas faixas de VHF e UHF, são usadas áreas quadradas com 500 m de lado (valor típico) [19]. Diversos fatores podem explicar tal variação de intensidade com a posição, como por exemplo multi-percursos, variações do nível de arborização (vegetação), construções (prédios, casas, etc.), variações de relevo (montanhas, penhascos) e a própria movimentação dos terminais de comunicação.

Como citado na Seção 2.2, todas as medidas que compõem a base tabular foram computadas para 50% de VL. Ou seja, 50% da área é provavelmente coberta por uma intensidade de campo maior do que o valor tabulado. Por exemplo, um valor de sinal predito de -60 dBm com VL de 50% significa que em 50% da área, a potência provavelmente será superior a -60 dBm.

Medidas realizadas ao longo dos anos sugerem que, para áreas relativamente pequenas (como para $500 \times 500 \text{ m}^2$), a distribuição de intensidade de campo pode ser aproximada por uma distribuição log-normal [4]. Neste caso, o valor de intensidade de campo

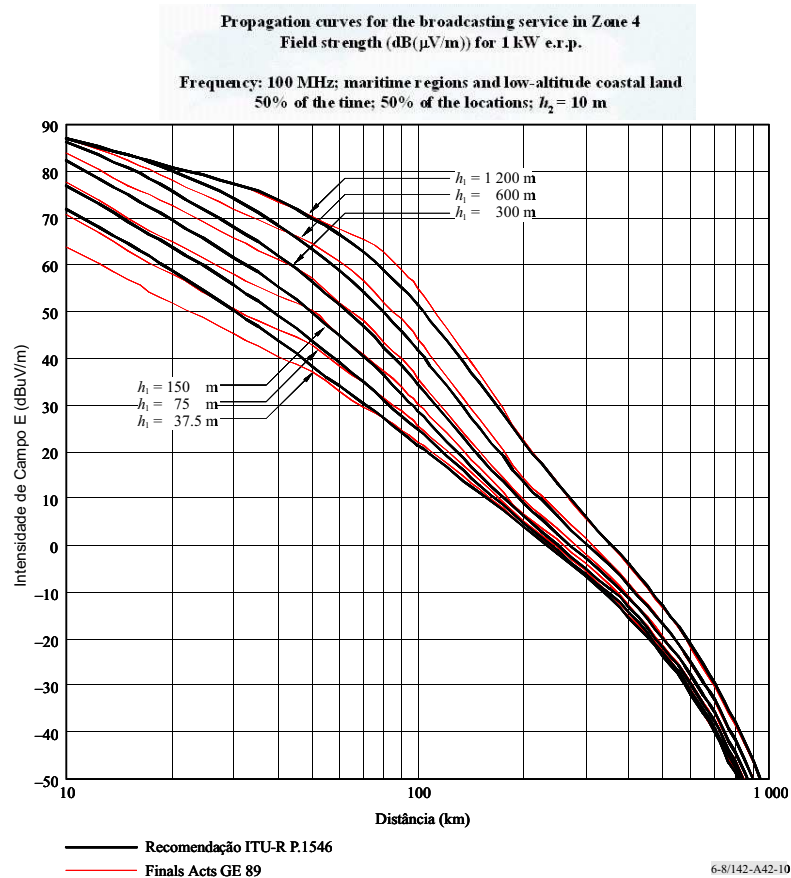


Figura 2.3: Comparação entre os ábacos da ITU-R P.1546 com e sem a correção baseada no índice de refração para a costa oeste da África.

apresentado na base tabular corresponde ao valor esperado (E_{tabela}). O desvio-padrão das medidas, descrito neste texto por σ , depende da frequência, sendo dado por [6, Anexo 5, Seção 12]:

$$\sigma = K_{\sigma} + 1,3 \log(f), \quad (2.1)$$

onde f representa a frequência em MHz e K_{σ} depende do sistema em questão, sendo, por exemplo, igual a 1,2 para sistemas móveis com antena omnidirecional posicionada a uma altura correspondente à altura de um carro. Valores de σ para outros sistemas encontram-se na Tabela II.I [6, Anexo 5, Seção 12].

Dessa forma, pelo fato das medidas provenientes da base tabular não possuírem valor médio E_{tabela} igual a zero e desvio-padrão σ unitário, as medições não configuram

Tipo de Sistema	Desvio-Padrão (σ)		
	100 MHz	600 MHz	2000 MHz
Broadcasting Analógico	8,3	9,5	-
Broadcasting Digital	5,5	5,5	5,5
Móvel (ambiente urbano)	5,3	6,2	7,5
Móvel (ambiente sub-urbano)	6,7	7,9	9,4

Tabela II.I: Valores típicos de desvio-padrão (σ) para algumas situações.

uma variável aleatória Normal padrão. A função cumulativa normal de probabilidade (cdf) para uma variável aleatória X com média E_{tabela} e desvio-padrão σ é definida como [20]:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x'-E_{tabela})^2}{2\sigma^2}} dx', \quad (2.2)$$

onde $P(X \leq x)$ denota a probabilidade da variável aleatória X possuir um valor inferior a um certo limiar x . Como o interesse primordial é a análise de um valor superior a um certo limiar x , usa-se [21]:

$$P(X \geq x) = P(Z \geq z) = Q\left(\frac{X - E_{tabela}}{\sigma}\right), \quad (2.3)$$

onde $Q(x)$ é a função cumulativa complementar normal de probabilidade, definida como:

$$Q(x) = 1 - \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (2.4)$$

e $\Phi(x)$ é a função cumulativa normal de probabilidade.

Dada uma probabilidade p desejada, faz-se necessária a utilização da função inversa para a obtenção do argumento da cdf. Ou seja, se:

$$Q\left(\frac{X - E_{tabela}}{\sigma}\right) = p, \quad (2.5)$$

então:

$$X = E_{tabela} + \sigma Q^{-1}(p), \quad (2.6)$$

onde $Q^{-1}(p)$ é a função cumulativa complementar inversa normal de probabilidade.

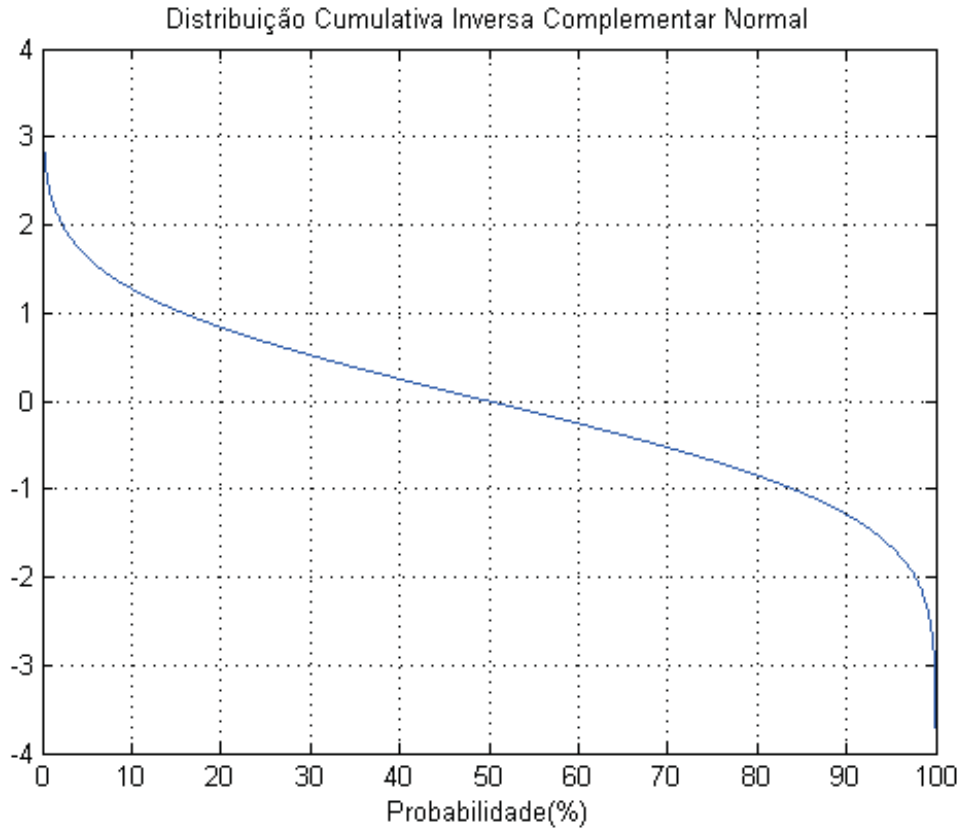


Figura 2.4: Função cumulativa complementar inversa normal de probabilidade.

A Eq.(2.6) é exatamente a mesma equação dada pela ITU-R P.1546 para qualquer valor de VL:

$$E(p) = E_{medium} + \sigma Q^{-1}(p). \quad (2.7)$$

O gráfico de $Q^{-1}(p)$ é apresentado na Fig. 2.4.

2.5 Variabilidade Temporal

A variabilidade temporal (VT, dada em percentagem) leva em conta as variações de campo devido a não-estacionaridade temporal do canal rádio, causada por variações locais do índice de refração da atmosfera, movimentação do receptor e outros fatores. Esse parâmetro fornece a fração do tempo em que a intensidade instantânea de recepção é maior

ou igual ao valor médio predito. Por exemplo, uma intensidade de potência de -50 dBm com uma VT excedida em 1% do tempo significa que o sinal recebido provavelmente terá potência maior ou igual a -50 dBm em 1% do tempo. Se fosse com uma VT de 50% significaria que sua intensidade é provavelmente maior ou igual ao valor médio (-50 dBm) em 50% do tempo.

Dessa forma, quando se aumenta o valor de variabilidade temporal, aumenta-se também a confiabilidade do campo predito. Como consequência, o valor nominal do mesmo diminui. Em outras palavras, sem alterar as condições reais do problema, um campo predito com uma VT de 1% tem um valor nominal superior ao campo na mesma situação quando comparado com a predição para uma VT de 50%. Geralmente, pequenas percentagens de tempo são utilizadas para a análise de interferências e não do sinal propriamente dito. Há uma suposição de que as interferências assumem valores superiores a um certo limiar durante certos intervalos de tempo, não o tempo inteiro. Valores de VT excedidos para altas percentagens de tempo não são muito utilizados, por diminuírem muito o valor nominal do campo predito. A confiabilidade de elevadas VT's admite que o campo fique abaixo de um determinado limiar em apenas ínfimos instantes de tempo, o que geralmente não afeta a qualidade do sistema de comunicação. Dessa forma, um projeto com grande valor de VT terá um custo bastante alto e não apresentará uma qualidade excepcional perceptível que justifique o grande investimento.

Os ábacos, como aquele mostrado na Fig 2.1, foram obtidos para valores de campo excedidos em 1%, 10% e 50% do tempo. A recomendação não é válida para valores de VT superiores a 50%. Ao contrário da variabilidade local da Seção 2.4, que apresenta uma distribuição de probabilidade aproximadamente log-normal, a VT não apresenta tal distribuição de probabilidade típica e, por esse motivo, a Recomendação ITU-R P.1546 realiza uma operação bem mais simples para o cálculo de cobertura para diferentes valores de VT. A partir do valor (t , em percentagem) de variabilidade temporal desejada, buscam-se as curvas da base tabular que possuem VT's que mais se aproximem de t (uma curva com valor de VT imediatamente superior e outra curva com VT imediatamente inferior).

De posse dessas curvas, realiza-se uma simples interpolação [6]:

$$E = E(t_{sup}) \left[\frac{Q^{-1}\left(\frac{t_{inf}}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t}{100}\right)}{Q^{-1}\left(\frac{t_{inf}}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t_{sup}}{100}\right)} \right] + E(t_{inf}) \left[\frac{Q^{-1}\left(\frac{t}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t_{sup}}{100}\right)}{Q^{-1}\left(\frac{t_{inf}}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t_{sup}}{100}\right)} \right], \quad (2.8)$$

onde t é o valor de VT desejado, t_{inf} e t_{sup} são os valores nominais de VT imediatamente abaixo e acima de t , respectivamente, $E(t_{inf})$ e $E(t_{sup})$ são os valores tabelados de intensidade de campo para as VT's nominais t_{inf} e t_{sup} , respectivamente, e $Q^{-1}(x)$ é a distribuição inversa complementar cumulativa normal de probabilidade ilustrada na Fig. 2.4 da Seção 2.4.

2.6 Determinação da Altura Efetiva da Antena Transmissora

Um dos parâmetros mais importantes da Recomendação ITU-R P.1546 é a altura efetiva da antena transmissora (h_1), que determina o conjunto de medidas que será utilizado para o cálculo de cobertura em questão. É importante ressaltar que a ITU-R P.1546 não é válida para valores de h_1 inferiores a 1 m em enlaces sobre terra e inferiores a 3 m sobre água. Pode-se classificar a determinação de h_1 em três casos complementares:

- Enlaces inferiores a 15 km sobre terra;
- Enlaces superiores a 15 km sobre terra;
- Enlaces sobre água.

Após o cálculo do valor de h_1 , busca-se a partir da base de medidas (discutida na Seção 2.2) curvas de propagação levantadas com valores nominais de h_1 próximos do valor calculado, que serão interpoladas para a obtenção de um novo valor de intensidade de campo. Esse ajuste levará em consideração a diferença entre a altura efetiva da antena transmissora da base de medidas e o valor de h_1 determinado para o enlace. Os procedimentos para o ajuste podem ser encontrados em [6, Anexo 4]. Os procedimentos para a obtenção de h_1 serão discutidos a seguir.

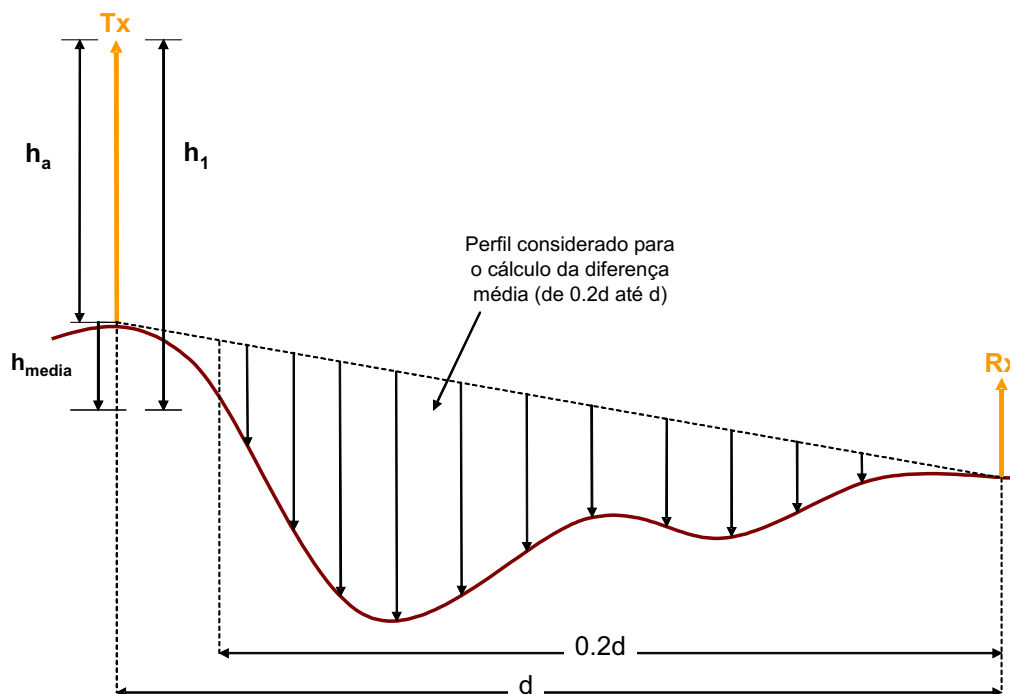


Figura 2.5: Determinação de h_1 para enlaces inferiores a 15 km e com uma descrição detalhada do relevo.

2.6.1 Enlaces Inferiores a 15 km sobre Terra

Neste caso, é necessário inicialmente o cálculo da altura média do relevo relativa à linha que une a base do transmissor à base do receptor (h_{media}), como ilustrado na Fig. 2.5. Uma observação importante é que h_{media} pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo se h_{media} está acima ou abaixo da base da antena transmissora. No caso ilustrado na Fig 2.5, $h_{media} < 0$.

Informações detalhadas do relevo

Caso haja informações detalhadas do perfil de relevo (por exemplo, através de um mapa digitalizado da região), considera-se, para o cálculo de h_{media} , o relevo contido entre as distâncias $0.2d$ e d , onde d é o comprimento total do enlace [6, Anexo 5, Seção 3]. A partir desse valor, calcula-se h_1 como sendo a altura da antena (mastro da antena, h_a)

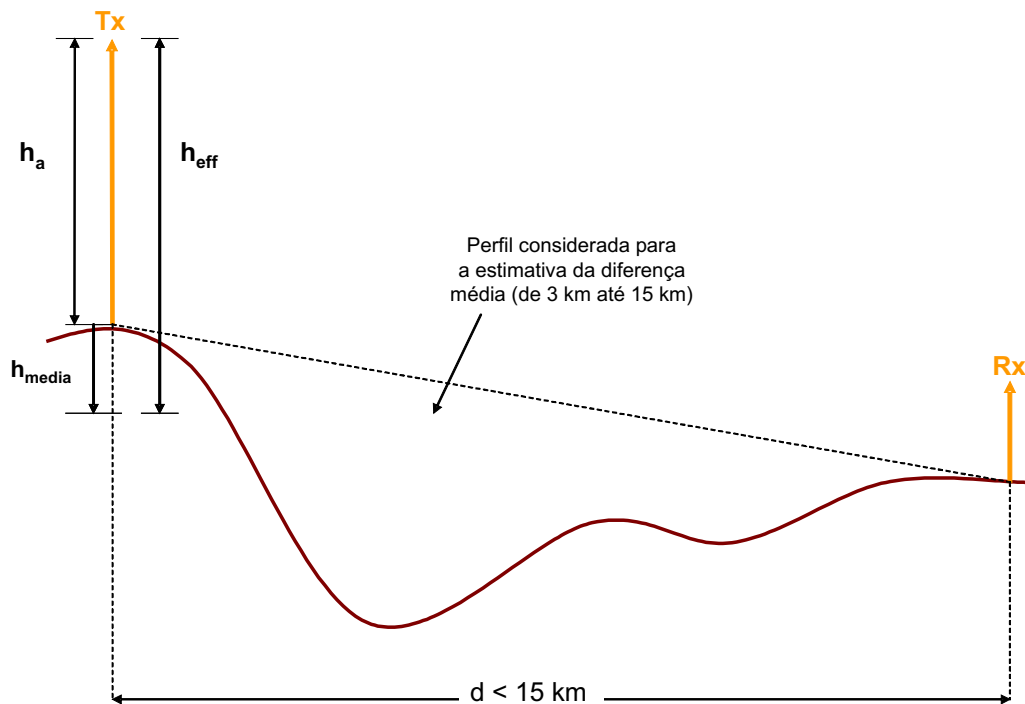


Figura 2.6: Determinação de h_1 para percursos inferiores a 15 km e sem uma descrição detalhada do relevo do enlace.

que está acima (ou abaixo) da altura média do percurso (h_{media}):

$$h_1 = h_a - h_{media}, \quad (2.9)$$

onde h_1 , h_{media} e h_a são ilustrados nas Fig 2.5.

Para o exemplo da Fig. 2.5, h_{media} é negativo. Dessa forma, observando a Eq.(2.9), h_1 será igual a soma do valor absoluto de h_a e h_{media} , resultando em um valor de h_1 superior a h_a . Caso h_{media} fosse positiva, o valor de h_1 seria a diferença entre h_a e h_{media} e, conseqüentemente inferior a h_a .

Caso não haja uma descrição detalhada do relevo, a Recomendação ITU-R P.1546 aconselha uma estimativa baseada nas características geográficas gerais com os dados disponíveis das alturas relativas entre o perfil de relevo e o mastro da antena transmissora, como ilustrado na Fig. 2.6. Todavia, caso o comprimento do enlace seja inferior a 3 km, o valor de h_1 será igual ao valor da altura do mastro da antena h_a , ou seja:

$$h_1 = h_a, \quad \text{se } d < 3 \text{ km}. \quad (2.10)$$

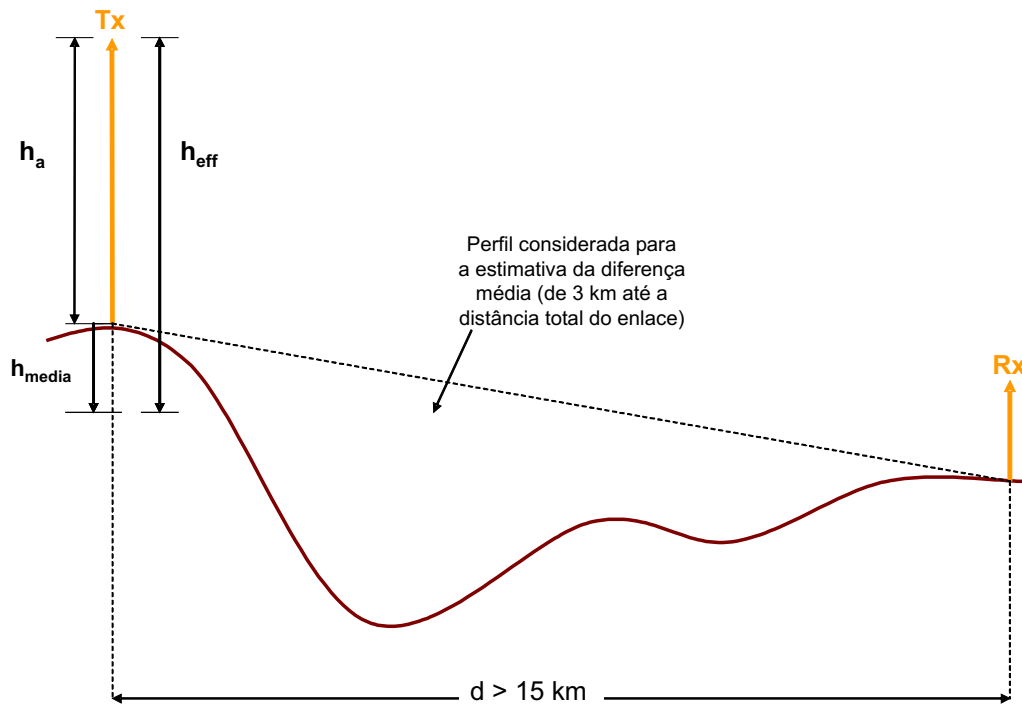


Figura 2.7: Determinação de h_1 para percursos superiores a 15 km e sem uma descrição detalhada do relevo do enlace.

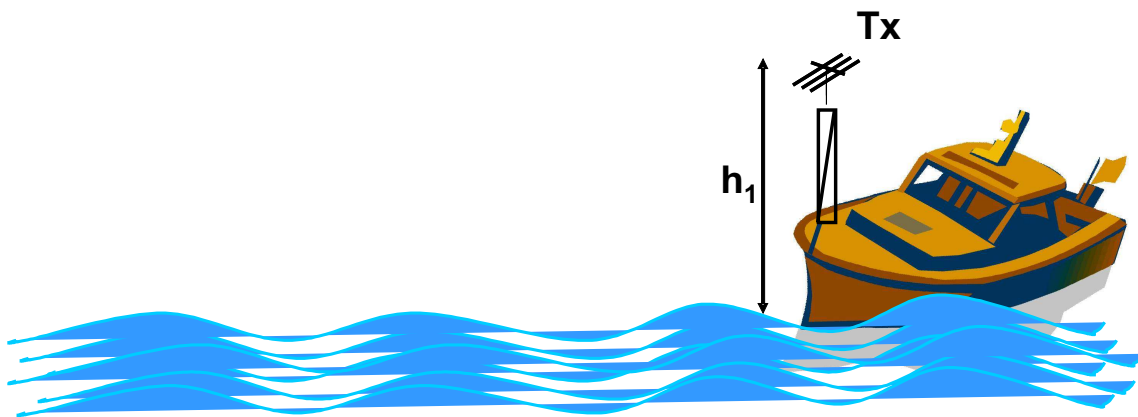


Figura 2.8: Determinação de h_1 para percursos sobre a água.

Caso o comprimento total do enlace seja superior a 3 km, estima-se o valor de h_{media} da forma mais conveniente possível, considerando o relevo contido entre as distâncias de 3 km a 15 km (limitando-se a distância total do enlace caso este seja inferior a 15 km), como ilustrado na Fig. 2.6. Procedendo dessa maneira, obtém-se uma estimativa de h_{media} para os primeiros 15 km do relevo. A seguir, o parâmetro h_{eff} é obtido:

$$h_{eff} = h_a - h_{media}, \quad (2.11)$$

que é a altura efetiva da antena transmissora em relação à h_{media} , como ilustrado na Fig. 2.6. Calcula-se, então, h_1 como [6, Anexo 5, Seção 3]:

$$h_1 = h_a + (h_{eff} - h_a)(d - 3)/12. \quad (2.12)$$

Analisando melhor a Eq.(2.12), observa-se que se $d = 15$ km, a equação acima reduz-se a $h_1 = h_{eff}$. Isso nos mostra que, para $d = 15$ km, h_1 torna-se igual a altura da antena transmissora, acima da altura média para os primeiros 15 km do enlace.

2.6.2 Enlaces Superiores a 15 km sobre Terra

De forma similar ao caso de percursos inferiores a 15 km sem uma descrição detalhada do relevo, estima-se a altura da antena transmissora tomando como base as informações disponíveis. Nestes casos, $h_1 = h_{eff}$, onde h_{eff} é, mais uma vez, a altura da antena transmissora (mastro da antena, h_a) que está acima (ou abaixo) da altura média do percurso (h_{media}) como ilustrado na Fig. 2.7 e dado pela Eq.(2.11).

É importante ressaltar que, para esse tipo de enlace, quando houver a presença de um grande obstáculo ou diferenças de alturas muito significativas, deve-se recorrer à correção a ser apresentada na Seção 2.7 (correção de ângulo de visada do terreno).

2.6.3 Enlaces sobre Água

Nessa situação, h_1 é a representação da altura física da antena (mastro da antena) sobre a superfície da água, como ilustrado na Fig. 2.8.

2.7 Correção de Ângulo de Visada do Terreno

A correção baseada no ângulo de visada do terreno (θ_{tca}) deve ser aplicada quando for requerida uma maior precisão na predição ou se houver um obstáculo (obstrução) mais proeminente ao longo do enlace. O ângulo θ_{tca} é dado por:

$$\theta_{tca} = \theta - \theta_r, \quad (2.13)$$

onde θ (medido em graus) é o ângulo relativo à linha que parte do receptor e tangencia as obstruções em distâncias acima de 16 km em direção ao transmissor, mas não indo além deste último, como ilustrado na Fig. 2.9. O ângulo de referência θ_r , mostrado na Fig. 2.10, leva em consideração a curvatura da Terra, que se torna importante à medida que o transmissor e o receptor se distanciam um do outro. θ_r é definido como:

$$\theta_r = \arctan \left(\frac{h_{1s} - h_{2s}}{1000d} \right), \quad (2.14)$$

onde h_{1s} e h_{2s} são as alturas do transmissor e do receptor em relação ao nível do mar, respectivamente, e d é a distância entre eles (em quilômetros). O ângulo θ deve ser medido em relação à horizontal, sendo positivo se a linha que tangencia o obstáculo está acima do horizonte e negativo caso contrário (Fig. 2.9).

Com esses parâmetros, a correção a ser adicionada é

$$\delta E_{tca} = J(v') - J(v) \quad (\text{em dB}), \quad (2.15)$$

onde:

$$J(x) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(x - 0,1)^2 + 1} + x - 0,1 \right), \quad (2.16)$$

$$v = 0,065\theta_{tca}\sqrt{f}, \quad (2.17)$$

$$v' = 0,036\sqrt{f}, \quad (2.18)$$

f é a frequência, dada em MHz, e θ_{tca} é dado pela Eq.(2.14).

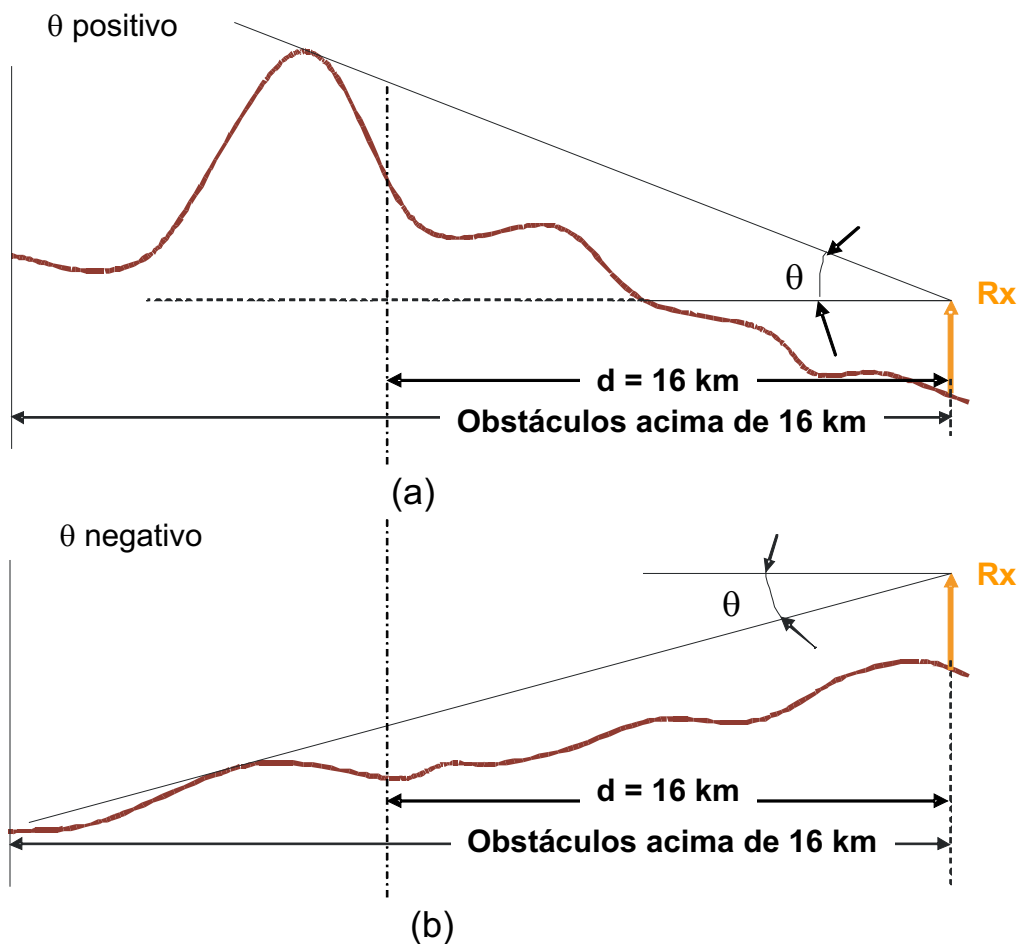


Figura 2.9: Ângulo θ (a) positivo e (b) negativo utilizados na obtenção de θ_{tca} .

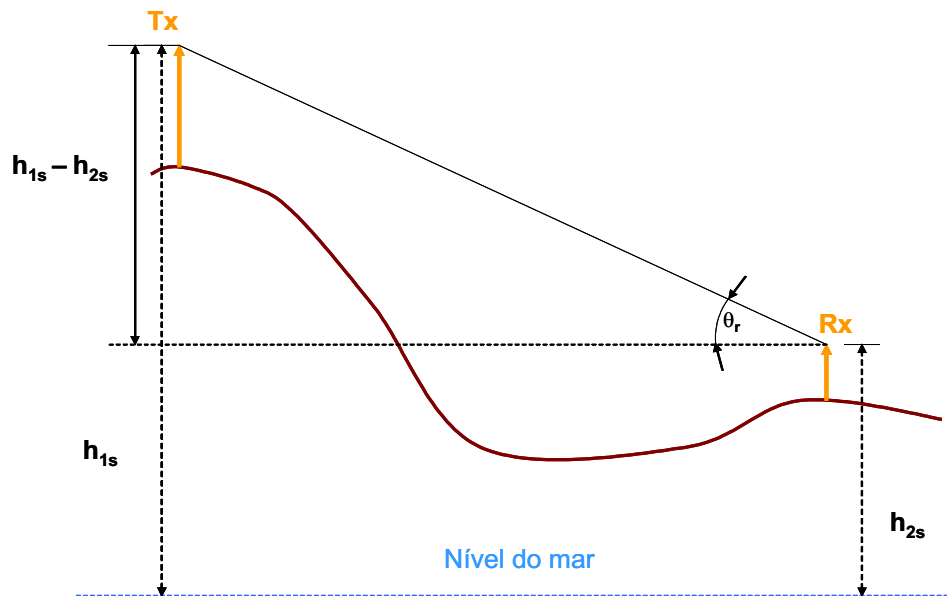


Figura 2.10: Ângulo de correção para a curvatura da Terra (θ_r).

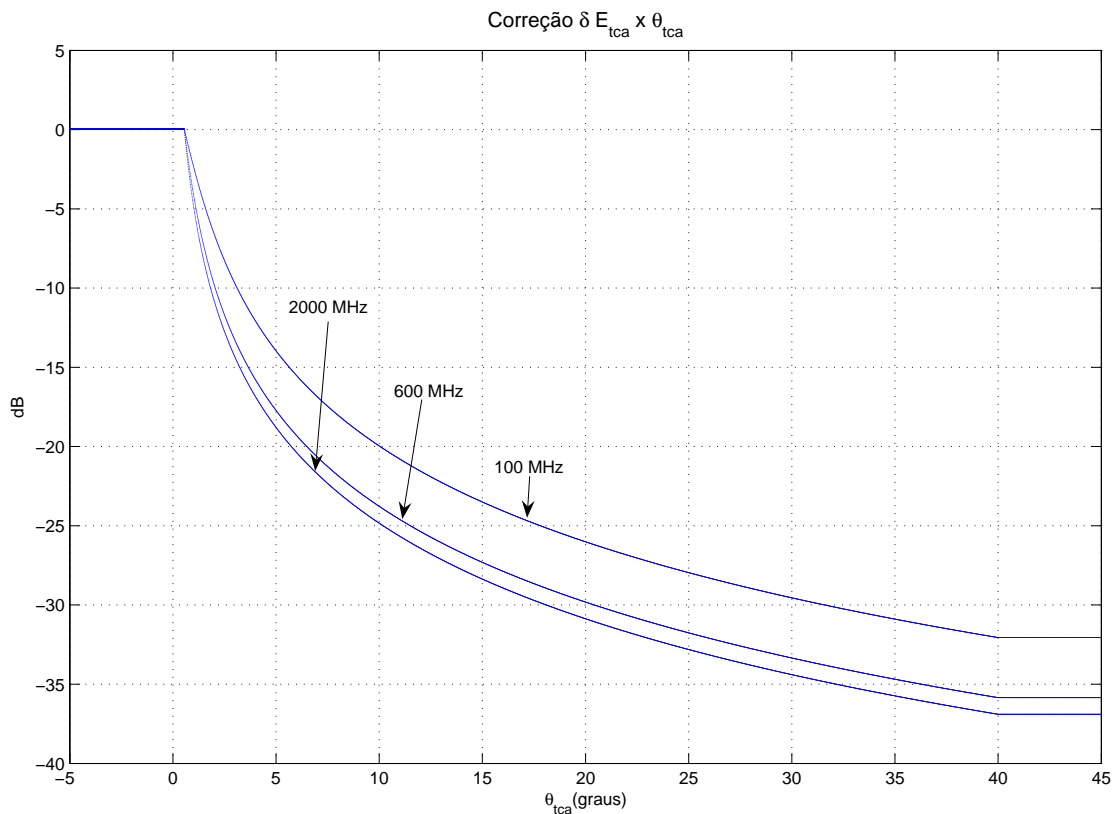


Figura 2.11: Correção (δE_{tca}) em função do ângulo de visada do terreno (θ_{tca}).

É importante ressaltar que o ângulo θ_{tca} deve ser limitado entre $0,55^\circ$ e 40° [6]. Pode-se observar a variação da correção com o θ_{tca} na Fig. 2.11.

2.8 Correção para Altura da Antena Receptora

A correção para altura de antena receptora leva em consideração a altura (h_2) do mastro da antena receptora e também o ambiente no qual o enlace está inserido. Para representar esse ambiente, a ITU-R P.1546 utiliza uma variável (R) que indica a altura média dos obstáculos que circundam o receptor no ambiente onde este se encontra. Exemplos de altura de referência são [6]:

- $R = 30$ m para áreas densamente urbanas;

- $R = 20$ m para áreas urbanas;
- $R = 10$ m para áreas rurais.

Uma vez definida a altura h_2 da antena receptora e a altura de referência R , pode-se aplicar a correção da intensidade de campo (δE_{h_2}) em função da altura da antena receptora. Para percursos sobre terra, as curvas que servem de base para a recomendação (discutidas na Seção 2.2) foram levantadas para altura de antena receptora igual a altura de referência do ambiente, ou seja, $h_2 = R$. Assim, se as medidas foram feitas em ambientes rurais, a altura de antena receptora utilizada nas medições foi de 10 m; caso a medida tenha sido feita em ambientes densamente urbanos, $h_2 = 30$ m. Para as medidas sobre a água, foi utilizado h_2 igual a 10 m.

Uma vez definido o tipo de ambiente no qual o enlace está inserido, ou seja, definido o valor de R , deve-se calcular a altura de referência modificada R' , que leva em consideração o ângulo do raio de chegada. R' é definido, em metros, como:

$$R' = \frac{(1000 d R - 15 h_1)}{1000 d - 15}, \quad (2.19)$$

onde d representa o comprimento do enlace em quilômetros e h_1 a altura efetiva de transmissão, discutida na Seção 2.6. É importante ressaltar que R' deve ser limitado a um valor mínimo de 1 m, se necessário.

Depois de obter o valor de R' e conhecendo-se a altura (h_2) da antena receptora, pode-se aplicar a correção de intensidade de campo para altura de recepção (δE_{h_2}), como explicado a seguir.

Só haverá correção ($\delta E_{h_2} \neq 0$) se $R' \neq h_2$. As Figs. 2.12 e 2.13 ilustram duas situações. Nos dois casos, $h_2 = 10$ m, $h_1 = 150$ m e $d = 50$ km. Na Fig. 2.12, o receptor encontra-se em um ambiente urbano (altura de referência $R = 20$ m) e, conseqüentemente, pela Eq.(2.19), $R' = 19,96$ m. Como $h_2 \neq R'$, a correção δE_{h_2} terá um valor não-nulo a compensar essa diferença entre R' e h_2 . Na Fig. 2.13, o móvel encontra-se em um ambiente rural ($R = 10$ m). Nesse caso, $R' = 9,96$ m. Assim, $h_2 \approx R'$ e, por esse motivo, não se faz a correção ($E_{rec} = E_{real}$).

$$E_{\text{rec}} = 58,3 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

$$E_{\text{real}} = 53 \text{ dB } \mu\text{V/m}$$

$$\delta E_{h_2} = -5,3 \text{ dB } \mu\text{V/m}$$

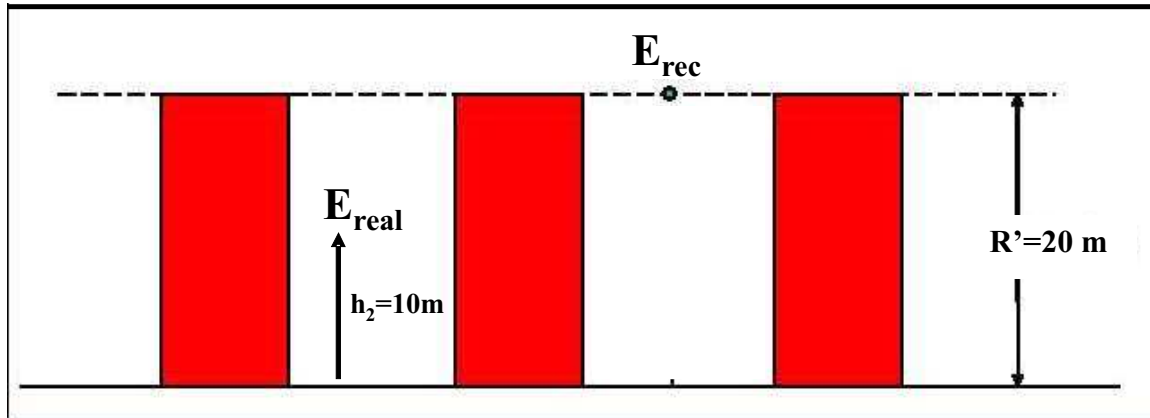


Figura 2.12: Exemplo de $R' \neq h_2$, resultando em uma correção (δE_{h_2}) não-nula.

$$E_{\text{rec}} = 58,3 \text{ dB } \mu\text{V/m}$$

$$E_{\text{real}} = 58,3 \text{ dB } \mu\text{V/m}$$

$$\delta E_{h_2} = 0$$

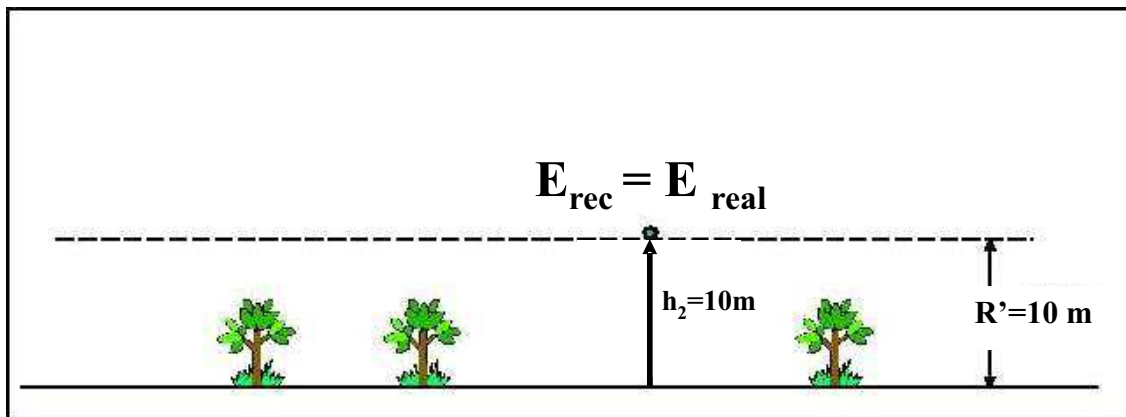


Figura 2.13: Exemplo de $R' = h_2$, resultando em uma correção (δE_{h_2}) nula.

$$\theta_{clut} = \arctan(h_{dif}/27) \text{ (graus)}, \quad (2.23)$$

$$K_{nu} = 0,0180\sqrt{f}, \quad (2.24)$$

e f é a frequência em MHz,

$$\delta E_{h_2} = K_{h_2} \log\left(\frac{h_2}{R'}\right), \quad (2.25)$$

onde $K_{h_2} = 3,2 + 6,2 \log(f)$,

$$\delta E_{h_2} = C_{10} \frac{\log(d/d_{h_2})}{\log(d_{10}/d_{h_2})}, \quad (2.26)$$

onde d_{10} e d_{h_2} estão definidos no fluxograma da Fig. 2.14. C_{10} é a aplicação da Eq. (2.25) usando $h_2 = d_{10}$ e $R' = 10$ m,

$$D_{06} = \frac{D_f D_h}{D_f + D_h}, \quad (2.27)$$

onde $D_f = 0,0000389 f h_1 h_2$, $D_h = 4.1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$, h_1 e h_2 são as alturas das antenas de transmissão e recepção, respectivamente.

As Eqs.(2.20) e (2.25) - (2.27) são encontradas em [6, Anexo 5. Seção 9].

2.9 Correção Urbano-Suburbano para Percursos Curtos

Em percursos inferiores a 15 km, constituídos por prédios de alturas uniformes sobre terrenos planos, deve-se aplicar a correção δE_{Urbano} que será adicionada ao valor da intensidade de campo. A correção visa aumentar a precisão da recomendação, levando

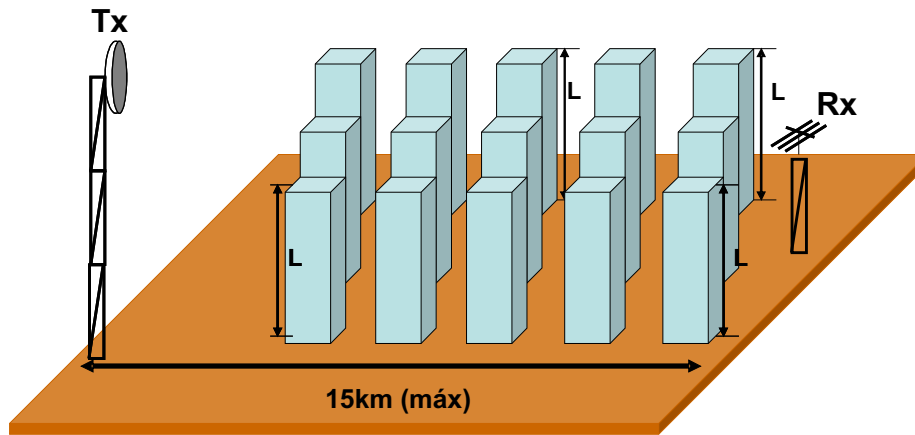


Figura 2.15: Correção Percursos Curtos em Terrenos Planos.

em consideração a atenuação devido à presença de construções. A correção só deve ser aplicada se $h_1 - R < 150 \text{ m}$ e é dada por [6]:

$$\delta E_{Urbano} = -3,3 \left[\log(f) \right] \left[1 - 0,85 \log(d) \right] \left[1 - 0,46 \log(1 + h_a - R) \right] \quad (2.28)$$

onde h_a é a altura do mastro da antena transmissora, h_1 é a altura efetiva da antena transmissora, R é a referência de altura média do ambiente analisado (como definido na Seção 2.8), f é a frequência em MHz e d é o comprimento total do enlace em quilômetros.

2.10 Correção para Terrenos Mistos

A Recomendação ITU-R P.1546 fornece uma correção para o tratamento de enlaces sobre terrenos mistos, isto é, enlaces em que os perfis do terreno são compostos parcialmente por terra e por água [6, Anexo 5, Seção 8]. A correção depende essencialmente da percentagem do percurso total (d) que está sobre a terra seca (d_{land}) ou sobre a água (d_{sea}). É importante ressaltar que, pela formulação da recomendação ITU-R P.1546, não importa a seqüência em que tais frações ocorrem. O que deve ser garantido é que $d_{land} + d_{sea} = d$. Por exemplo, as Figs. 2.16 (a) e (b) mostram duas situações que, apesar de serem fisicamente diferentes, recebem o mesmo tratamento de acordo com a ITU-R P.1546. Uma proposta de correção deste desvio da Recomendação ITU-R P.1546 será apresentada no Capítulo 3.

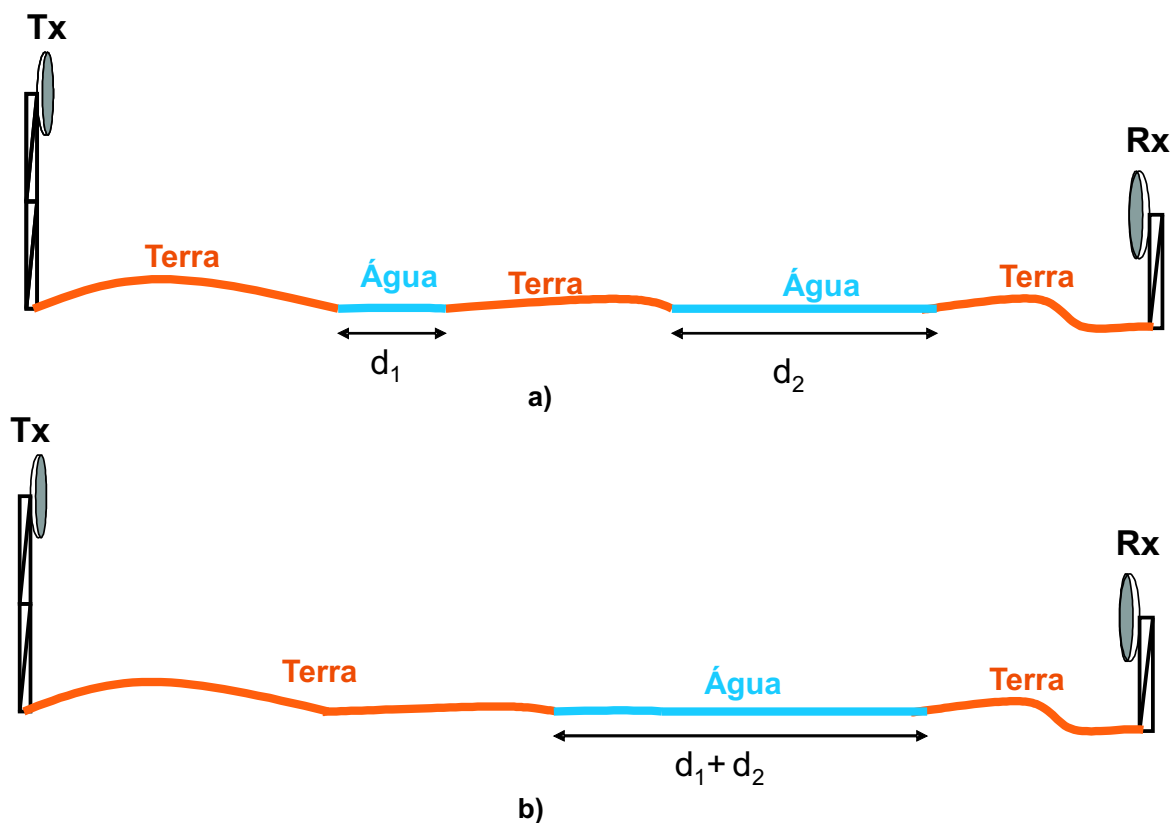


Figura 2.16: Situações fisicamente diferentes que recebem o mesmo tratamento matemático pela Recomendação ITU-R P.1546.

O método geral apresentado pela Recomendação ITU-R P.1546 para o cálculo de cobertura sobre terrenos mistos é dado por [6]:

$$E = (1 - A) E_{land}(d) + A E_{sea}(d), \quad (2.29)$$

onde $E_{land}(d)$ e $E_{sea}(d)$ são as intensidades de campo calculadas normalmente pelo algoritmo da Recomendação ITU-R P.1546, supondo-se um enlace puramente sobre a terra e sobre a água, respectivamente, com as mesmas características do enlace misto em questão (distância total, altura da antena transmissora e receptora, percentagem de VL e VT, frequência, etc.) e A é o fator de interpolação para percursos mistos que será apresentado a seguir.

Para a obtenção do fator de interpolação para percursos mistos, é necessária a

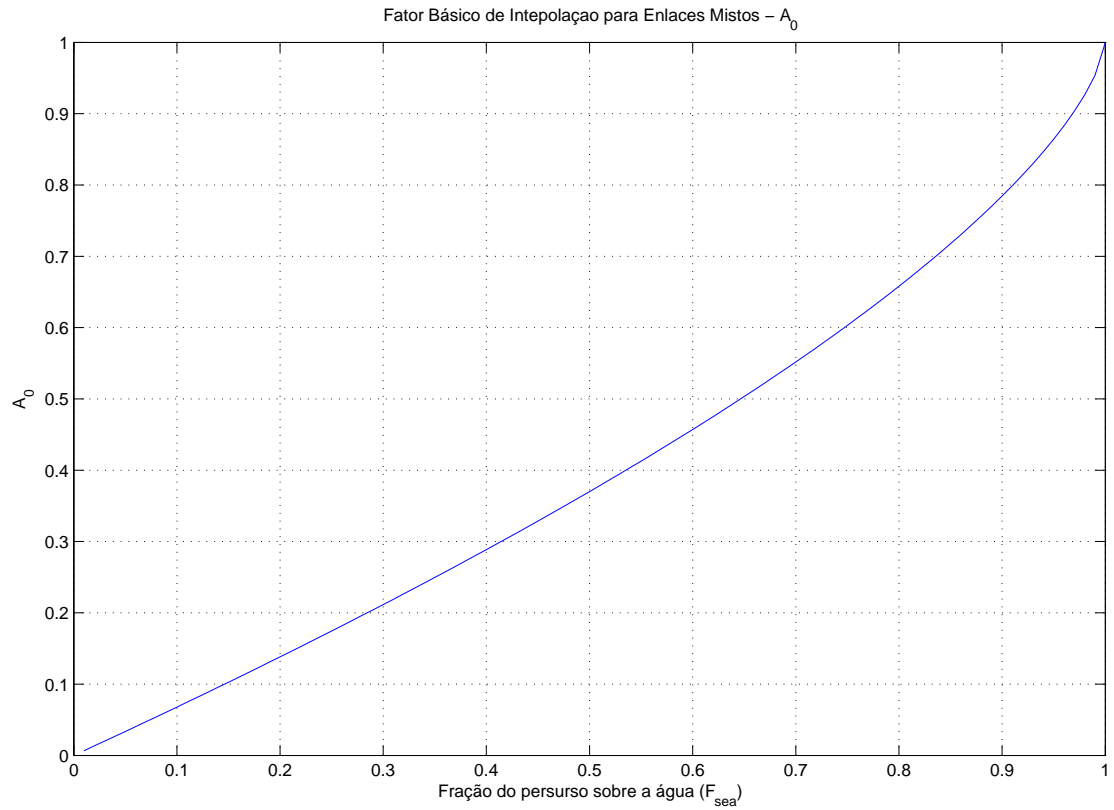


Figura 2.17: Fator Básico de Interpolação A_0 .

obtenção da fração total do percurso que se encontra sobre a água (F_{sea}), ou seja:

$$F_{sea} = \frac{d_{ST}}{d}, \quad (2.30)$$

onde d_{ST} é o comprimento total do enlace que se encontra sobre a água e d é o comprimento total do enlace. O fator de interpolação para percursos mistos é definido como [6]:

$$A = A_0(F_{sea})^V, \quad (2.31)$$

onde $A_0(F_{sea})$ é o fator básico de interpolação, definido analiticamente por

$$A_0(F_{sea}) = 1 - (1 - F_{sea})^{2/3}. \quad (2.32)$$

A Fig. 2.17 apresenta o comportamento de $A_0(F_{sea})$.

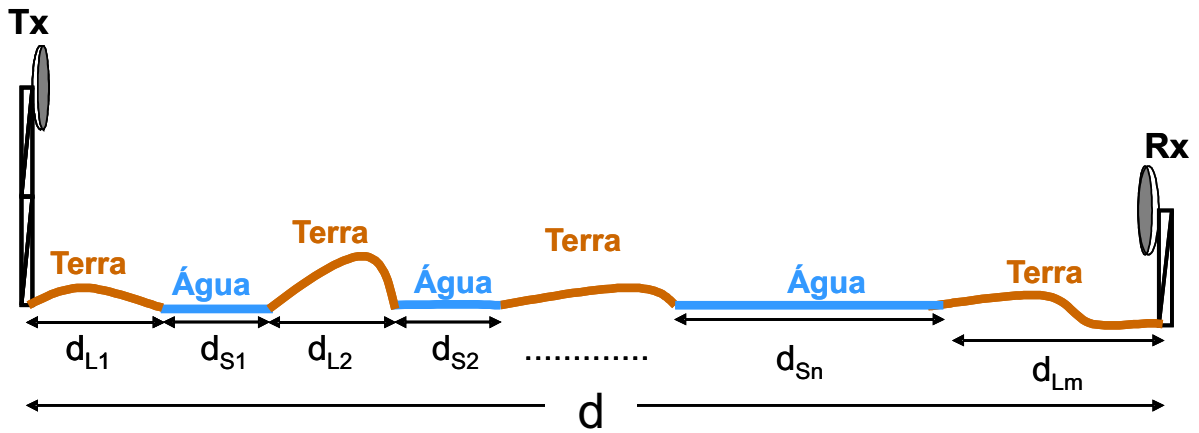


Figura 2.18: Exemplificação de percurso sobre terreno misto.

O cálculo de V da Eq.(2.31) é feito através da expressão:

$$V = \max \left[1; 1 + \frac{\Delta}{40} \right], \quad (2.33)$$

onde Δ é expresso como

$$\Delta = \sum_{n=1}^{N_s} E_{S_n}(d) \frac{d_{S_n}}{d_{ST}} - \sum_{m=1}^{M_l} E_{L_m}(d) \frac{d_{L_m}}{d_{LT}}, \quad (2.34)$$

N_s e M_l são os totais de zonas sobre a água e sobre a terra, respectivamente, $n(= 1, 2, \dots, N_s)$ e $m(= 1, 2, \dots, M_l)$ são os índices que indicam a zona sobre a água e sobre a terra em questão, respectivamente, d_{S_n} é o comprimento total do percurso n , d_{L_m} é o comprimento total do percurso m , $E_{S_n}(d)$ e $E_{L_m}(d)$ representam a intensidade de campo (em $dB\mu V/m$) para o comprimento d , considerando o percurso puramente sobre a água e puramente sobre a terra, respectivamente, e d_{ST} e d_{LT} representam o comprimento total do enlace sobre a água e sobre a terra, respectivamente, dados por Eq.(2.35) e Eq.(2.36).

$$d_{LT} = d_{L1} + d_{L2} + \dots + d_{L_{M_l}} = \sum_{i=1}^{M_l} d_{L_i} \quad (2.35)$$

$$d_{ST} = d_{S1} + d_{S2} + \dots + d_{S_{N_s}} = \sum_{j=1}^{N_s} d_{S_j} \quad (2.36)$$

Algumas dessas variáveis são ilustradas na Fig. 2.18.

A partir da versão da Recomendação ITU-R P.1546 de agosto de 2005, são também considerados terrenos mistos os enlaces que atravessam diferentes zonas de propagação [6, Anexo 5, Seção 8]. Nesse caso, entende-se como zonas de propagação os percursos que possuem características específicas de propagação. Um enlace pode possuir, por exemplo, três sub-percursos sobre a água, mas todos eles pertencendo a apenas uma zona de propagação. Geralmente, os percursos com diferentes zonas de propagação necessitam da correção aplicada na base tabular devido a diferença do índice de refração local discutida na Seção 2.3. Um enlace que parte do sul da Europa até o norte da África e atravessa zonas de índice de refração muito distintas é um exemplo de tal ocorrência. Para o cálculo de cobertura nesses casos, onde pode ou não haver interfaces água/terra, a ITU-R P.1546 apresenta uma metodologia alternativa [6, Anexo 5, Seção 8].

Para enlaces em que as zonas de propagação presentes não são do mesmo tipo e que não envolvem transições terra/água (ou terra/zonas costeiras), o procedimento para o cálculo de intensidade de campo é:

$$E = \sum_i \frac{d_i}{d} E_i(d) \quad (2.37)$$

onde E é a intensidade de campo para o percurso misto, $E_i(d)$ é a intensidade de campo para a zona i na distância total do enlace em questão d , e d_i é o comprimento do enlace sobre a zona i .

Nos casos em que o enlace apresenta zonas de propagação com apenas uma única categoria sobre a terra e uma única categoria de zona de propagação sobre a água, a Eq.(2.29) deve ser usada. Nos casos em que o enlace engloba uma combinação de três ou mais zonas de propagação envolvendo, no mínimo, uma interface terra/água ou terra/zona costeira, utiliza-se a seguinte expressão:

$$E = (1 - A) \frac{\sum_{i=1}^{n_l} d_i E_{land,i}}{d_{lT}} + A \frac{\sum_{j=1}^{n_s} d_j E_{sea,j}}{d_{sT}}, \quad (2.38)$$

onde E , $E_{land,i}$ e $E_{sea,j}$ são as intensidades de campo para o caminho misto total, para a i -ésima zona sobre a terra e para a j -ésima zona sobre a água, respectivamente, A é o fator

de interpolação da Eq.(2.31), d_i e d_j são os comprimentos do percurso sobre a terra e a água, respectivamente, d_{LT} é o total do percurso sobre a terra e d_{ST} é o total do percurso sobre a água.

Uma observação bastante importante é que a ITU-R P.1546 não apresenta um método especial para o cálculo de enlaces sobre água doce (lagos, rios, etc.). Todo o método descrito até agora para cálculo de cobertura sobre caminhos mistos considera os percursos formados por terra e água salgada. No contexto do planejamento internacional de cálculo de cobertura, foi acordado que enlaces sobre água doce devem ser tratados como enlaces puramente sobre a terra, com exceção do mar Cáspio. Dessa forma, os casos do Mar de Vitória na África e até mesmo em grandes rios (como o rio Amazonas) devem ser tratados, em tese, como enlaces sobre terra. A utilização do método apresentado aqui de caminhos mistos para água salgada aplicado também a enlaces sobre água doce deve ser cautelosa, pois o resultado obtido deve ser considerado uma aproximação.

2.11 Perda Correspondente

A Recomendação ITU-R P.1546 retorna um valor de intensidade de campo elétrico (em $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$). Como utiliza-se mais comumente uma referência de potência, é interessante converter o valor de intensidade de campo fornecido como variável de saída pela Recomendação ITU-R P.1546 para um valor correspondente de atenuação em dB, o que facilitará a utilização e comparação com outros métodos. A atenuação A , em decibéis, é definida como:

$$A = P_T - P_R, \quad (2.39)$$

onde P_T é a potência transmitida (em dBW) e P_R é a potência recebida (em dBW).

Para o cálculo da potência transmitida P_T , tem-se uma E.R.P. de 1 kW (transmissor de potência de 1 kW acoplado perfeitamente a um dipolo de meia-onda). Como discutido na Seção 2.2, essa E.R.P de 1 kW equivale a uma E.I.R.P de 1,633 kW. Assim:

$$P_T = 10 \log \left(\frac{1663W}{1W} \right) = 32,13 \quad \text{dBW}. \quad (2.40)$$

A potência recebida pela antena receptora é:

$$P_R = 10 \log \left(\frac{|E|^2}{\eta} A_{ef} \right) \quad \text{dBW}, \quad (2.41)$$

onde η a impedância intrínseca do espaço livre ($120\pi\Omega$), $|E|$ é o valor *rms* do campo elétrico (em V/m),

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D \quad (2.42)$$

é a área efetiva de recepção em m^2 , λ é o comprimento de onda em m e D é a diretividade da antena receptora (igual 1 dBi).

Substituindo (2.42) em (2.41), tem-se:

$$\begin{aligned} P_R &= 10 \log \left(\frac{|E|^2}{\eta} \right) + 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = \\ &= 20 \log(|E|[V/m]) + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi\eta} \right) + 20 \log(\lambda) = \\ &= 20 \log(|E|[\mu V/m]10^{-6}) - 36,75 - 20 \log \left(\frac{f}{c} \right) = \\ &= 20 \log(|E|[\mu V/m]) - 120 - 36,75 + 169,54 - 20 \log(f) = \\ &= 20 \log(|E|[\mu V/m]) - 20 \log(f) + 12,79, \end{aligned} \quad (2.43)$$

onde f é a frequência em hertz e c é velocidade da luz no vácuo (em m/s). Substituindo a Eq.(2.40) e a Eq.(2.43) na Eq.(2.39), tem-se:

$$\begin{aligned} A &= 32,13 - 12,79 + 20 \log(f[MHz]10^6) - 20 \log(|E|[\mu V/m]) = \\ &= 19,34 + 20 \log(f[MHz]) + 120 - 20 \log(|E|[\mu V/m]) = \\ &= 139,34 + 20 \log(f[MHz]) - 20 \log(|E|[\mu V/m]) \end{aligned} \quad (2.44)$$

O termo $20 \log(|E|[\mu V/m])$ é exatamente o campo fornecido pela ITU-R P.1546. Logo, pode-se obter a atenuação correspondente baseado no campo de saída da ITU-R P.1546, através da Eq.(2.44).

2.12 Outras Correções da ITU-R P.1546

A Recomendação ITU-R P.1546 possui outras correções que precisam ser adicionadas ao valor de intensidade de campo baseadas na diferença de frequência e distância entre as medidas da base tabular e o valor real do enlace analisado. Como essas correções são de simples aplicação, não será desenvolvida a fórmula de cálculo, que pode ser encontrada na ITU-R P.1546 [6, Anexo 5, Seções 5 e 6].

O procedimento completo de aplicação da ITU-R P.1546, que inclui a explicação detalhada da ordem em que as interpolações/extrapolações devem ser feitas, encontra-se em [6, Anexo 6].

2.13 Caso de Estudo

Nesta seção, serão apresentados alguns resultados de medições realizadas em Belo Horizonte, MG, em comparação com a ITU-R P.1546 e o modelo de Okumura-Hata [5]. A frequência de operação foi de 1809,2 MHz e as medições foram realizadas nas proximidades da lagoa da Pampulha em um ambiente predominantemente suburbano.

A área onde foram realizadas as medições, bem como a avenida percorrida pelo receptor, são ilustradas na Fig. 2.19. A estação transmissora fornece uma EIRP de 57,5 dBm. As alturas da antena transmissora e de recepção são $h_T = 18,9$ m e $h_R = 2,0$ m, respectivamente. Como se pode observar na Fig. 2.19, inicialmente o enlace é totalmente sobre a terra. O trajeto começa a tornar-se misto (isto é, com parte do enlace de rádio sobre a lagoa) quando $d \approx 1440$ m. A antena transmissora é uma antena comercial de 17,5 dB de diretividade máxima no lóbulo principal, apresentando uma forte atenuação com a mudança de posição do receptor. A antena receptora é um dipolo de meia onda. As medidas foram registradas para cada 1 m, iniciando-se a uma distância $d \approx 1225$ m para o ponto inicial e $d \approx 1600$ m para o final (Fig. 2.19). Foram realizadas medições em 293 pontos e as médias locais foram calculadas somando-se 10 valores consecutivos a cada 10 m, com o intuito da retirada do desvanecimento rápido.

Essas médias são comparadas com a predição de cobertura fornecida pela ITU-R

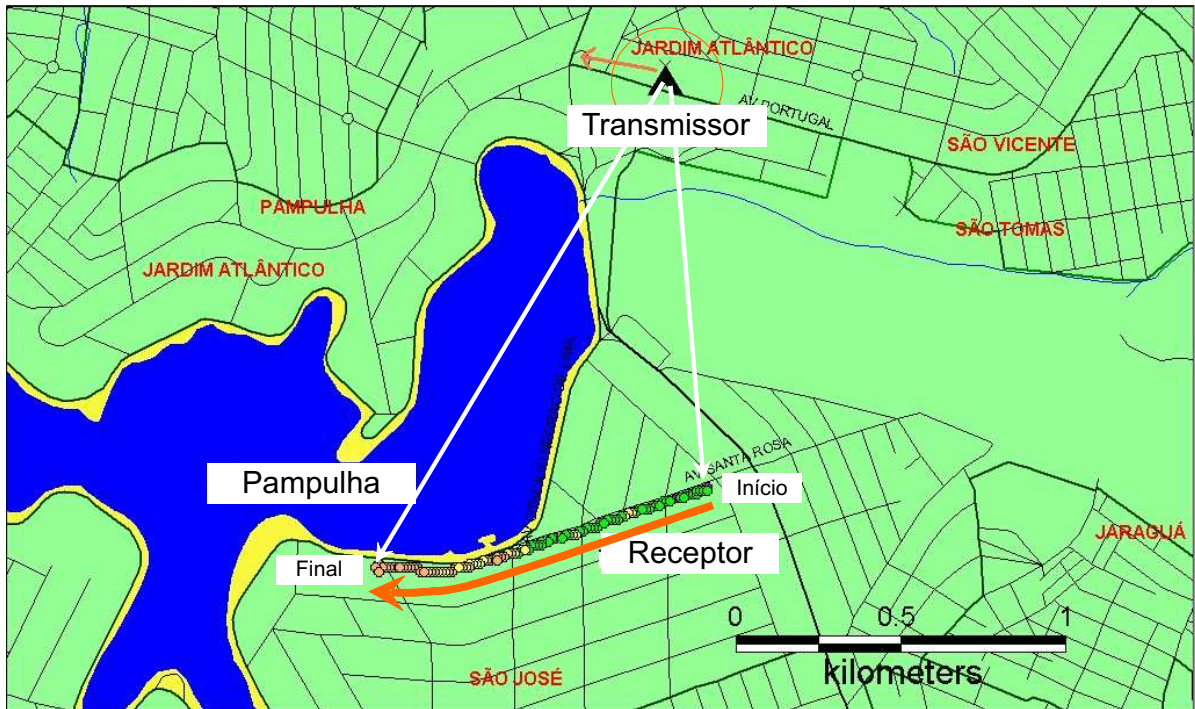


Figura 2.19: Mapa de localização.

P.1546, assumindo o enlace completamente sobre a terra (como, em princípio, a ITU-R P.1546 [6] assume), assumindo caminho misto (como se a lagoa fosse composta de água morna do mar) e o modelo de Okumura-Hata [5]. É importante ressaltar que o modelo de Hata para ambientes suburbanos é utilizado para o cálculo, através da Eq.(2.45) mostra a equação para o cálculo da atenuação correspondente:

$$A_{Suburbano} = 69.55 + 26.16 \log(freq) - 13.82 \log(h_T) - a_{Grande Cidade} + (44.9 - 6.55 \log(h_T)) \log(dist_{km}) - 5.4 - 2(\log(freq/28))^2, \quad (2.45)$$

onde $freq$ é a frequência central do sinal transmitido, h_T é a altura do mastro da antena transmissora, $dist_{km}$ é a distância entre o transmissor e receptor em quilômetros e $a_{Grande Cidade}$ é dada por

$$a_{Grande Cidade} = 3.2(\log(11.75h_R))^2 - 4.97 \quad (2.46)$$

A atenuação obtida a partir das medidas comparada aos três modelos da predição de cobertura citados anteriormente são apresentadas na Fig. 2.20 em função de d . Uma

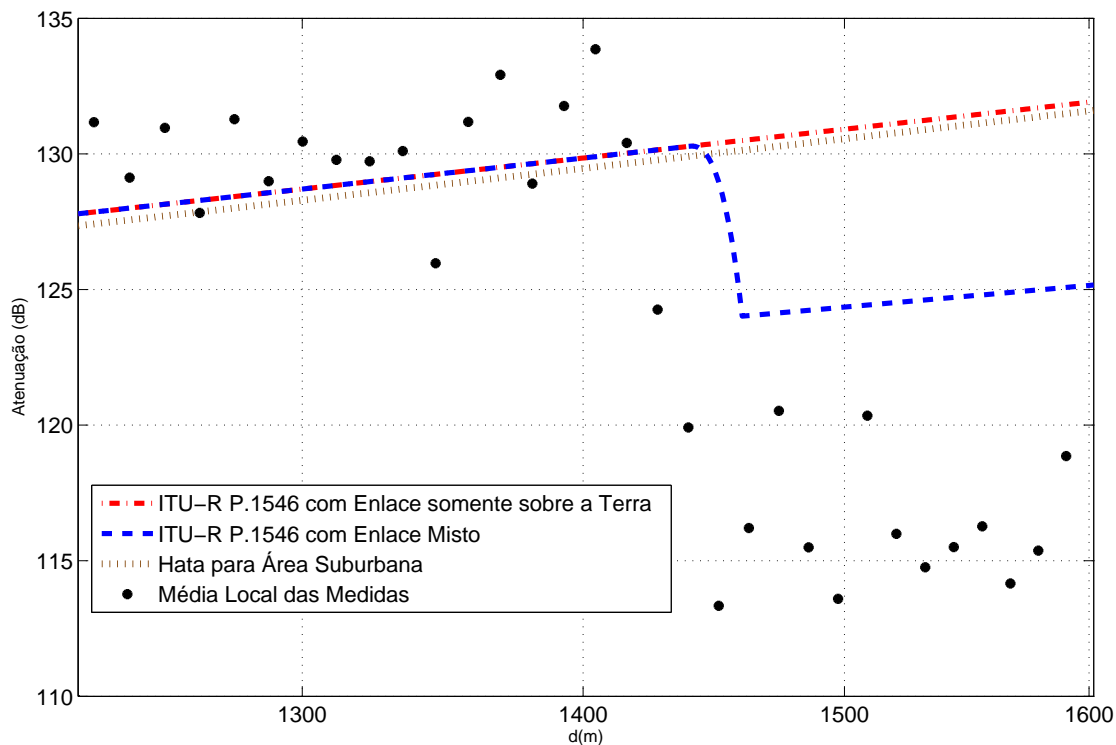


Figura 2.20: Comparação entre medidas, ITU-R P.1546 original aplicada para Enlaces somente sobre a terra e enlaces sobre caminhos mistos e modelo de Okumura-Hata.

observação muito importante é que, inicialmente, o enlace é totalmente sobre a terra. O trajeto começa a tornar-se misto (isto é, com parte do enlace de rádio sobre a lagoa) quando $d \approx 1440$ m.

Analisando-se os dados, para o percurso completamente sobre a terra, ou seja, $d < 1440$ m, a ITU-R P.1546 em comparação com a média local das medidas apresenta um erro médio ($\bar{\varepsilon}$) de $-0,87$ dB com um desvio-padrão (σ) de $2,36$ dB. O erro médio entre as medidas e o modelo de Hata é de $\bar{\varepsilon} = -1,3$ dB com desvio padrão $\sigma = 2,37$ dB.

Considerando-se somente a parte do percurso misto, ou seja, para $d > 1440$ m, a ITU-R P.1546 para enlaces completamente sobre a terra apresenta $\bar{\varepsilon} = 14,9$ dB e $\sigma = 2,28$ dB. A ITU-R P.1546 aplicada como se a lagoa fosse composta por água do mar (morna) apresenta $\bar{\varepsilon} = 8,75$ dB e $\sigma = 2,95$ dB.

Tais resultados podem ser associados a diversas características, como componentes

de multipercursos, morfologia não-homogênea do terreno, e muitos outros fatores. Na Fig. 2.20 pode-se observar claramente uma diminuição de aproximadamente 15 dB na atenuação do sinal após $d > 1440$ m (caminho misto). Isto é obviamente justificado pela reflexão na água.

Da Fig. 2.20 observa-se também que para $d < 1440$ m a Recomendação ITU-R P.1546 e o modelo de Okumura-Hata fornecem basicamente as mesmas previsões, que são aproximadamente iguais a média da atenuação medida. Entretanto, para $d > 1440$ m, a atenuação do sinal medido apresenta uma variação bastante acentuada, não sendo acompanhada pela correção de terreno misto proposta pela Recomendação ITU-R P.1546 [6]. Tal fato é a principal motivação para a proposta de cálculo de cobertura para terrenos mistos curtos que será apresentada em detalhes no próximo capítulo.

Capítulo 3

Uma Nova Abordagem para o Tratamento de Enlaces sobre Terrenos Mistos

Como foi discutido no Capítulo 1, deseja-se aplicar a Recomendação ITU-R P.1546 para a predição da cobertura de sistemas sem fio nas faixas de VHF e UHF (30 MHz a 3 GHz) para distâncias relativamente curtas (até 20 km). Entretanto, sabe-se que tal recomendação fornece um tratamento bastante questionável para enlaces sobre terrenos mistos, como foi mostrado caso de estudo da Seção 2.13. Assim, nosso objetivo é apresentar uma melhoria para tal tratamento baseada em introspecções físicas, mais precisamente na intersecção do primeiro elipsóide de Fresnel com o perfil do terreno. Os resultados obtidos deste modelo serão comparados àqueles da Recomendação original ITU-R P.1546, o modelo de Okumura-Hata, e medidas realizadas na frequência de 1809,2 MHz em torno da lagoa da Pampulha em Belo Horizonte.

É importante ressaltar as limitações de aplicabilidade da nova abordagem que será apresentada. Só é válida para percursos curtos (até 20 km), mistos e com visada direta. Outra limitação se refere às frequências mais baixas. Deve-se ter um certo cuidado ao aplicar a nova abordagem, pois a onda de superfície que predomina em comunicações sem fio desse tipo é desconsiderada, o que pode tornar o resultado obtido incorreto.

3.1 Percursos sobre Terrenos Mistos

A Recomendação ITU-R P.1546 fornece uma correção para o tratamento de enlaces sobre terrenos mistos, isto é, perfis do terreno compostos parcialmente da terra (seca) e por água [6, anexo 5]. A correção depende essencialmente da percentagem do terreno que corresponde à terra ou à água, como discutido na Seção 2.10. Essas frações se referem ao enlace completo (isto é, de uma antena à outra) e tal fato desperta alguns questionamentos, como, por exemplo, o fato de que, para percursos relativamente curtos e sem obstrução, é sabido que as maiores contribuições associadas ao espalhamento no solo vêm da região próxima *ao ponto especular*. Geralmente, tal região é definida simplesmente pela intersecção do primeiro elipsóide de Fresnel (neste caso, correspondendo à radiação da antena transmissora em direção à imagem da antena de recepção) com o perfil do terreno. Será apresentada na próxima seção uma nova abordagem para o cálculo de terrenos mistos que levará em consideração o fato aqui exposto.

3.2 Uma nova formulação para o tratamento de terrenos mistos

Para enlaces de rádio com distâncias relativamente curtas e com visada direta, a aproximação adotada é relativamente simples. Ao invés de considerar o perfil completo do terreno entre as antenas, somente será levada em consideração para o cálculo das percentagens mencionadas na Seção 2.10 a parte do percurso que corresponde à intersecção entre o primeiro elipsóide de Fresnel e o perfil do terreno. Para isso, o solo é aproximado pelo seu plano equivalente e o elipsóide é definido pela antena transmissora (em um dos focos) e pela imagem da antena de recepção (no outro foco), como mostrado na Fig. 3.1. A posição relativa do início e fim da interface terra/água deve ser conhecida, representadas respectivamente por, x'_{LW} e x'_{WL} e ilustradas na Fig. 3.1.

Da Fig. 3.1 e das propriedades do primeiro elipsóide de Fresnel, pode-se mostrar

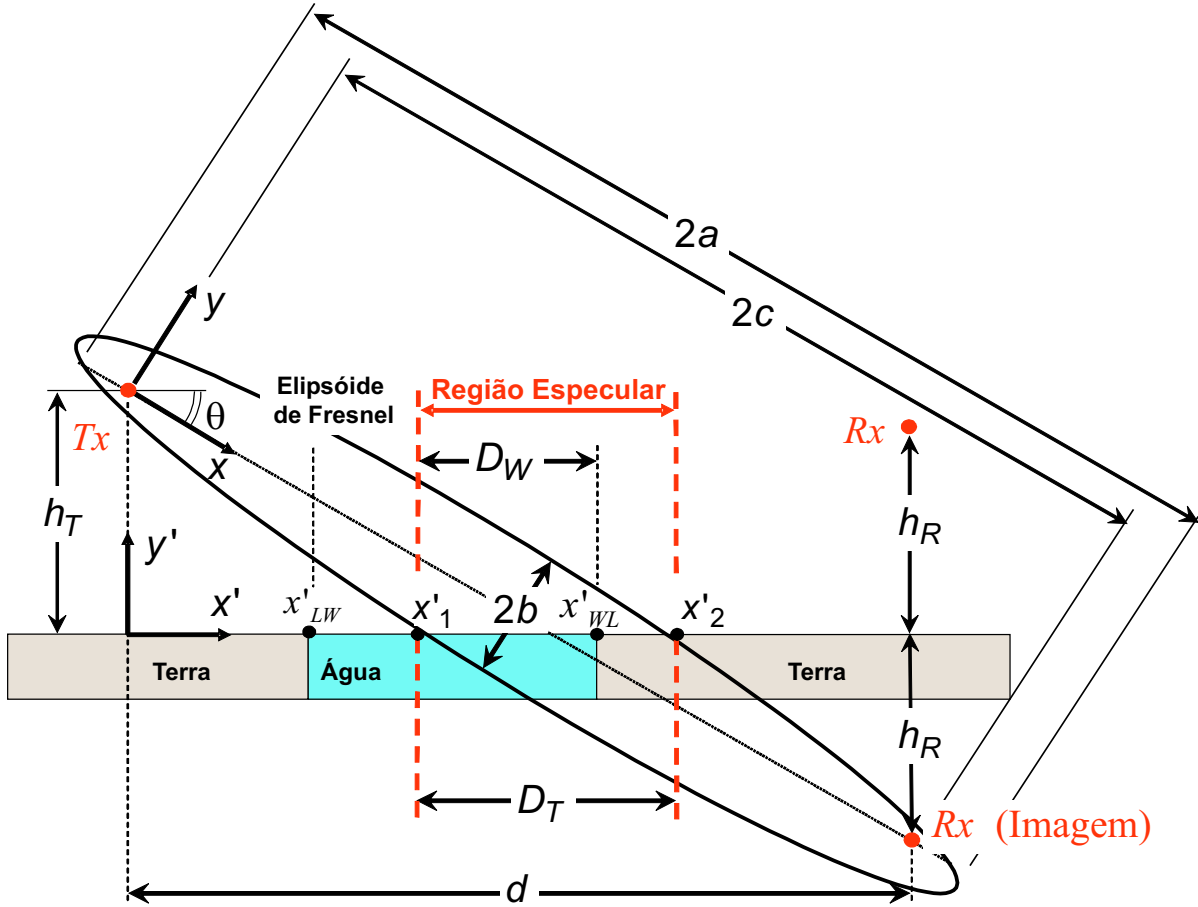


Figura 3.1: Geometria de análise de percursos mistos.

que [4]:

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{b^2 + c^2}, \\
 b &= \sqrt{\frac{\lambda c}{2}}, \\
 2c &= \sqrt{d^2 + (h_T + h_R)^2},
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde λ é o comprimento de onda, $2a$ e $2b$ são os comprimentos dos eixos maior e menor do elipsóide, respectivamente, $2c$ é a distância inter-focal do elipsóide, e h_T e h_R são as alturas das antenas transmissora e receptora, respectivamente. Analisando a figura, pode-se observar que a percentagem de água que contribui para a reflexão, apenas considerando

a intersecção entre o perfil de relevo e o elipsóide de Fresnel, é dada pela razão

$$P = \frac{D_W}{D_T}, \quad (3.2)$$

onde D_T é o comprimento do terreno interceptado pelo elipsóide e D_W é a porção de D_T correspondendo à parte sobre a água. Os comprimentos D_T e D_W podem ser calculados com o auxílio da equação da elipse, dada por:

$$\frac{(x - c)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (3.3)$$

onde os parâmetros pertinentes são como ilustrados na Fig. 3.1. Entretanto, o sistema de coordenadas x, y não é apropriado para definir D_T e D_W utilizadas na Eq.(3.2). Por esse motivo, será utilizado o sistema de coordenadas auxiliar x', y' , que se relaciona ao sistema x, y por:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \theta - (y' - h_T) \operatorname{sen} \theta, \\ y &= x' \operatorname{sen} \theta + (y' - h_T) \cos \theta, \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde

$$\begin{aligned} \cos \theta &= d/(2c), \\ \operatorname{sen} \theta &= (h_T + h_R)/(2c), \end{aligned} \quad (3.5)$$

e os outros parâmetros importantes estão ilustrados na Fig. 3.1.

Substituindo Eq.(3.1) e Eq.(3.4) na Eq.(3.3), a equação da elipse pode ser reescrita como:

$$\frac{[x' \cos \theta - (y' - h_T) \operatorname{sen} \theta - c]^2}{c(c + \lambda/2)} + \frac{[x' \operatorname{sen} \theta + (y' - h_T) \cos \theta]^2}{(\lambda c/2)} = 1. \quad (3.6)$$

Finalmente, da Fig. 3.1, pode-se observar que a coordenada x' , correspondendo à intersecção do elipsóide de Fresnel com o perfil de relevo, é obtida fazendo-se $y' = 0$ na Eq.(3.6), ou seja:

$$\frac{(x' \cos \theta + h_T \operatorname{sen} \theta - c)^2}{c(c + \lambda/2)} + \frac{(x' \operatorname{sen} \theta - h_T \cos \theta)^2}{(\lambda c/2)} = 1, \quad (3.7)$$

obtendo para x' na Eq.(3.7):

$$\begin{aligned} x'_1 &= \frac{\left[c(\lambda + 2h_T \operatorname{sen}\theta) \cos \theta - \sqrt{\lambda(2c + \lambda)(2c h_T \operatorname{sen}\theta + \lambda c/2 - h_T^2)} \right]}{(\lambda + 2c \operatorname{sen}^2\theta)}, \\ x'_2 &= \frac{\left[c(\lambda + 2h_T \operatorname{sen}\theta) \cos \theta + \sqrt{\lambda(2c + \lambda)(2c h_T \operatorname{sen}\theta + \lambda c/2 - h_T^2)} \right]}{(\lambda + 2c \operatorname{sen}^2\theta)}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

e, conseqüentemente,

$$D_T = x'_2 - x'_1 = \frac{2\sqrt{\lambda(2c + \lambda)(2c h_T \operatorname{sen}\theta + \lambda c/2 - h_T^2)}}{\lambda + 2c \operatorname{sen}^2\theta}. \quad (3.9)$$

Como, na prática, $c \gg \lambda$, a Eq.(3.9) pode ser simplificada:

$$D_T \approx \frac{2\sqrt{\lambda c(4c h_T \operatorname{sen}\theta + \lambda c - 2h_T^2)}}{\lambda + 2c \operatorname{sen}^2\theta}. \quad (3.10)$$

Uma vez que as coordenadas x'_1 e x'_2 são conhecidas em conjunto com o relevo analisado, o cálculo de D_W e, conseqüentemente, P é trivial.

Utilizando a mesma idéia da Recomendação ITU-R P.1546, já apresentada na Eq.(2.29), a intensidade do campo na localização da antena de recepção é dada por:

$$E = (1 - P) E_{land} + P E_{sea}, \quad (3.11)$$

onde E_{land} e E_{sea} são calculados de acordo com [6] enquanto P é obtido pela Eq.(3.2). Da equação acima pode-se observar que, como $P \leq 1$ e $E_{land} < E_{sea}$, $E_{land} \leq E \leq E_{sea}$.

A formulação aqui apresentada foi exposta para o caso onde há apenas uma porção de terreno misto dentro do percurso do enlace. Porém, ela pode ser estendida para o caso do enlace possuir (dentro de seu comprimento total) mais de um percurso misto. Nesse caso, deve-se calcular o valor de P levando-se em conta a presença de todos os percursos mistos no enlace dentro da primeira zona de Fresnel definida anteriormente. Com o valor de P calculado, o procedimento para a obtenção da intensidade de campo final é análogo ao caso onde há somente um percurso misto na comprimento total do enlace.

3.3 Caso de Estudo

Nesta seção, será retomada a análise do caso de estudo apresentado na Seção 2.13, onde foram confrontadas medidas de campo, a formulação original da ITU-R P.1546 considerando percurso misto e enlaces somente sobre a terra e o modelo de cobertura de Okumura-Hata [5] para áreas suburbanas. Nesse momento, a nova abordagem apresentada na Seção 3.2 é aplicada para predizer a cobertura no mesmo caso já analisado.

Na Fig. 2.19 foi apresentada a área onde foram realizadas as medidas. A antena transmissora tem altura $h_T = 18,9$ m e a antena de recepção $h_R = 2,0$ m. Observando a Fig. 2.19, o comprimento total do enlace, d , varia de acordo com a posição do receptor, iniciando-se em $d \approx 1225$ m e $d \approx 1600$ m para o final do percurso.

Como mostrado na Seção 2.13, a Recomendação ITU-R P.1546 para enlaces sobre a terra e o modelo de Hata fornecem basicamente previsões similares, que são aproximadamente iguais a média do sinal medido. No entanto, para $d > 1440$ m, a melhoria discutida em Seção 3.2 inicia sua ação, fornecendo resultados distintos quando comparada aos modelos originais da ITU-R P.1546 para a terra e para caminhos mistos e o modelo de Okumura-Hata. Analisando a a forma do ambiente das medições com a posição do receptor (no que se refere à proporção sobre a terra e sobre a água), observa-se que para $d > 1440$ m, a parte do enlace que se situa sobre a água cresce muito rapidamente. A nova abordagem apresentada foi capaz de acompanhar tal transição rápida, ao contrário da Recomendação ITU-R P.1546 para caminhos mistos, que apresenta uma variação não muito brusca. Dessa forma, o modelo aqui proposto foi capaz de predizer com boa exatidão o nível médio de intensidade obtida a partir dos dados medidos, enquanto as previsões usuais da ITU-R P.1546 original e de Okumura-Hata permaneciam aproximadamente 15 dB abaixo das medições.

Como já mencionado na Seção 2.13, o erro médio ($\bar{\epsilon}$) e o desvio padrão (σ), analisando-se apenas a parte do percurso misto, ou seja, para $d > 1440$ m, para a ITU-R P.1546 para enlaces completamente sobre a terra são $\bar{\epsilon} = -14,9$ dB e $\sigma = 2,28$ dB. A ITU-R P.1546 original aplicada para percursos mistos apresenta $\bar{\epsilon} = -8,72$ dB e $\sigma = 2,95$ dB.

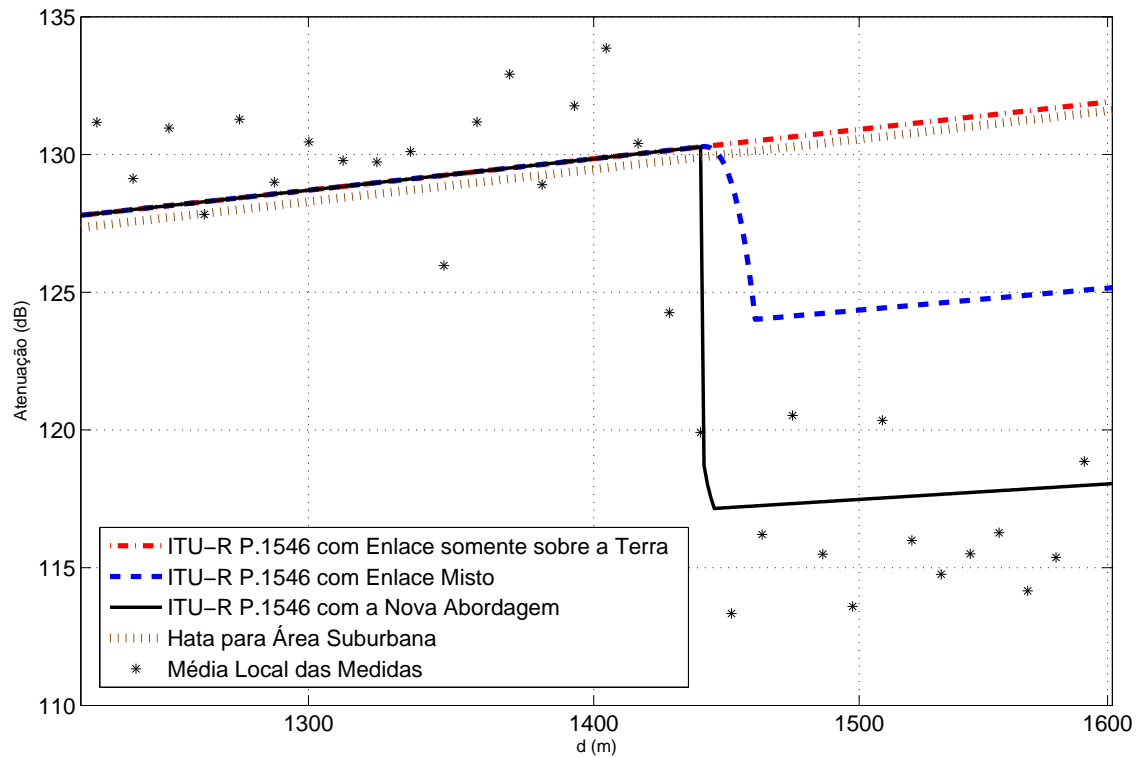


Figura 3.2: Comparação entre Okumura-Hata, medições, ITU-R P.1546 original aplicada para Enlaces somente sobre a terra, ITU-R P.1546 original aplicada para enlaces sobre caminhos mistos e a ITU-R P.1546 com a nova abordagem proposta.

Para a ITU-R P.1546 com a nova abordagem, o erro foi de apenas $\bar{\varepsilon} = -1,40$ dB, com desvio-padrão de $\sigma = 2,26$ dB, mostrando um comportamento médio similar às medições. O modelo de Hata aplicado a percursos predominantemente suburbanos apresentou $\bar{\varepsilon} = -14,59$ dB e $\sigma = 2,28$ dB. A Fig. 3.2 apresenta graficamente a comparação dos modelos de propagação.

Na Fig. 3.3 pode-se observar a comparação entre a atenuação medida e atenuação predita para ITU-R P.1546 original aplicada a caminhos mistos e a ITU-R P.1546 com a nova abordagem proposta. Observa-se que a reta de 45° de referência encontra-se mais próxima da recomendação com a nova abordagem, enquanto a ITU-R P.1546 original apresenta um comportamento marginal. Os histogramas do erro absoluto entre as medidas e as predições podem ser observados nas Figs 3.4 e 3.5. Através desses histogramas, pode-

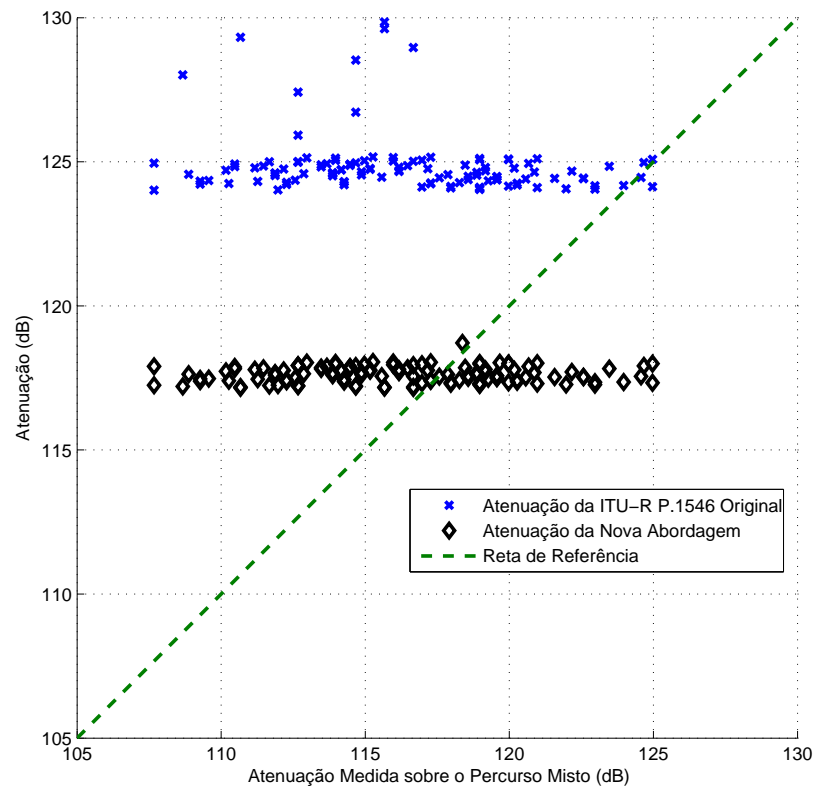


Figura 3.3: Comparação das Atenuações da ITU-R P.1546 Original para caminhos mistos e da Atenuação da Nova Abordagem x Atenuação Medida.

se observar o comportamento aproximadamente normal dos erros médios, mostrando que as medições não foram tendenciosas.

Obviamente, o caso apresentado aqui não é suficiente para assegurar completamente a utilidade do modelo proposto. Mais testes ainda são necessários. Mas pode-se claramente observar pela Fig. 3.2 que o tratamento de percursos mistos sugerido na recomendação original ITU-R P.1546 não é apropriado para os cenários similares aos da Fig. 2.19. No próximo capítulo será analisado outro caso de estudo, realizado em Brasília-DF, juntamente com *software* utilizado para a simulação. Pretende-se buscar mais uma confirmação da validade da proposta de melhoria aqui apresentada.

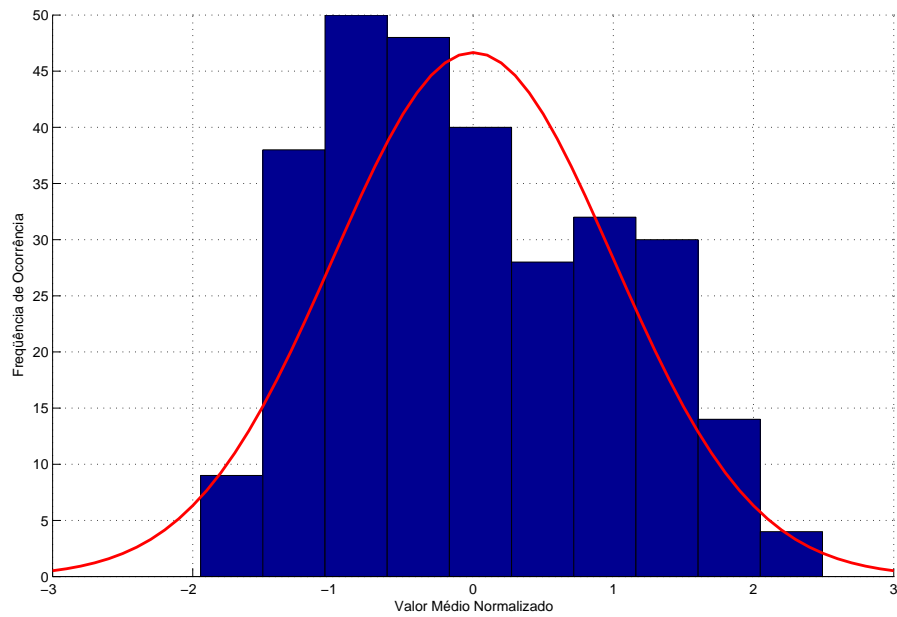


Figura 3.4: Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo previsto pela ITU-R P.1546 original.

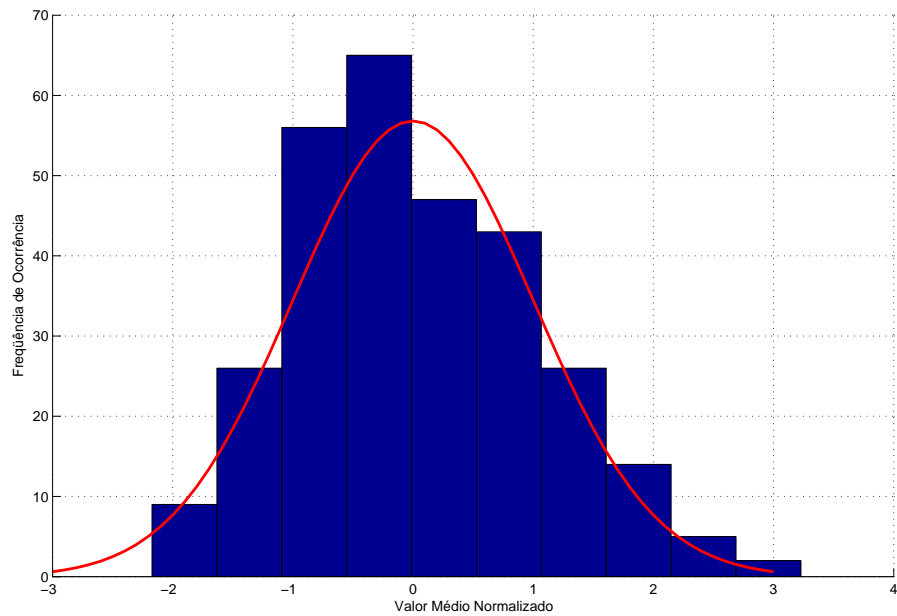


Figura 3.5: Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo previsto pela Nova abordagem.

Capítulo 4

Software para Predição de Cobertura e Estudo de Caso em Brasília

Neste capítulo será apresentado um *software* de predição de cobertura que implementa a ITU-R P.1546 e a nova abordagem mostrada na Seção 3.2. Também será analisado um estudo de caso similar ao apresentado nas Seções 3.3 e 2.13, baseado em medições realizadas em Brasília-DF na frequência de 856,039 MHz. Esses resultados serão confrontados com a ITU-R P.1546 aplicada da forma original e também com a nova abordagem para enlaces curtos sobre terrenos mistos apresentada no Capítulo 3.

4.1 *Software - Coverage Predictor - CoP*

Em 2003, a ITU-R P.1546 foi implementada pelo autor na linguagem de programação Java, durante um trabalho realizado na empresa alemã SWR - Südwestrundfunk, para a predição de cobertura baseada em informações detalhadas do terreno no sudoeste alemão, mais especificamente na região de Baden-Württemberg. Nessa ocasião, utilizou-se a linguagem Java por sua característica de independência em relação a plataforma utilizada, no caso, UNIX/Linux.

O *software* agora implementado, batizado de *Coverage Predictor*, ou CoP, foi desenvolvido em parceria com a MOTOROLA e a Universidade de Brasília - UnB, a partir daquela versão já implementada da ITU-R P.1546. Porém, foram incorporadas novas ca-

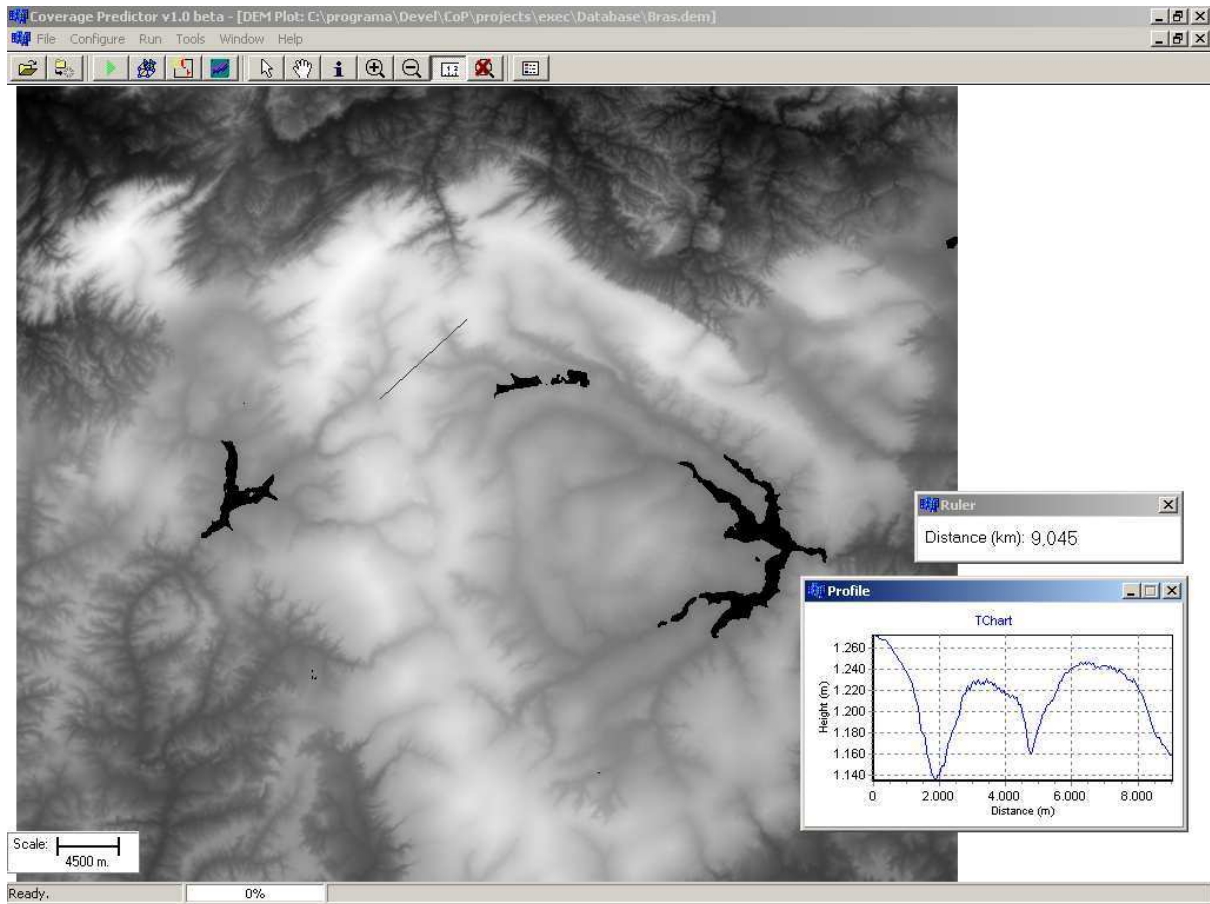


Figura 4.1: Tela principal do CoP mostrando o relevo digitalizado da cidade de Brasília-DF e janela auxiliar de visualização do perfil de relevo em corte.

racterísticas e funções, como a possibilidade de receber medidas de campo, compará-las com outros métodos de predição de cobertura, realizando cálculos a partir de informações detalhadas do perfil de relevo e a implementação de outros modelos de cobertura.

Para a utilização do *software*, deve-se primeiramente carregar o arquivo com informações de relevo onde deseja-se utilizar as funcionalidades disponíveis. Na Fig 4.1 pode-se observar a tela principal do CoP mostrando o relevo digitalizado da região da cidade de Brasília-DF, neste caso exemplificado, com uma resolução de 100 m, de onde são retiradas as informações da altitude dos obstáculos. Os diversos tons de cinza simbolizam os diversos níveis de altitude do relevo. Com a função de régua, mostrada na janela auxiliar à direita da Fig 4.1, pode-se observar um corte do perfil de relevo. O mapa apresentado

não possui informações vetoriais como *clutter*, vegetação, estradas, etc.

Antes de proceder com a predição de cobertura propriamente dita, é necessário, primeiramente, escolher o modelo de predição desejado, como pode ser ilustrado na Fig. 4.2. Os dados de entrada, como frequência, potência de transmissão, altura dos mastros das antenas transmissoras e receptoras, tipo de área de recepção, dentre outros, também são necessários, como ilustrado na Fig. 4.3. É importante ressaltar que o CoP considera como premissa que todo o cálculo de cobertura irá supor a presença de um único *clutter*. Caso co-existam, no mesmo perfil de relevo, diversos *clutters* diferentes, uma nova predição precisará ser feita para cada um. Através do CoP também é possível carregar um arquivo com o diagrama de radiação exato para a antena em questão, como ilustrado na Fig. 4.4. Esse diagrama foi obtido numericamente através da aplicação do Método dos Momentos [22], visto que a antena foi posicionada muito próxima ao mastro de suporte, também constituído de metal, o que perturba o diagrama de radiação fornecido pelo fabricante. O diagrama apresentado refere-se ao plano horizontal.

A Fig. 4.5 mostra um exemplo de predição de cobertura para a ITU-R P.1546. As várias colorações mostram os níveis de potência preditos para cada ponto do mapa. A legenda de cores é apresentada no lado direito da janela do *software*. Uma observação importante é que a área circular no centro da Fig. 4.5 com coloração branca representa a área com distância entre antena transmissora e receptora inferior a 1 km, na qual a ITU-R P.1546 não é válida.

Juntamente com o CoP, foi desenvolvido na UnB um *software* (*GPSpectrum*) para a coleta de informações de medições, que conectava um GPS e analisador de espectro, possibilitando assim que as medições fossem feitas e que a posição geográfica precisa fosse registrada. O *GPSpectrum* foi criado na linguagem de programação Agilent VEE Pro, interconectando os equipamentos envolvidos nas medições. Após a coleta das medidas e a criação de um arquivo de saída, as medidas recebem um tratamento estatístico para a retirada das componentes de variação rápida do sinal. O CoP também abrange essa funcionalidade. Um exemplo deste tratamento pode ser observado na Fig. 4.6.

Na janela superior da Fig. 4.6 são apresentados, em diferentes cores, o sinal original

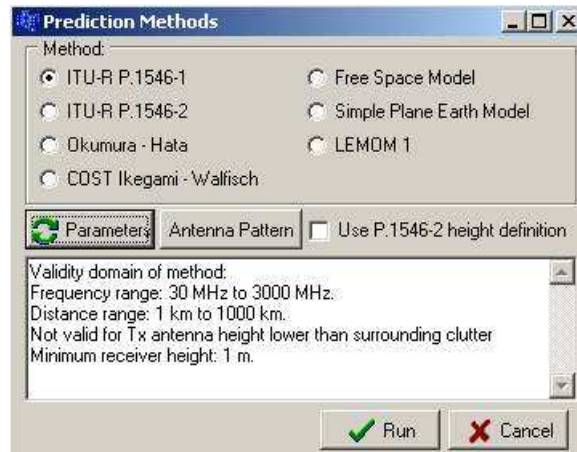


Figura 4.2: Modelos de predição disponíveis para simulação.

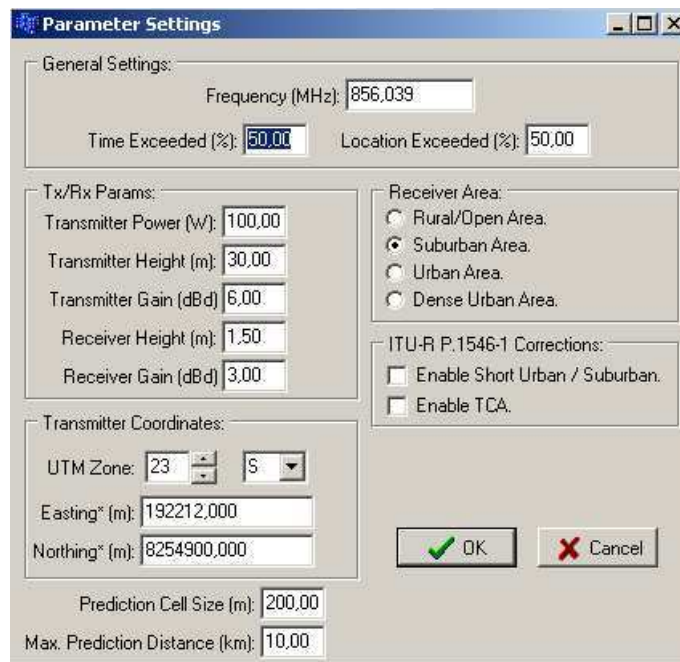


Figura 4.3: Variáveis de entrada.

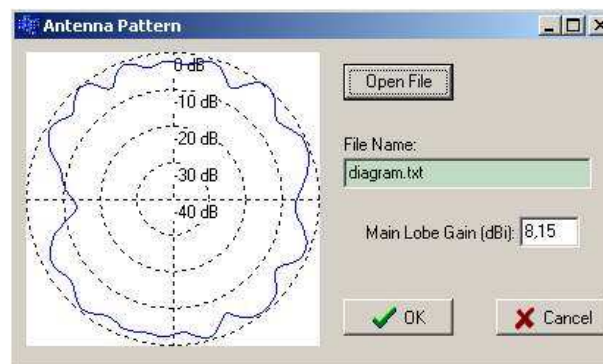


Figura 4.4: Exemplo de diagrama de radiação.

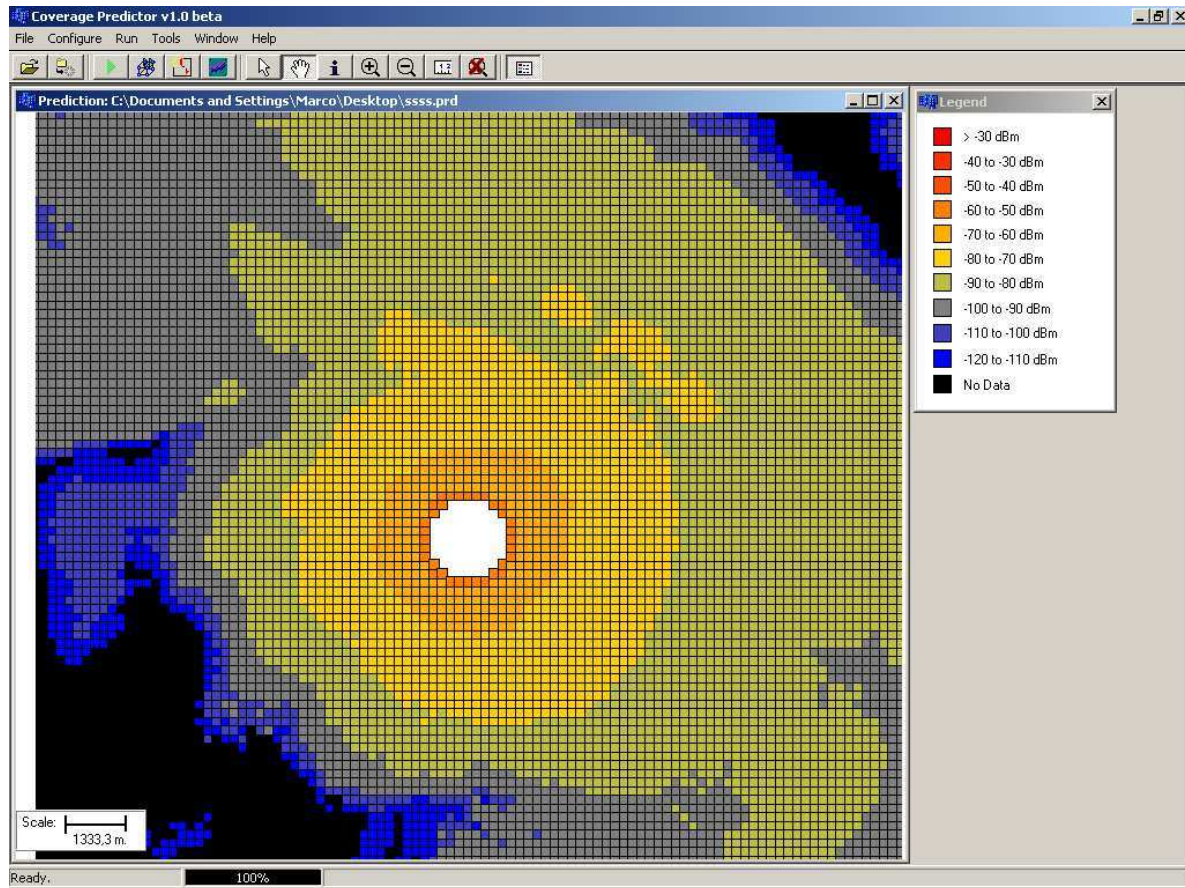


Figura 4.5: Exemplo de predição de cobertura.

medido e as componentes de variação rápida e lenta. Na janela inferior da Fig. 4.6 é apresentada a distância entre a antena transmissora e a antena receptora em função da distância percorrida pelo móvel.

A partir das sinal medido pode-se comparar o seu comportamento em relação a predição de algum modelo desejado. O CoP realiza a predição e a compara com as medições, mostrando a diferença entre eles em níveis de coloração, como ilustrado no mapa temático da Fig. 4.7.

4.2 Caso de Estudo

Nesta seção será analisado um caso de estudo realizado nas proximidades do Lago Paranoá, em Brasília - DF. As médias locais das medidas serão confrontadas com as

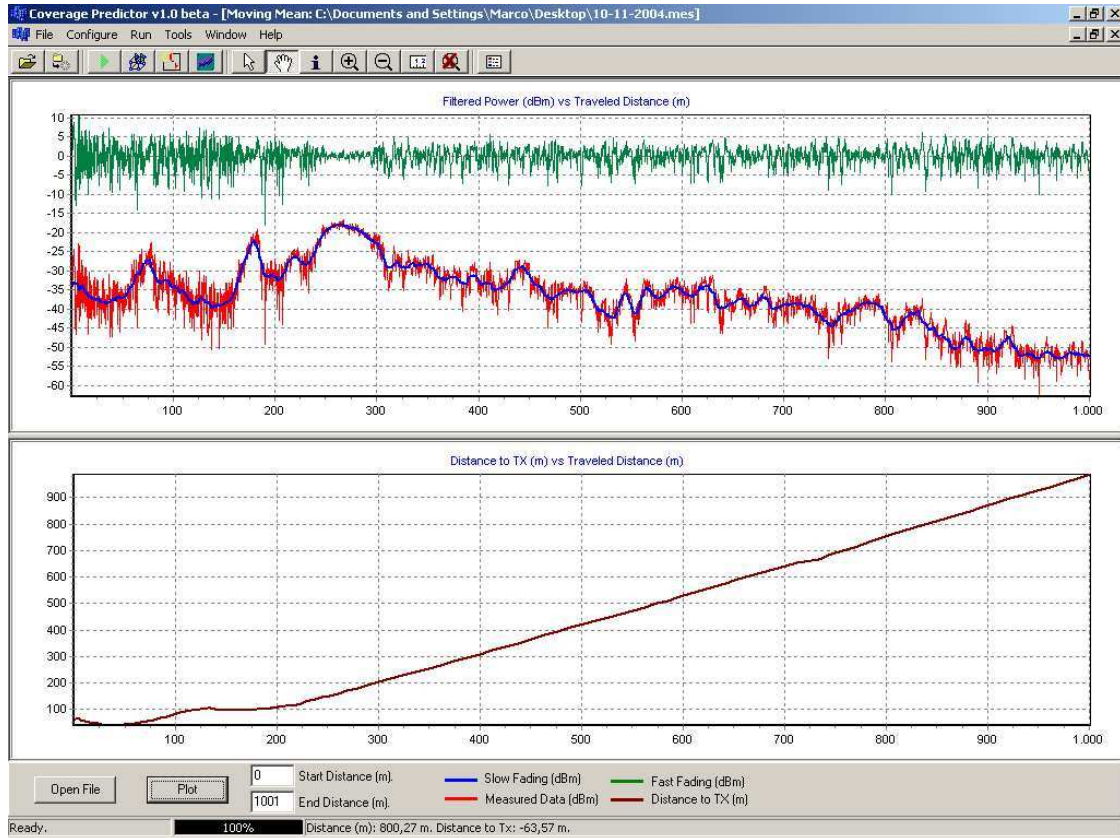


Figura 4.6: Análise estatística das medidas e distância entre o transmissor e receptor no decorrer do percurso de medição.

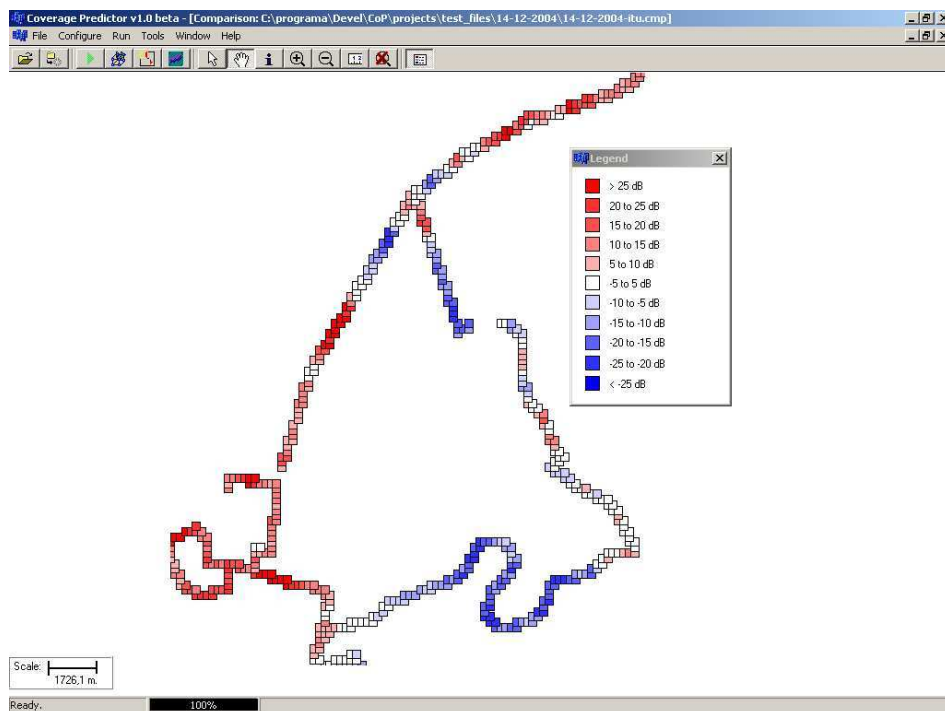


Figura 4.7: Comparação entre medidas e um modelo de propagação.

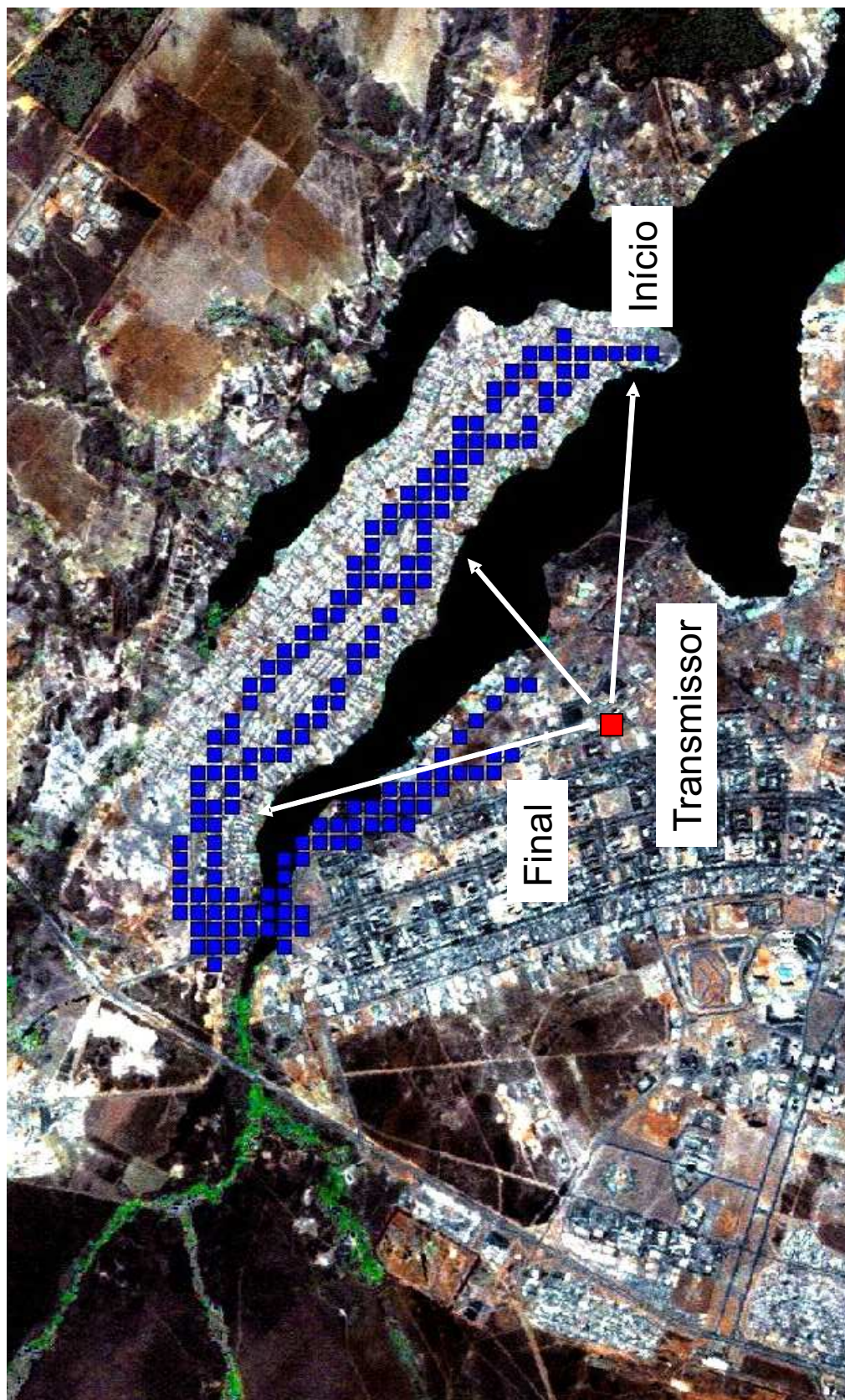


Figura 4.8: Mapa de localização às margens do lago Paranoá.

predições da ITU-R P.1546 aplicada com e sem a nova abordagem para enlaces curtos sobre terrenos mistos, proposta no Capítulo 3, tendo o modelo de Hata como referência. Esse estudo de caso tem como principal objetivo verificar a aplicabilidade da nova abordagem. As medidas foram realizadas às margens do lago, como ilustrado na Fig. 4.8.

Todas as medições foram realizadas utilizando-se uma antena omni-direcional ASP 1897T (806-896 MHz, 3 dB de diretividade), um inversor de potência (12 VDC para 110 VAC), um GPS Garmim 12 MAP (com um cabo RS-232 para conexão externa), analisador de espectro Agilent 4402B (utilizando-se de um barramento GPIB-USB para a conexão externa), todos controlados através de um computador com o *software* desenvolvido sob a plataforma Agilent VEE Pro para a consolidação dos dados em um único arquivo de saída.

O sinal CW a ser medido foi gerado através de repetidor Motorola Quantar, na frequência de 856.039 MHz e potência de saída de 100 W. Na saída do repetidor foi conectado um duplexador Sinclair Q4220, ligado a uma antena omni-direcional (806-824/851-869 MHz, 8,14 dB de diretividade) [16].

As alturas das antenas transmissora e receptora são $h_T = 30$ m e $h_R = 1,5$ m, respectivamente. O caminho de medição percorrido pelo veículo possui um comprimento total de 35 km, correspondendo ao movimento não retilíneo ao redor da lagoa, como ilustrado na Fig. 4.8. Esse comprimento não corresponde à distância entre os mastros das antenas transmissora e a receptora, e sim a distância percorrida pelo veículo receptor. A determinação das variáveis de entrada para a ITU-R P.1546 foi feita com o auxílio de um mapa digitalizado da região com resolução de 50 m.

Após a obtenção das medidas, restaram 166 pontos com suas respectivas médias locais. A distância entre as antenas transmissora e receptora (comprimento total do enlace d) varia de 1,5 km a 5 km, em função da posição do receptor. Pela Fig. 4.8, o enlace é inicialmente misto, o que perdura até a distância percorrida de aproximadamente 24 km.

O percurso medido inicia-se misto, o que irá perdurar até a distância de 24 km. A atenuação (em dB) em função da distância percorrida é mostrada na Fig. 4.9. Nesse gráfico, pode-se observar a atenuação medida, a atenuação predita através da ITU-R

Método de Propagação	Erro Médio ($\bar{\varepsilon}$ em dB)	Desvio-Padrão (σ em dB)
Okumura-Hata	-5,83	6,20
ITU-R P.1546 só terra	-7,03	6,23
ITU-R P.1546 percurso misto	-6,49	6,36
Nova Abordagem	0,15	6,15

Tabela IV.I: Valor médio ($\bar{\varepsilon}$) e desvio-padrão (σ) do erro entre medições e o modelo de propagação.

P.1546, com e sem a nova abordagem apresentada no Capítulo 3, A ITU-R P.1546 aplicada somente para enlaces sobre percursos sobre a terra e a atenuação do modelo de Hata [5], considerando um ambiente predominantemente suburbano. Pode-se observar que, no início do gráfico da Fig. 4.9, correspondendo ao caminho misto, as medições apresentam resultados bastante similares ao da predição da ITU-R P.1546 utilizando a nova abordagem da Seção 3.2. A ITU-R P.1546 original (com caminho misto e somente sobre a terra) apresenta uma predição bastante destoante das medidas realizadas, seguida de valores muito próximos do modelo de Hata. A Tabela IV.I sumariza os valores dos erros médios e desvio-padrão obtidos para cada um dos modelos comparados.

Em todos os casos de comparação da Tabela IV.I, foram considerados apenas os valores referentes ao caminho misto, uma vez que os métodos da ITU-R P.1546 são idênticos para a parte do percurso sobre a terra. A partir da distância percorrida $d > 24$ km, o caminho misto se encerra e obviamente, os resultados da ITU-R P.1546 para caminhos mistos original, ITU-R P.1546 somente sobre percursos sobre a terra e ITU-R P.1546 com a nova abordagem, apresentam os mesmo resultados, ainda assim um tanto discrepantes do valor das medições.

Um gráfico temático que mostra a distribuição das diferenças entre os métodos de predição de cobertura (ITU-R P.1546 com e sem a nova abordagem) e as médias locais das medidas na área em questão é apresentado nas Figs. 4.10 e 4.11. Pode-se observar, mais uma vez, a maior aderência entre as medições e a ITU-R P.1546 aplicada com a nova abordagem.

Os histogramas do erro absoluto entre as medidas e as predições da ITU-R P.1546 com e sem a nova abordagem podem ser observados nas Figs 4.12 e 4.13. Eles nos mostram

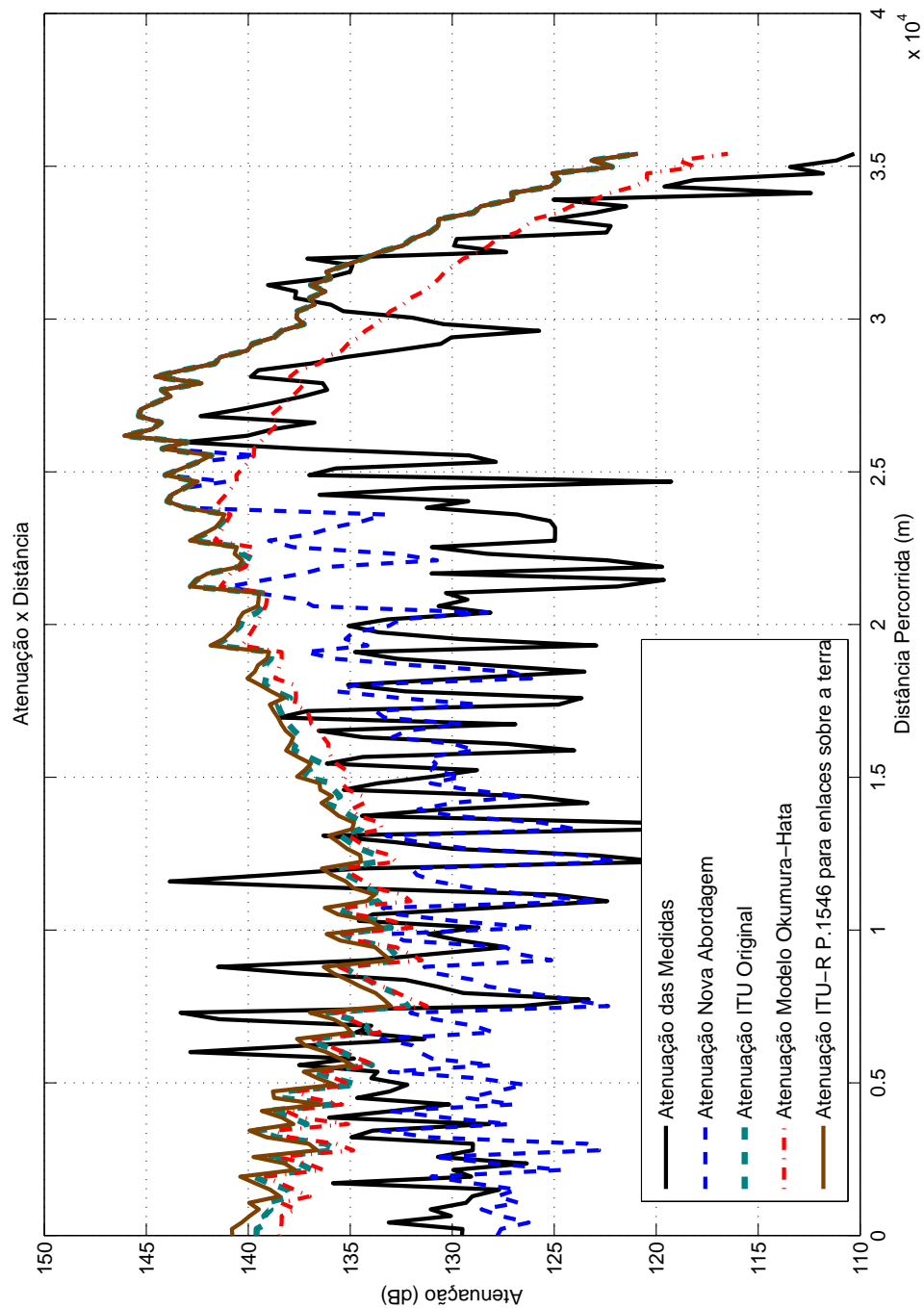


Figura 4.9: Comparação entre medidas, ITU-R P.1546 com caminho misto original, ITU-R P.1546 com enlace puramente sobre a terra, ITU-R P.1546 com a a nova abordagem proposta e modelo de Hata

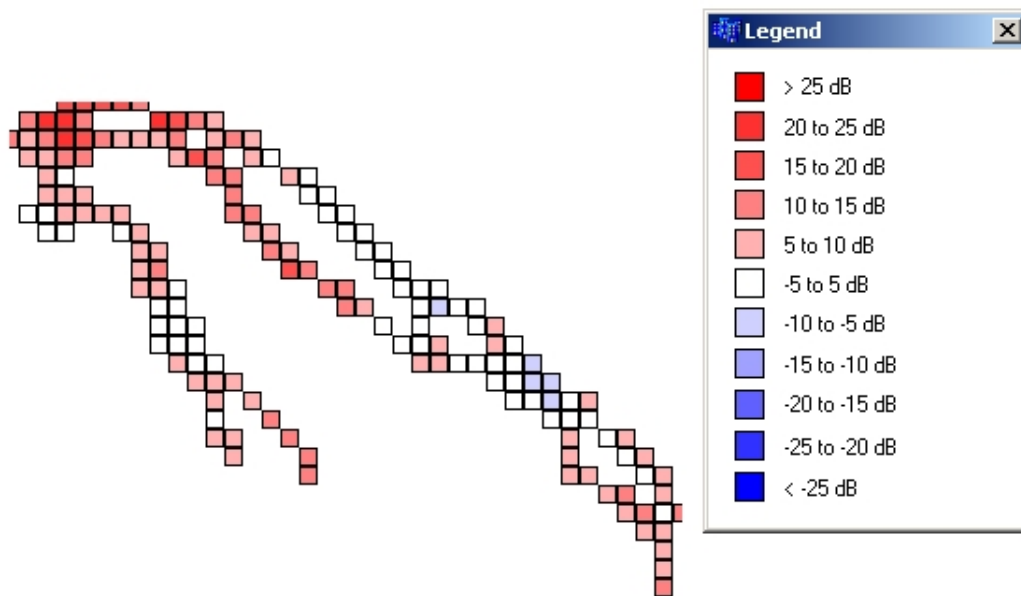


Figura 4.10: Diferença entre a ITU-R P.1546 original e as medidas de intensidade de campo.

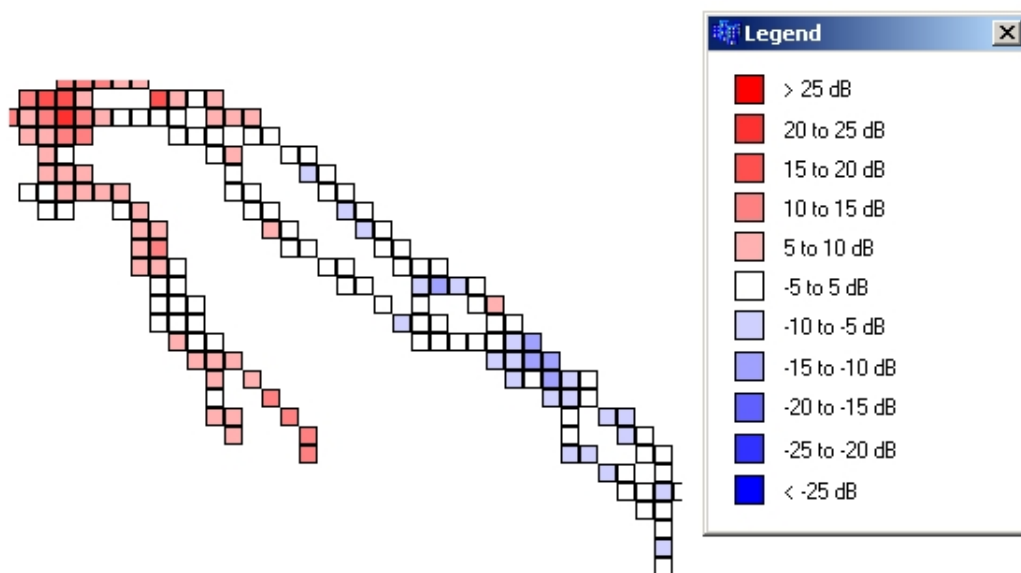


Figura 4.11: Diferença entre a ITU-R P.1546 modificada e as medidas de intensidade de campo.

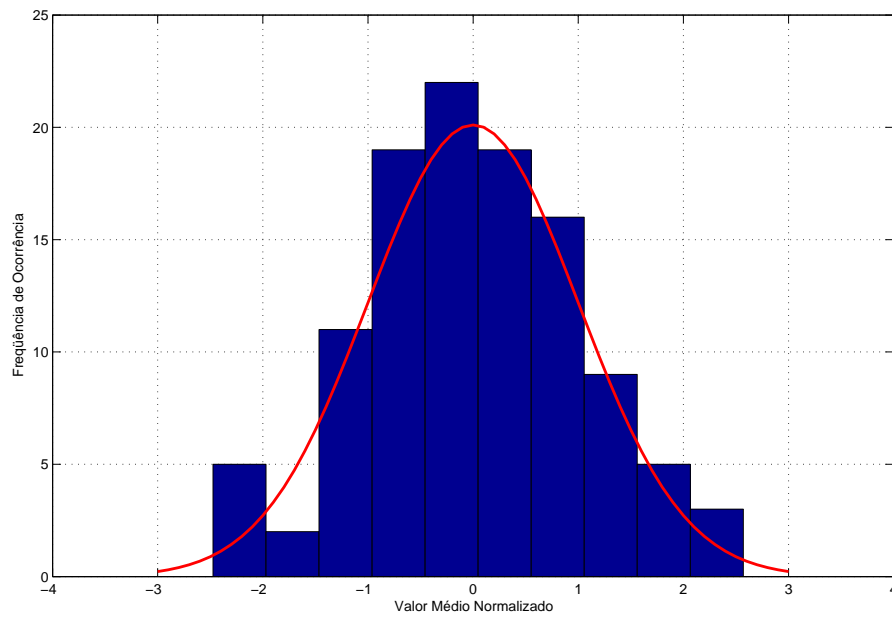


Figura 4.12: Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo predito pela ITU-R P.1546 original.

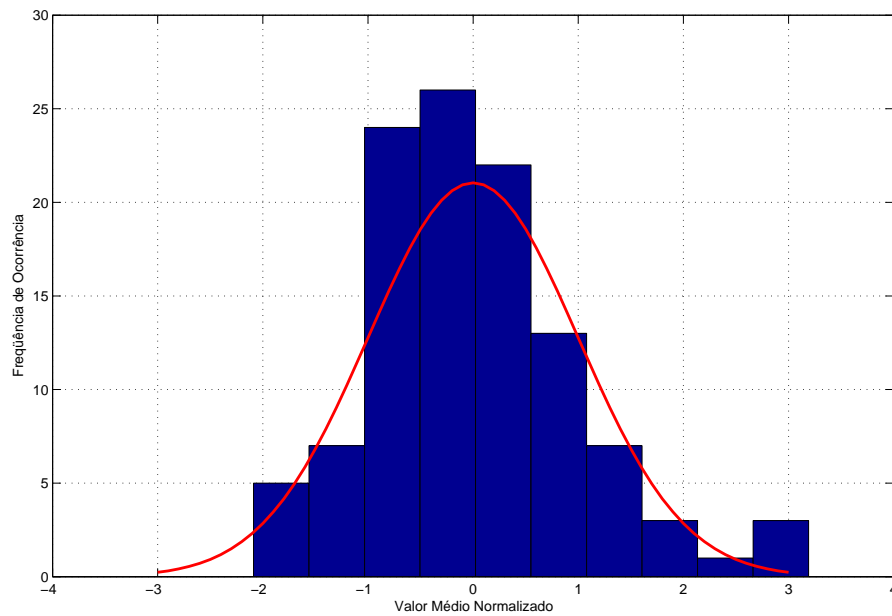


Figura 4.13: Histograma do Erro Absoluto entre as Medidas e o campo predito pela Nova abordagem.

que as medições foram não-tendenciosas, devido a forma aproximadamente normal.

Com o caso de estudo agora apresentado, reforça-se a idéia defendida no Capítulo 3, no qual foi mostrada a melhor adequação do modelo proposto quando comparado à forma original de cálculo da ITU-R P.1546. Porém, essa concordância entre as medidas e a nova abordagem não pode ser totalmente assegurada para todos os casos de enlaces curtos sobre terrenos mistos. Outros casos ainda precisam ser testados para uma melhor comprovação.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho consistiu no estudo da versão de agosto de 2005, da Recomendação ITU-R P.1546 que trata da comunicação ponto-multi-ponto para a faixa de frequências de 30 MHz a 3 GHz. Foi desenvolvida uma nova abordagem para cálculo de cobertura de enlaces curtos sobre terrenos mistos, motivada por uma conhecida deficiência da recomendação na predição de cobertura nestas situações.

No Capítulo 2, foi apresentada, com um certo nível de detalhamento, a Recomendação ITU-R P.1546, onde foram mostradas as variáveis de entrada e as correções de intensidade de campo mais importantes, como por exemplo, a definição da correção baseado no ângulo de visada, a correção de terrenos mistos, altura efetiva de recepção, dentre outras.

Com o intuito de motivar ainda mais a discussão da ITU-R P.1546, foi apresentada, no final do Capítulo 2, um caso de estudo realizado às margens da Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte, onde foi exemplificada a deficiência da Recomendação ITU-R P.1546 na análise de enlaces curtos sobre terrenos mistos. A comparação entre as medidas obtidas e a intensidade de campo predita pela ITU-R P.1546 mostrou uma diferença de aproximadamente 15 dB.

Foi apresentada no Capítulo 3 uma nova abordagem de cálculo para percursos curtos sobre terrenos mistos com visada direta, baseada em introspecções físicas, mais especificadamente na intersecção do primeiro elipsóide de Fresnel com o perfil de terreno. Após a apresentação do modelo matemático, o mesmo caso de estudo apresentado na

Seção 2.13 foi retomado, realizando a predição de cobertura com a utilização da nova abordagem. O resultado foi bastante satisfatório, conseguindo acompanhar o comportamento da potência média recebida com uma boa exatidão, enquanto a ITU-R P.1546 original permanecia 15 dB abaixo dos valores de medições.

No Capítulo 4 foi apresentado o *software* utilizado na simulação dos modelos de propagação (CoP - *Coverage Predictor*), com algumas de suas funcionalidades. Com o intuito de reforçar a validade do modelo proposto no Capítulo 3, foi realizada a análise de outro caso de estudo, agora na cidade de Brasília-DF, às margens do lago Paranoá. Foram obtidos resultados bastante interessantes e mais uma vez ficou comprovada a limitação da ITU-R P.1546 original e a utilidade da nova abordagem. Neste caso de estudo, a diferença entre as medidas e o valor predito com e sem a utilização do novo modelo apresentou um valor médio de 0,15 dB e 6,15 dB, respectivamente.

5.1 Propostas de Continuidade

Serão listadas algumas propostas de continuidade para o presente trabalho, abordando questões que não puderam ser tratadas nesta dissertação.

A primeira proposta é o estudo de alguns outros tópicos tratados pela Recomendação ITU-R P.1546 que apresentam algumas deficiências amplamente discutidas na comunidade científica, como por exemplo, a definição da altura efetiva de transmissão e a correção baseada no ângulo de visada do terreno. Um estudo aprofundado, na tentativa de entender os fundamentos nos quais a recomendação se baseia, poderia ser um ponto de partida.

Uma segunda sugestão é a utilização de uma base de medidas extensa para a melhor validação da abordagem proposta no Capítulo 3. Várias medidas de campo podem ser obtidas através do site da *International Telecommunication Union - ITU* (www.itu.int).

Outra sugestão é o aumento da base de medidas para distâncias maiores, acima de 20 km, uma vez que este trabalho concentrou-se na abordagem de enlaces curtos. A tentativa seria estender o modelo para terrenos mistos proposto no Capítulo 3 para enlaces com distâncias maiores. Certamente, uma outra alternativa ao elipsóide de Fresnel seria

necessária, pois a curvatura da Terra não poderá ser desprezada, tornando a utilização do elipsóide impraticável.

Ainda ligado a este assunto, o estudo de enlaces obstruídos sobre terrenos mistos com a utilização do modelo aqui proposto poderia apresentar resultados muito interessantes. Todos os casos simulados neste trabalho referiram-se a enlaces com visada direta. Porém, a obstrução poderia ser levada em consideração no cálculo da parte do elipsóide de Fresnel que chega a antena receptora, complementando, dessa forma, o trabalho aqui desenvolvido.

Referências Bibliográficas

- [1] Ney R. Dhein, *Elementos de propagação para onda de superfície, visibilidade direta e difração*, CETUC DID - 01. Notas de Aula, Rio de Janeiro, Março 1987.
- [2] W. J. Baker, *A History of the Marconi Company*, Methuen Co, 1970.
- [3] A. Sommerfeld, *Optics*, Academic Press Inc., New York, USA, 1954.
- [4] Les Barclay (ed.), *Propagation of Radiowaves - 2nd Edition*, The Institut of Electrical Engineers, London, UK, 2003.
- [5] M. Hata, “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services,” *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. VT-29, no. 3, pp. 317–325, Agosto 1980.
- [6] International Communication Union, “ITU-R P.1546-2 - Method for point-to-area for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz,” *ITU Recommendation*, Agosto 2005.
- [7] Erik Östlin, Hans-Jürgen Zepernick, Hajime Suzuki, “Evaluation of the New Semi-Terrain Basead Propagation Model Recommendation ITU-R P.1546,” *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, vol. 1, pp. 114– 118, 2003.
- [8] International Communication Union, “ITU-R P.314 - The Concept of Transmission Loss for Radio Links,” *ITU Recommendation*, 1999.
- [9] International Communication Union, “ITU-R P.453 - The radio refractive index: its formula and refractivity data,” *ITU Recommendation*, 2003.

- [10] International Communication Union, “ITU-R P.528 - Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands,” *ITU Recommendation*, 1986.
- [11] International Communication Union, “ITU-R P.617 - Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems,” *ITU Recommendation*, 1992.
- [12] International Communication Union, “ITU-R P.452 - Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz,” *ITU Recommendation*, Março 2005.
- [13] International Communication Union, “ITU-R P.1411 - Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz,” *ITU Recommendation*, Março 2005.
- [14] International Communication Union, “ITU-R P.530 - Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems,” *ITU Recommendation*, Março 2005.
- [15] International Communication Union, “ITU-R P.370 - VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1000 MHz,” *ITU Recommendation*, 1995.
- [16] A. J. M. Soares, C. G. Rego, E. V. Melo, F. J. S. Moreira, G. W. O. Costa, J. P. D. M. Pinto, M. A. S. Mayrink, N. Pasquali, P. H. P. Carvalho, W. K. Guimarães, “Measurements of a CW signal in Brazil and Comparison with Prediction using ITU-R P.1546-1,” *2005 IEEE/ACES International Conference (Wireless Communications And Applied Computation Eletromagnetics)*, Abril 2005.
- [17] Marco A. S. Mayrink, Fernando J. S. Moreira, Cassio G. Rego, Mateus Burian, Paulo H. P. Carvalho, Antonio J. M. Soares, Elmo de Melo, “Improving of Treatment of

- Mixed-Terrain Path of the Recommendation ITU-R P.1546 for the Path-Loss Prediction of Short UHF Links,” *International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 05)*, Julho 2005.
- [18] Rainer Grosskopf, “Notas de aula - Prof. Rainer Grosskopf,” *Institut für Rundfunktechnik GmbH*, 2002.
- [19] G. A. Huffort, A. G. Longley, W. A. Kissick, “A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode,” Tech. Rep. 82-100, Institute for Telecommunication Sciences, National Telecommunications and Information Administration, U.S. Department of Commerce, Boulder, Colorado, Abril 1982.
- [20] Alberto Leon Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering - 2nd Edition*, Addison-Wesley Publishing Corporation, Inc., Toronto, Canada, 1994.
- [21] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice - 2nd Edition*, Prentice Hall, New York, 2002.
- [22] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory - Analysis and Design 2nd Edition*, John Wiley and Sons, INC., 1997.
- [23] J. D. Parsons, *The Mobile radio Propagation Channel - First Edition*, John Wiley and Sons, Liverpool - UK, 1998.