

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcelo Lúcio Nunes

Predição de cobertura radioelétrica em ambiente urbano
complexo utilizando base de dados descritiva de alta resolução

Belo Horizonte
2017

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA EE-UFMG

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Predição de cobertura radioelétrica em ambiente urbano
complexo utilizando base de dados descritiva de alta resolução

Marcelo Lúcio Nunes

***Orientador:* Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rego**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia –
UFMG, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica – Sistemas de
Computação e Telecomunicações. *VERSÃO REVISADA.*

UFMG – Belo Horizonte

Agosto de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Professor Mário Werneck
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N972p Nunes, Marcelo Lúcio
 Predição de cobertura radioelétrica em ambiente
 urbano complexo utilizando base de dados descritiva de
 alta resolução / Marcelo Lúcio Nunes; orientador Cássio
 Gonçalves do Rego. - Belo Horizonte - MG, 2017.
 87 p.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Elétrica) - Escola de engenharia,
 Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

 1. PREDIÇÃO; NÍVEL DE SINAL; MÉTODOS ESTATÍSTICOS;
 MÉTODO GEOMÉTRICO. I. Rego, Cássio Gonçalves do, orient.
 II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ATA DA 1004ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO do aluno **Marcelo Lúcio Nunes** - registro de matrícula de número 2015660903. Às 14:30 horas do dia 11 do mês de setembro de 2017, reuniu-se na Escola de Engenharia da UFMG a Comissão Examinadora da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "**Predição de Cobertura Radioelétrica em Ambiente Urbano Complexo Utilizando Base de Dados Descritiva de Alta Resolução**" da Área de Concentração em Sistemas de Computação e Telecomunicações, Linha de Pesquisa Antenas, Propagação de Ondas de Rádio e Eletromagnetismo Aplicado. O Prof. Cássio Gonçalves do Rego, orientador do aluno, abriu a sessão apresentando os membros da Comissão e, dando continuidade aos trabalhos, informou aos presentes que, de acordo com o Regulamento do Programa no seu Art. 8.16, será considerado APROVADO na defesa da Dissertação de Mestrado o candidato que obtiver a aprovação unânime dos membros da Comissão Examinadora. Em seguida deu início à apresentação do trabalho pelo Candidato. Ao final da apresentação seguiu-se a arguição do candidato pelos examinadores. Logo após o término da arguição a Comissão Examinadora se reuniu, sem a presença do Candidato e do público, e elegeu o Prof. CÁSSIO G. REGO para presidir a fase de avaliação do trabalho, constituída de deliberação individual de APROVAÇÃO ou de REPROVAÇÃO e expedição do resultado final. As deliberações individuais de cada membro da Comissão Examinadora foram as seguintes:

Membro da Comissão Examinadora	Instituição de Origem	Deliberação	Assinatura
Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rego - Orientador	DELT (UFMG)	Aprovado	
Prof. Dr. Cláudio Garcia Batista	DETEM (UFSJ)	APROVADO	
Prof. Dr. Fernando José da Silva Moreira	DELT (UFMG)	APROVADO	
Prof. Dr. Álvaro Augusto Machado de Medeiros	Departamento de Circuitos Elétricos (UFJF)	APROVADO	

Tendo como base as deliberações dos membros da Comissão Examinadora a Dissertação de Mestrado foi aprovado..... O resultado final de aprovação foi comunicado publicamente ao Candidato pelo Presidente da Comissão, ressaltando que a obtenção do Grau de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA fica condicionada à entrega do TEXTO FINAL da Dissertação de Mestrado. O Candidato terá um prazo máximo de 30 (trinta) dias, a partir desta data, para fazer as CORREÇÕES DE FORMA e entregar o texto final da Dissertação de Mestrado na secretaria do PPGE/UFMG. As correções de forma exigidas pelos membros da Comissão Examinadora deverão ser registradas em um exemplar do texto da Dissertação de Mestrado, cuja verificação ficará sob a responsabilidade do Presidente da Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada pelo Presidente da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 11 de setembro de 2017.


ASSINATURA DO PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA

*Este trabalho é dedicado aos meus filhos Miguel e Mariano,
à minha esposa e à memória dos meus pais.*



Agradecimentos

O agradecimento principal é direcionado ao meu orientador Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rego.

Os agradecimentos especiais são direcionados ao Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética (GAPTEM)¹ da Universidade Federal de Minas Gerais e à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel)².

¹ <<http://www.cpdee.ufmg.br/~gaptem/>>

² <<http://www.anatel.gov.br>>

“Conhecer é cortar, é selecionar.”
(Umberto Eco)

RESUMO

N., MARCELO. **Predição de cobertura radioelétrica em ambiente urbano complexo utilizando base de dados descritiva de alta resolução.** 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas de Computação e Telecomunicações) – Escola de Engenharia (EE/UFMG), Belo Horizonte – MG.

Novas tecnologias de comunicação são desenvolvidas em um ritmo cada vez mais acelerado, gerando a necessidade cada vez maior de ferramentas mais eficazes para a análise do impacto que essas implantações terão sobre os sistemas existentes.

Este trabalho se propõe a uma análise comparativa, através de indicadores de desempenho, dos resultados alcançados por técnicas de predição de nível de sinal que se utilizam de métodos por soluções aproximadas (estatísticos ou geométricos) ou numéricas, em contraposição aos valores obtidos através de campanha de medição.

A trilha de investigação desta pesquisa buscou estabelecer o nível de precisão obtido por métodos menos onerosos do ponto de vista computacional quando dispõem de bases de dados georreferenciadas de descrição de ambiente externo de alta resolução. Para consecução do objetivo proposto foram implementados os modelos de predição COST 231 - Hata e as Recomendações ITU-R P.525, P.526 e P.1411.

Palavras-chave: PREDIÇÃO; NÍVEL DE SINAL; MÉTODOS ESTATÍSTICOS; MÉTODO GEOMÉTRICO.

ABSTRACT

N., MARCELO. **Predição de cobertura radioelétrica em ambiente urbano complexo utilizando base de dados descritiva de alta resolução.** 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas de Computação e Telecomunicações) – Escola de Engenharia (EE/UFMG), Belo Horizonte – MG.

The ever-increasing pace of change in communication technologies is increasing the demand by more effective tools to analyzing the impact by new deployments over existing systems.

This work proposes a comparative analysis, through performance indicators, of the results achieved by signal level prediction techniques using approximated (statistical or geometrical) or numerical solutions, in contrast to the measurement campaign data.

This research sought to establish the accuracy obtained by efficient computational methods using high resolution georeferenced outdoor environments databases. The signal-level prediction models: COST 231-Hata and Recommendations ITU-R P.525, P.526 and P.1411 were implemented to attain the proposed objective.

Key-words: SIGNAL-LEVEL PREDICTION; FIELD STRENGTH; STATISTICAL MODEL; GEOMETRICAL MODEL.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Reflexão de onda plana em uma interface de limites planares	20
Figura 2 – Difração provocada por um obstáculo	22
Figura 3 – Difração por um obstáculo - parâmetros de cálculo	23
Figura 4 – Aproximação de uma sequência de edificações por várias telas	24
Figura 5 – Situações típicas de propagação em áreas urbanas	29
Figura 6 – Φ_{ori}	31
Figura 7 – Exemplos de representações mápicas com resolução de 2 m	40
Figura 8 – Delimitação da área de realização da campanha de medições	41
Figura 9 – Configuração típica do equipamento utilizado na campanha de medições	42
Figura 10 – Diagrama de irradiação normalizado da antena ODV-065R15B15J15J . . .	44
Figura 11 – Distribuição geográfica dos pontos de amostra de nível médio de sinal . . .	46
Figura 12 – Arquitetura modular da implementação	48
Figura 13 – Visualização da grade de amostra do ambiente	49
Figura 14 – Regra de identificação das células na grade	50
Figura 15 – Exemplo de gráfico resultado do Módulo Comparação de Medidas e Cali- bração	52
Figura 16 – Detalhes de um enlace: a) perfil de elevações de relevo/edificações b) vista aérea	53
Figura 17 – Exemplo de resultado gráfico de predição de cobertura	54
Figura 18 – Fluxograma de operação do módulo de predição de sinal	55
Figura 19 – Resultado da implementação cobertura COST 231 - Hata	59
Figura 20 – Predição de cobertura COST 231 - Hata com ICS Telecom	60
Figura 21 – Comparação predições COST 231 - Hata versus dados da campanha de medidas	60
Figura 22 – Resultado da implementação cobertura ITU-R P.525/526	61
Figura 23 – Predição de cobertura ITU-R P.525/526 com ICS Telecom	62

Figura 24 – Comparação predições ITU-R P.525/526 versus dados da campanha de medidas	63
Figura 25 – Detalhe da Figura 22(b)	63
Figura 26 – Comparação das aproximações de solução para atenuação por uma cunha	64
Figura 27 – Análise de enlace ponto-a-ponto utilizando Rec. ITU-R P.525/526 utilizando recurso da implementação	65
Figura 28 – Análise de enlace ponto-a-ponto utilizando Rec. ITU-R P.525/526 utilizando recurso do ICS Telecom	65
Figura 29 – Resultado da implementação cobertura ITU-R P.1411	66
Figura 30 – Comparação predições ITU-R P.1411 versus dados da campanha de medidas	67
Figura 31 – Mapa dos pontos de análise utilizados no Relatório técnico - Análise de predição de cobertura radioelétrica de sistema celular (Anatel/UFSJ/UFMG) (BATISTA, 2015, p. 4)	68
Figura 32 – Comparação com resultados obtidos por técnicas analíticas	70
Figura 33 – Comparação de métodos de calibração	71



Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de soluções de predição de sinal radioelétricos	26
Tabela 2 – Características técnicas da estação base	43
Tabela 3 – Comparativo de resultados das simulações COST 231 - Hata	58
Tabela 4 – Comparativo de resultados das simulações ITU-R P.525/526	62
Tabela 5 – Comparativo de resultados das simulações ITU-R P.1411	67
Tabela 6 – Comparativo com resultados obtidos por técnicas analíticas	69



Lista de símbolos

λ — Comprimento de onda

Θ — Ângulo de incidência

μ — Permeabilidade magnética

τ — Condutividade elétrica

ε — Permissividade elétrica

δ — Permissividade elétrica complexa

Γ — Coeficiente de reflexão

ρ — Coeficiente complexo de reflexão

ω — Frequência angular

ν_F — Coeficiente de Fresnel

ψ — Coeficiente de espalhamento

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Justificativa do Trabalho	15
1.3	Revisão Bibliográfica	16
1.4	Estrutura da Dissertação	17
2	ASPECTOS DA PREDIÇÃO DE INTENSIDADE DE SINAL RADIOELÉTRICO	19
2.1	Introdução	19
2.2	Mecanismos de Propagação no Canal Rádio-Móvel em UHF	19
2.2.1	Propagação no Espaço Livre	19
2.2.2	Reflexão e Transmissão	20
2.2.3	Difração	21
2.2.4	Espalhamento	25
2.3	Modelos de Propagação	25
2.3.1	Modelo COST 231-Hata	27
2.3.2	Modelo ITU-R P.1411-8	28
2.3.3	Modelo ITU-R P.525-3 / 526-13	33
2.4	Descrição Estatística do Canal Radio-Móvel	35
3	BASES REPRESENTACIONAIS DE AMBIENTES URBANOS	37
3.1	Introdução	37
3.2	A Disponibilização Adequada de Dados de Representação de Ambiente a Depender da Solução Proposta	37
3.3	Sistemas de Informações Geográficas (GIS)	38
3.4	Dados Geográficos do Brasil	39
4	CAMPANHA DE MEDIDAS E TRATAMENTO DOS DADOS COLETADOS	41
4.1	Procedimentos de medição	41

4.2	Escolha da estação transmissora e área de simulação	42
4.3	Parâmetros da estação transmissora	44
4.4	Base de medidas e tratamento do dados	44
5	IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE RADIOPROPAGAÇÃO COM ANÁLISE DE DADOS GEOLOCALIZADOS	47
5.1	Introdução	47
5.2	Arquitetura	47
5.3	Módulo de Pré-processamento GIS	49
5.4	Módulo de Comparação de Medidas e Calibração	50
5.5	Módulo de Composição de Resultado	51
5.6	Módulo de Predição de Sinal	52
5.6.1	Módulo Modelo COST 231-Hata	54
5.6.2	Módulo Modelo ITU-R P.525/526	54
5.6.3	Módulo Modelo ITU-R P.1411	56
6	APRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	57
6.1	Introdução	57
6.2	Resultados Obtidos com o Modelo COST 231-Hata	58
6.3	Resultados obtidos com o Modelo ITU-R P.525/526	60
6.4	Resultados obtidos com o Modelo ITU-R P.1411	66
6.5	Comparação com resultados obtidos por técnicas analíticas	67
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A IMPLEMENTAÇÕES NUMÉRICAS	78
A.1	Cálculo de difração por múltiplos obstáculos segundo ITU-R P.526-13 .	78
A.2	Programa para cálculo atenuação pelo modelo COST-Hata	81
A.3	Cálculo predição de cobertura segundo a Recomendação ITU-R P.1411-8	82

Introdução

1.1 Motivação

A principal justificativa para a caracterização de canais rádio-móvel é minimizar o custo de planejamento e de implementação de um sistema rádio (SCHETTINO; MOREIRA, 2002, p. 196). Assim, o uso de ferramentas que possam tratar da forma mais adequada possível o ambiente, com o máximo de características e peculiaridades que afetem a propagação das ondas eletromagnéticas, promoverá maior confiabilidade ao projeto, e por conseguinte, exigirá pouco ou nenhum ajuste ou adaptação na fase de execução.

O ponto motivador trata-se de assumir o espectro radioelétrico como um recurso escasso e por consequência o seu uso eficiente é uma premissa. Para que seja garantida alta disponibilidade a sistemas dependentes da utilização de radiofrequência, levando-se em conta o reuso de bandas de frequência, faz-se necessário o uso de mecanismos de predição de nível de sinal cada vez mais precisos.

Contudo, maior precisão significa maior custo computacional e contrabalancear o desejável ao possível para se alcançar o ponto ótimo está entre as tarefas da engenharia.

1.2 Justificativa do Trabalho

Existem muitos modelos desenvolvidos por engenheiros nas últimas décadas para analisar a implantação e arquitetura de redes celulares. Porém, destes modelos, nenhum fornece uma solução final, porque cada técnica tem alguma limitação particular na sua aplicação (AVEENCHANDRA K. N. L OKESH; HAT, 2011, p. 1). Estas particularidades dizem respeito a diversos fatores, seja a faixa de frequência de operação, aplicação a que se destina, local de implantação e outros. Elementos importantes do ambiente de propagação devem ser considerados, como a curvatura da Terra, irregularidades do terreno não-homogêneo,

condições atmosféricas, obstáculos gerais, incluindo as construções urbanas (BATISTA *et al.*, 2016, p. 1779).

Conseqüentemente, se a área de predição requerida possui alguns quilômetros quadrados, o tempo de computação torna-se inaceitável se os dados da representação digital do terreno não forem processados de forma eficiente (KURNER; MEIER, 2002, p. 496).

Os avanços nas técnicas de mapeamento e representação do ambiente externo, como por exemplo o *Light Detection And Ranging* (LiDAR), que permite a representação tridimensional do ambiente urbano com precisão da ordem de alguns centímetros e processamento de imagens para o reconhecimento de materiais, oportunizaram a criação de bancos de dados de modelos descritivos de ambiente com alto nível de detalhamento. Estas informações proporcionam uma nova análise das variáveis que impactam sobre propagação das ondas eletromagnéticas que antes era baseada em parâmetros generalizados e agora podem ser mais refinadas.

Contextualizando este trabalho, a preparação do Brasil para receber alguns dos grandes eventos globais, como Copa do Mundo de Futebol e os Jogos Olímpicos, acarretou diversas frentes de investimentos em infraestrutura. Entre outros, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) realizou a aquisição de um sistema para o seu processo de outorga dos serviços de telecomunicações que resultou em um investimento da ordem de 12 milhões de dólares¹, um conjunto composto de um *software* comercial para predição de cobertura e uma base de dados 3D da representação de cidades que abrigaram os citados eventos, com alta resolução e categorização da ocupação do terreno (como por exemplo: vegetação, ambiente urbano, lagos, etc).

Confrontar os possíveis resultados obtidos utilizando amostras destas bases de dados, realizando análise comparativa com resultados alcançados com métodos mais precisos, embora mais onerosos, permitirão um direcionamento de esforços de pesquisas futuras. Conseqüente, tais resultados ajudarão em revisões de modelos descritivos assintóticos já consolidados em ferramentas de uso comercial, como a citada no parágrafo anterior.

1.3 Revisão Bibliográfica

Nesta seção será feita uma breve revisão bibliográfica com as principais referências utilizadas como consulta no desenvolvimento deste trabalho.

Este trabalho poderá ser melhor compreendido pela consulta às referências Parsons (1992), Molisch (2012), Bertoni (1999) e Rappaport *et al.* (1996). Estes livros trazem uma apresentação didática relativa ao fenômenos de propagação e às técnicas de predição utilizadas nos canais rádio, além de abordarem, em especial os dois primeiros referenciados, de forma

¹ <<http://www.atdi.com/atdi-to-deliver-spectrum-management-solutions-for-world-games/>>

pormenorizada questões relacionadas aos métodos descritivos assintóticos.

A análise de difração por um ou mais obstáculos além das referências anteriores, especificamente quanto ao método de Bullington está em Bullington (1947). Quanto a Teoria Uniforme da Difração (UTD) e Óptica Geométrica (GO) é apresentado em McNamara, Pistorius e Malherbe (1990), Felsen e Marcuvitz (1994) e Kouyoumjian e Pathak (1974). As variações dos coeficientes de difração UTD para emprego na análise do caminho do raio propagado foram estudados em Holm (1996), Holm (2000), Schettino, Moreira e Rego (2010).

Quanto as técnicas analíticas, uma abordagem didática é encontrada em Sevgi (2014, cap. 12 a 15). As técnicas para análise de propagação utilizando Método dos Momentos (MoM) podem ser consultadas em Moreira (2002), Batista e Rego (2007). Já o Método por Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) em Taflove e Hagness (2000), Batista e Rego (2012) e Batista *et al.* (2016).

Em Silva William Eustáquio da; Rego (2011), é apresentado, de forma compilada, a aplicação das técnicas citadas nas faixas de VHF (*Very High Frequencies*) e UHF (*Ultra High Frequencies*) sobre terrenos irregulares. Essa publicação apresenta ainda análises comparativas com resultados de medições, à maneira da proposta neste trabalho.

Informações sobre a realização de medidas de campo nos sistemas móveis são encontrada em Arai (2013, cap. 4) e quanto ao método para tratamento dos dados recomenda-se Lee (1985a) e Vega *et al.* (2009).

Os modelos de propagação implementados são detalhados em Damosso (1998, cap. 4), ITU-R (2016), ITU-R (2013) e ITU-R (2015).

As técnicas de manipulação de dados geoespaciais com a linguagem Python estão apresentadas em Westra (2016)

As questões relacionadas a capacidade de análise e estrutura do *software ICS Telecom* da empresa ADTI Inc., são tratadas em Grahan, Kirkman e Paul (2007).

1.4 Estrutura da Dissertação

Nesta dissertação serão analisados alguns conceitos e técnicas de predição de cobertura radioelétrica. Um maior foco será dado aos métodos de predição analíticos assintóticos e ao tratamento de bases de dados georeferenciados de representação do ambiente urbano. As Recomendações ITU-R P. 525 (ITU-R, 2016) e 526 (ITU-R, 2013), COST 231-Hata (DAMOSSO, 1998) e ITU-R P.1411 (ITU-R, 2015) serão detalhadas, perpassando por seus principais conceitos e uma discussão a respeito da parametrização dos coeficientes utilizados será tratada de maneira mais detalhada. Estas informações constam do Capítulo 2.

O Capítulo 3, descreverá as principais formas representacionais de ambiente urbano externo disponíveis atualmente, além de suas estruturas, disponibilidade de acesso e possíveis

implementações.

O Capítulo 4, detalhará os aspectos da campanha de medidas e tratamento da base de medições de nível de sinal, na faixa de *Ultra High Frequency* (UHF) do Serviço Móvel Pessoal (SMP), que foi realizada. As condições de realização da campanha de medidas, a técnica e equipamentos empregados serão abordadas neste capítulo.

O Capítulo 5, abordará os *scripts* desenvolvidos nesta pesquisa para obtenção dos resultados. Consta neste capítulo, uma descrição do *software ICS Telecom* da empresa ATDI, uma ferramenta comercial que foi utilizada como base comparativa de alguns resultados.

No Capítulo 6, serão analisados os resultados obtidos em ambiente complexo, ou seja, com diversidade de formas, tamanhos das edificações e dos espaçamentos entre elas. Serão confrontados os resultados de simulações aos valores medidos. A comparação entre métodos, baseando-se na aproximação do valor de nível de sinal predito e medido, além de fatores de desempenho serão apresentados.

A Conclusão trará um apanhado dos resultados obtidos pelo presente trabalho e sugestões de evolução.

Finalmente, o Apêndice A conterá implementações numéricas de alguns métodos utilizados neste trabalho.

Aspectos da Predição de Intensidade de Sinal Radioelétrico

2.1 Introdução

Toda a engenharia de redes móveis depende de modelos utilizados para a predição do comportamento das ondas de rádio transmitidas na rede, e desta forma a correta seleção e configuração dos modelos de propagação é de crítica importância para qualquer projeto (GRAHAN; KIRKMAN; PAUL, 2007, p. 37). Serão apresentados neste capítulo os modelos de predição utilizados neste trabalho, abordando suas restrições de aplicação.

Além do mais, serão abordados alguns aspectos relativos a caracterização da propagação do sinal no ambiente externo e os mecanismos de propagação no contexto de comunicações móveis na faixa de UHF.

2.2 Mecanismos de Propagação no Canal Rádio-Móvel em UHF

2.2.1 Propagação no Espaço Livre

Quando o sinal de rádio está se propagando no espaço livre, isto é, distante do solo ou de quaisquer outras obstruções, há uma relação entre a potência do sinal recebido e o sinal transmitido, dada pela equação 2.1.

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

onde G_T e G_R são os ganhos respectivos das antenas transmissora e receptora, λ o comprimento de onda utilizado e d é a distância entre elas.

A relação apresentada pela equação 2.1 é também conhecida como equação de Friis. À partir da equação 2.1 conforme a *Recomendação ITU-R P.525* podemos encontrar o valor da atenuação no espaço livre (L_{bf}) conforme a equação 2.2.

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{dB} \quad (2.2)$$

onde:

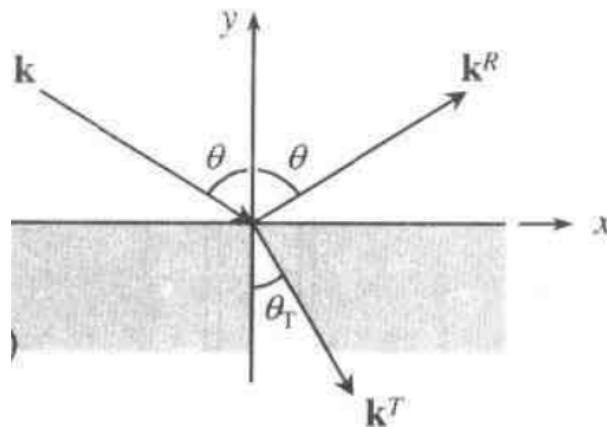
f : frequência em MHz

d : distância em km

2.2.2 Reflexão e Transmissão

A equação de propagação no espaço livre somente se aplica em condições muito restrita (PARSONS, 1992, p. 16). Quando uma onda plana propagando em um meio encontra uma interface com um segundo meio com diferentes propriedades, ela é parcialmente refletida de volta para o primeiro meio e parcialmente transmitida para o segundo meio. A direção de propagação e as amplitudes da onda transmitida e da onda refletida são determinadas pelas condições de contorno na interface. Um diagrama mostrando as direções da onda plana incidente, refletida e transmitida é apresentado na Figura 1 (BERTONI, 1999, p. 64).

Figura 1 – Reflexão de onda plana em uma interface de limites planares



Fonte: Bertoni (1999, p. 64).

Os coeficientes de reflexão e transmissão podem ser calculados a partir das ondas planas refletida e transmitida, considerando as condições de continuidade na fronteira. Sobre estas observações deriva-se a lei de Snell: o ângulo de incidência é igual ao ângulo refletido (Θ) (MOLISCH, 2012, p. 49) .

Assumindo que o material seja linear, homogêneo, isotrópico, e tenha permeabilidade relativa $\mu_r = 1$, a constante dielétrica e a condutividade podem ser representadas em um único parâmetro, a condutividade elétrica:

$$\delta = \epsilon_0 \delta_r = \epsilon - j \frac{\tau_e}{2\pi f_c} \quad (2.3)$$

Estando válida a equação 2.4, à partir da situação apresentada na Figura 1:

$$\frac{\sin \Theta_T}{\sin \Theta} = \frac{\sqrt{\delta_1}}{\sqrt{\delta_2}} \quad (2.4)$$

onde os subscritos 1 e 2 são os índices considerados do primeiro e segundo meio respectivamente.

Os coeficientes de reflexão e transmissão são diferentes para o caso de incidência Transversal Magnética (TM), quando a componente do campo magnético incide paralela ao limite entre os dois dielétricos, e para o caso de incidência Transversal Elétrica (TE) quando a componente do campo elétrico incide paralela ao limite entre os dois dielétricos. Os coeficientes são encontrados pelas equações 2.5 e 2.6 (MOLISCH, 2012, p. 50).

$$\Gamma_{TM} = \frac{\sqrt{\delta_2} \cos \Theta - \sqrt{\delta_1} \cos \Theta_T}{\sqrt{\delta_2} \cos \Theta + \sqrt{\delta_1} \cos \Theta_T} \quad (2.5)$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\sqrt{\delta_1} \cos \Theta - \sqrt{\delta_2} \cos \Theta_T}{\sqrt{\delta_1} \cos \Theta + \sqrt{\delta_2} \cos \Theta_T} \quad (2.6)$$

Logo, a amplitude e a fase de uma onda refletida pelo solo vão depender do coeficiente de reflexão da Terra no ponto de incidência e podem ser obtidos pelas equações 2.7 e 2.8 (PARSONS, 1992, p. 18 e 19).

$$\rho_v = \frac{(\epsilon_r - jx) \sin \Theta - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \Theta}}{(\epsilon_r + jx) \sin \Theta - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \Theta}} \quad (2.7)$$

$$\rho_h = \frac{\sin \Theta - \sqrt{(\epsilon_r - jm) - \cos^2 \Theta}}{\sin \Theta + \sqrt{(\epsilon_r - jxm) - \cos^2 \Theta}} \quad (2.8)$$

onde:

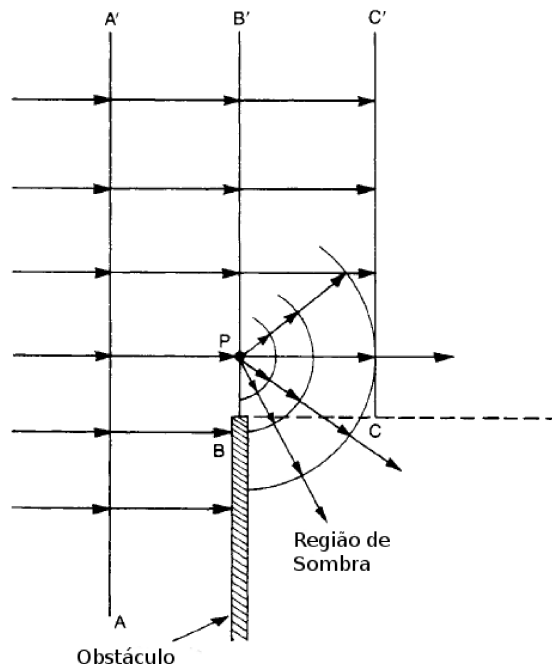
$$m = \frac{\tau_e}{\omega \epsilon_0} = \frac{18 \times 10^9 \tau_e}{f} \quad (2.9)$$

2.2.3 Difração

De forma simplificada o mecanismo da difração pode ser compreendido com o uso do diagrama da Figura 2. Considere que AA' é uma frente de ondas com extensão suficientemente maior que o comprimento de onda, propagando na direção das setas. Supõe-se que esta frente de onda encontre um obstáculo quando atinge o ponto P, sendo este obstáculo impenetrável ou com uma absorção perfeita. Assim, passa a existir apenas uma frente de ondas com extensão CC'. Uma teoria eletromagnética de raios sugere que nenhum campo eletromagnético exista na região de sombra assinalada pela linha pontilhada BC, porém o Princípio de Huygens estabelece que novas frentes de ondas surgem em todos os pontos

em BB'. Se observarmos por exemplo um nova frente de ondas que surge no ponto P, esta se propaga na direção da região de sombra, assim com todas as novas frentes de onda que surgem ao longo de CC'. Por conseguinte o campo em todos os pontos dessa região são resultantes da interferência de todas estas novas frentes de onda. Esta aparente mudança de direção das ondas de rádio contornando uma obstrução é definida como *difração*, como pode ser entendido à partir de Parsons (1992, p. 34) e Molisch (2012, p. 55).

Figura 2 – Difração provocada por um obstáculo



Fonte: Adaptada de Parsons (1992, p. 34).

Difração por um obstáculo

Ainda analisando o cenário apresentado na Figura 2, o campo elétrico em um ponto à direita do obstáculo pode ser expresso na forma de uma integral, a Integral de Fresnel, com o campo incidente representado como e^{-jk_0x} .

$$E_{total} = e^{-jk_0x} \bar{F}(v_F) \quad (2.10)$$

onde $v_F = -\frac{2y}{\sqrt{\lambda x}}$, com x e y representando as coordenadas cartesianas no plano bidimensional, e a integral de Fresnel $F(v_F)$ é definida pela equação 2.11.

$$F(v_F) = \int_0^{v_F} \exp\left(-j\pi \frac{t^2}{2}\right) dt \quad (2.11)$$

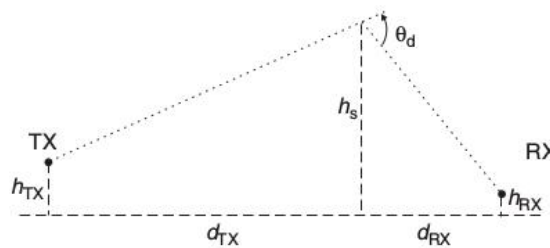
Considerando o cenário proposto na Figura 3, à partir da obtenção do ângulo de difração Θ_d :

$$\Theta_d = \arctan\left(\frac{h_S - h_{TX}}{d_{TX}}\right) + \arctan\left(\frac{h_S - h_{RX}}{d_{RX}}\right) \quad (2.12)$$

Conforme Molisch (2012, p. 57) o coeficiente de Fresnel ν_F pode ser obtido por:

$$\nu_F = \Theta_d \sqrt{\frac{2d_{TX}d_{RX}}{\lambda(d_{TX} + d_{RX})}} \quad (2.13)$$

Figura 3 – Difração por um obstáculo - parâmetros de cálculo



Fonte: Molisch (2012, p. 57).

À partir da equação 2.10 temos que o valor atenuação do sinal difratado (G_d) pela presença de um obstáculo, comparado à propagação no espaço livre, conforme Rappaport *et al.* (1996, cap. 3), é dado por:

$$G_d(dB) = 20 \log |F(\nu_F)| \quad (2.14)$$

Na solução de (2.14) é usual a utilização de gráficos ou aproximações numéricas, como encontrados na Recomendação ITU-R P.526 página 9, ou adoção de valores apresentados nas equações 2.15, como em Lee (1985b apud RAPPAPORT *et al.*, 1996, cap. 3) e descritos abaixo:

$$\begin{aligned} G_d(dB) &= 0 & \nu &\leq -1 \\ G_d(dB) &= 20 \log(0,5 - 0,62\nu_F) & -1 &\leq \nu_F \leq 0 \\ G_d(dB) &= 20 \log(0,5 \exp(-0,95\nu_F)) & 0 &\leq \nu_F \leq 1 \\ G_d(dB) &= 20 \log\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1\nu_F)^2}\right) & 1 &\leq \nu_F \leq 2,4 \\ G_d(dB) &= 20 \log\left(\frac{0,225}{\nu_F}\right) & \nu_F &> 2,4 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Difração por uma cunha

Muitos obstáculos, especialmente em ambientes urbanos são melhor representados por um obstáculo no formato de uma cunha ou gume de faca (MOLISCH, 2012, p. 58).

A parcela do campo criada pela difração pode ser escrita por um produto do campo incidente com um fator de fase $e^{-jk_0 d_{RX}}$, um fator geométrico $A(d_{TX}, d_{RX})$ que depende das distâncias do transmissor e do receptor com relação ao obstáculo, e um coeficiente de

difração $D(\phi_{TX}, \phi_{RX})$, que depende dos ângulos de difração (VAUGHAN; ANDERSEN, 2003, p. 127):

$$E_{diff} = E_{inc,0} D(\phi_{TX}, \phi_{RX}) A(d_{TX}, d_{RX}) e^{-jk_0 d_{RX}} \quad (2.16)$$

onde:

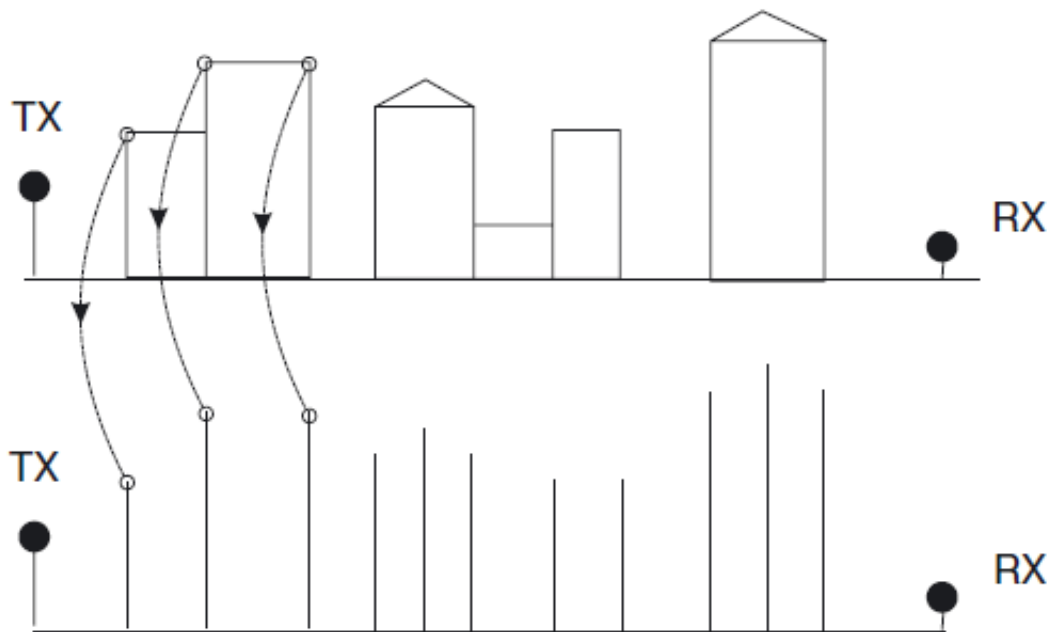
$$A(d_{TX}, d_{RX}) = \sqrt{\frac{d_{TX}}{d_{RX}(d_{TX} + d_{RX})}} \quad (2.17)$$

e o coeficiente de difração depende das condições de contorno no ponto de incidência no obstáculo (coeficientes de reflexão, de transmissão e recepção).

Difração por várias telas

Matematicamente este problema se traduz em uma integral dupla de Fresnel. De toda forma, diferentes aproximações têm sido sugeridas e amplamente adotadas devido ao tamanho e a complexidade matemática da solução exata (PARSONS, 1992, p. 46).

Figura 4 – Aproximação de uma sequência de edificações por várias telas



Fonte: Molisch (2012, p. 60).

Neste trabalho, por força da Recomendação ITU-R P.526, foi adotado o método de Bullington apresentado em Bullington (1947), que consiste em substituir os obstáculos reais por um obstáculo equivalente, levando-se em consideração a intersecção dos dois principais

obstáculos no caminho transmissor-receptor. Os dois obstáculos são escolhidos com base no ângulo de inclinação em relação ao transmissor e receptor. O detalhamento computacional está explícito na recomendação citada e uma extração do código de implementação do método em linguagem Python, está disponível em A.1.

2.2.4 Espalhamento

O nível do sinal recebido no ambiente rádio móvel é frequentemente maior que o predito apenas pelos modelos de reflexão e difração. O que explica este fato é que quando a onda de radio atinge uma superfície rugosa a energia é refletida em várias direções (difundida), assim a energia de um determinado ponto conta com contribuições de não apenas uma componente de reflexão direta mas de várias componentes oriundas do espalhamento ocorrido pelo encontro dos obstáculos em seu caminho de propagação. (RAPPAPORT *et al.*, 1996, p. 100).

Superfícies planas com dimensões maiores que o comprimento de onda podem ser modeladas como superfícies refletivas. De toda forma, a rugosidade de tais superfícies frequentemente induz efeitos de propagação diferentes da reflexão especular. O critério de Rayleigh define um tamanho crítico (h_C) da protuberância da superfície para um dado ângulo de incidência Θ_i :

$$h_C = \frac{\lambda}{8 \sin \Theta_i} \quad (2.18)$$

Uma superfície é considerada lisa se apresentar deformações menores que h_C . Superfícies rugosas precisam de um ajuste no seu coeficiente de reflexão, multiplicando-o por um fator de perda por espalhamento ψ_S , que diminui o campo refletido. (RAPPAPORT *et al.*, 1996, p. 100). Segundo Ament (1953 apud RAPPAPORT *et al.*, 1996, p. 100) ψ_S é dado por 2.19.

$$\psi_S = \exp \left(-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \Theta_i}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (2.19)$$

onde σ_h é o desvio padrão da altura acima da altura média da superfície.

O campo elétrico refletido para $h > h_C$ pode ser resolvido para superfícies rugosas usando um coeficiente de reflexão modificado, dado por:

$$\rho_{\text{rugoso}} = \psi_S \rho \quad (2.20)$$

2.3 Modelos de Propagação

Modelos de propagação são fundamentais para o projeto de redes de comunicação sem fio. Sem a possibilidade de modelar precisamente o desempenho da nova rede antes de iniciar sua implementação, é necessário construí-la, testar sua performance, para então, por meio de tentativas sucessivas, otimizar sua configuração (VAUGHAN; ANDERSEN, 2003).

Inicialmente, distinguiremos as formas de abordar o problema de predição nível de sinal radioelétrico agrupando os métodos em soluções numéricas e soluções aproximadas.

Tabela 1 – Classificação de soluções de predição de sinal radioelétricos

Classificação	Modelos
Soluções Numéricas	<p>Método de Equações Integrais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - magnetic field integral equation (MFIE) - electric field integral equation (EFIE) <p>Método de equações Parabólicas</p> <ul style="list-style-type: none"> - FFT - equação parabólica diferencial
Soluções Aproximadas	<p>Métodos assintóticos de alta frequência</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teoria Uniforme da Difração <p>Modelos empíricos</p> <ul style="list-style-type: none"> - COST 231-Hata <p>Modelos semi-empíricos</p> <ul style="list-style-type: none"> - ITUR-P.1411 <p>Modelos Geométricos</p> <ul style="list-style-type: none"> - ITUR.P525/526

Fonte: Adaptada de Damosso (1998, p. 141).

Neste trabalho não foram implementados métodos numéricos, apenas soluções por aproximação.

Uma subclassificação dos modelos aqui utilizados distingue entre modelos empíricos (resultantes de análises de medições experimentais, também denominados estatísticos), modelos determinísticos (que se baseiam em características físicas do enlace rádio entre o transmissor e o receptor, também podem ser classificados como geométricos)(VAUGHAN; ANDERSEN, 2003) e mistos ou semi-empíricos.

Os modelos determinísticos ou geométricos geralmente derivam das características da geometria de Fresnel. Aplicam de algum modo a equação de Friis para cálculo da atenuação no espaço livre acrescida de coeficientes de atenuação conforme sua proposta, de forma generalizada temos a equação 2.21 conforme consta em ATDI (2004, p.12):

$$L_{prop} = L_{fsl} + L_d + L_{sp} + L_{rain} + L_{gas} + L_{cut} + L_{model} \quad (2.21)$$

Em 2.21 temos como termos majoritários além da atenuação no espaço livre (L_{fsl}) e a atenuações devida a difração (L_d). Além disso podem ser contabilizadas as atenuações atmosféricas (L_{gas}), por chuvas (L_{rain}), um fator específico relacionado ao ambiente de propagação e sua ocupação (florestas, cidades, espelho d'água...) (L_{cut}),um fator que caracterize o modelo em si (L_{model}) e um fator de correção adicional relacionado à geometria do perfil do enlace *subpath* (L_{sp}) (ATDI, 2004, p. 12).

Modelos semi-empíricos, dependem da geometria somente em um sentido mais restritivo. São originalmente destinados a prover uma estimativa do nível de sinal recebido. Não utilizam informações de elevação do terreno, mas requerem alguns parâmetros geométricos de forma sintetizada. Os parâmetros básicos são a altura das antenas, a variabilidade temporal ou espacial, o tipo de terreno, dentre outros. Termos de correção adicionais, como ângulo de visada, podem ser utilizados (ATDI, 2004, p. 9).

Além da disponibilidade das informações descritivas do ambiente, a implementação de modelos de propagação consideram também outras restrições, tais como: tempo de processamento, requerimentos de memória e documentação disponível.

Outra restrição importante é a aplicabilidade do modelo. Muitos, principalmente os empíricos e semi-empíricos, só têm efetividade comprovada dentro de certas restrições de frequência de operação, comprimento do enlace, alturas de antenas e outras. Isto porque sua formulação se baseia em resultados de campanhas de medições que não contaram com uma diversidade de cenários além das ditas restrições ou só encontraram normalização de soluções sob determinadas imposições.

Para fins dos resultados esperados neste trabalho, foram selecionados três modelos de propagação a serem comparados. Esta seleção se baseou nas restrições encontradas nos diversos modelos existentes de forma que pudessem ser aplicadas no ambiente de medições existente. São eles: COST 231-Hata, ITUR-P.1411 e ITUR-P.525/526.

2.3.1 Modelo COST 231-Hata

Trata-se de um modelo empírico para determinação da atenuação que se aplica a situações onde o terreno é superficialmente conhecido e os parâmetros requeridos por modelos semi-empíricos não podem ser determinados. Trata-se de uma adaptação do modelo de Hata promovida pela *Cooperação Europeia em Ciência e Tecnologia* (COST).

Quatro parâmetros são utilizados para a estimativa da atenuação pelo modelo de Hata: frequência (f), distância (d), altura da antena da estação base (h_{base}) e altura da antena do terminal móvel ($h_{móvel}$).

No modelo de Hata, que se baseia nas várias funções de correção de Okumura, a atenuação básica do enlace (L_b), em uma área urbana é dada pela equação 2.22.

$$L_b = 69,55 + 26,16 \log \frac{f}{MHz} - 13,82 \log \frac{h_{base}}{m} - a(h_{móvel}) + 44,9 - 6,55 \log \frac{h_{base}}{m} \log \frac{d}{km} \quad (2.22)$$

onde:

$$a(h_{móvel}) = \left(1,1 \log \frac{f}{MHz} - 0,7\right) \frac{h_{móvel}}{m} - \left(1,56 \log \frac{f}{MHz} - 0,8\right) \quad (2.23)$$

O modelo é restrito a:

f:	50 ... 1000 MHz
h_{base} :	30 ... 10 m
$h_{móvel}$:	1...10 m
d:	1...20 km

A COST estendeu o modelo de Hata para a banda de frequência $1500 \leq f(\text{MHz}) \leq 2000$ pela análise das curvas de propagação de Okumura. Esta combinação foi denominada "Modelo COST 231-Hata", que resultou na equação 2.24.

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log \frac{f}{\text{MHz}} - 13,82 \log \frac{h_{base}}{m} - a(h_{móvel}) + 44,9 - 6,55 \log \frac{h_{base}}{m} \log \frac{d}{\text{km}} + C_m \quad (2.24)$$

onde $a(h_{móvel})$ é definido em (2.23) e :

$$C_m = \begin{cases} 0 \text{ dB para cidades de médio porte e centros suburbanos} \\ \text{com média densidade de árvores} \\ 3 \text{ dB para centros metropolitanos} \end{cases}$$

O COST-Hata é restrito aos seguintes parâmetros:

f:	1500... 2000 MHz
h_{base} :	30 ... 200 m
$h_{móvel}$:	1...10 m
d:	1...20 km

O uso deste modelo é restrito a grandes ou pequenas células, isto é com altura da antena da estação base acima do nível do topo das construções adjacentes. (DAMOSSO, 1998, p. 135). Contudo, recentemente, este método tem sido utilizado para análise de predição em microcélulas, ou seja, raio inferior a 0,5 km (ARAI, 2013, p. 126).

Em A.2 está apresentada uma implementação em linguagem Python para cálculo da atenuação dada pelo Modelo COST-Hata que foi desenvolvida neste trabalho.

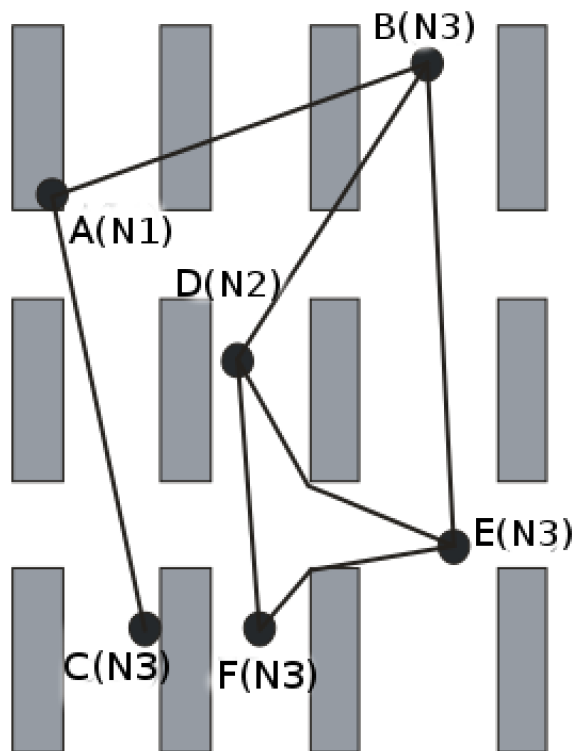
2.3.2 Modelo ITU-R P.1411-8

Trata-se de uma recomendação do ITU-R, em resposta à questão ITU-R 211/3, aplicável para o cálculo da atenuação de ondas radioelétricas em ambientes externos urbanos de curto alcance e frequência entre 300 MHz e 100 GHz (ITU-R, 2015, p. 1).

Os cálculos apresentados nesta recomendação distinguem os enlaces pela relação entre a altura das antenas e altura média das edificações ou a altura dos usuários, além da desobstrução ou não da linha de visada:

1. Estação A acima do nível do nível das construções (N1) e estações B ou C localizadas no nível de usuário no solo (N3). Os enlaces podem ser *LOS* (A para C) ou *NLOS* (A para B). Situações encontrada em microcélulas.
2. Estação D localizada acima do altura do usuário no solo, porém abaixo da altura das construções (N2) e estações E e F na altura de um usuário no solo (N3). Situações típicas de micro e picocélulas. Nestes cenários a propagação é principalmente em cânions de ruas.
3. Comunicação entre estações móveis localizadas na altura do usuário no solo, com visada (B para E) ou sem visada (E para F).

Figura 5 – Situações típicas de propagação em áreas urbanas



Fonte: ITU-R (2015, p. 5).

Neste trabalho, o cenário de medidas e simulações é classificado conforme o item 1, e teremos as situações A para B (*LOS*) e A para C (*NLOS*) conforme a Figura 5.

Requerimento de dados

São utilizadas informações de estruturas das edificações, altura relativa e absoluta das edificações e informação da vegetação.

Sugere-se uma resolução de 1 a 2 m para os arquivos de dados representados de forma vetorial e de 1 a 10 m para o formato *raster*. Além de precisão de 1 a 2 m em relação a altura das edificações.

Para os casos onde não há disponibilidade de informação de alta resolução, recomenda-se o uso de informações de uso e ocupação do solo com resolução aproximada de 50 m. (ITU-R, 2015, p. 7).

Modelos de cálculo de atenuação do enlace

a) Enlace com visada desobstruída

Para banda de UHF, o enlace é caracterizado por duas inclinações e um ponto de corte. A atenuação média $L_{LOS,m}$ é dada por:

$$L_{LOS,m} = L_{bp} + 6 + \begin{cases} 20 \log \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad (2.25)$$

onde R_{bp} é a distância até o ponto de corte em metros e é dada por:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad (2.26)$$

e o valor de L_{bp} é:

$$L_{bp} = \left| 20 \log \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_1 h_2} \right) \right| \quad (2.27)$$

b) Enlace com visada obstruída - Áreas Urbanas

Para as situações de comunicação entre A e B se aplicam as seguintes restrições:

- h_A : 4 a 50 m
- h_B : 1 a 3 m
- f: 0,8 a 5 GHz ou 2 a 16 GHz para $h_A < h_{\text{médio_edific}}$
e largura das ruas inferior a 10 m.
- d: 20 a 5000 m

É necessário considerar que caso a altura das edificações no percurso do enlace tiverem variação acima do valor do raio da primeira zona de Fresnel, recomenda-se o cálculo da difração conforme o método aplicado na recomendação ITU-R P.526.

Para os casos onde a restrição anterior não é aplicada, a atenuação total é o somatório da atenuação no espaço livre L_{bf} (2.2) acrescido de um fator de atenuação do topo dos edifícios para a rua L_{rts} e a atenuação de difração por múltiplos obstáculos (fileiras de edificações) L_{msd} .

$$L_{NLOS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

O termo L_{rts} descreve o acoplamento da onda propagando em um percurso de múltiplos obstáculos até uma rua onde a estação móvel está localizada. Este fator leva em consideração a largura e orientação da rua em relação a componente intensa do sinal recebido.

$$L_{rts} = -8,2 - 10\log(\omega) + 10\log(f) + 20\log(\Delta h_B + L_{ori}) \quad (2.29)$$

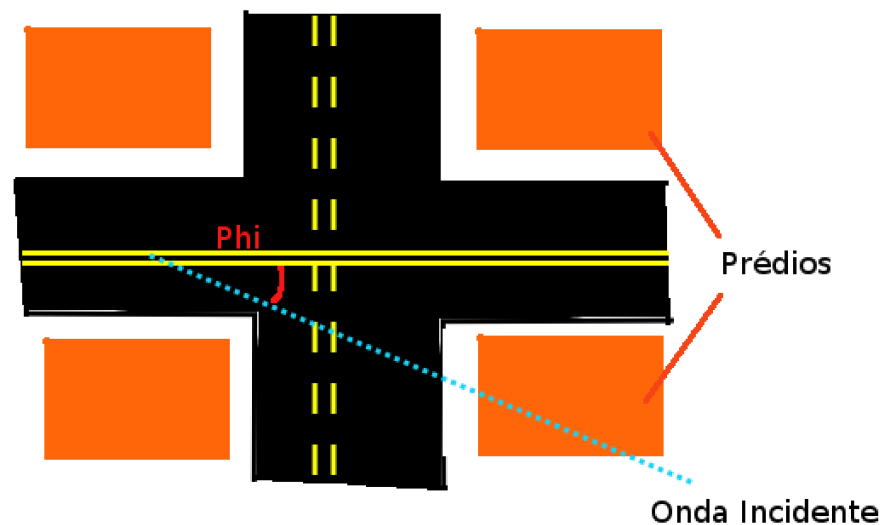
$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & \text{para } 0^\circ \leq \phi \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \phi \leq 55^\circ \\ 4,0 + 0,114(\phi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.30)$$

onde:

$$\Delta h_B = h_r - h_B \quad (2.31)$$

onde: h_B é altura da antena no ponto B e h_r é altura média das edificações.

Figura 6 – Φ_{ori}



Fonte: Elaborada pelo autor.

L_{ori} é o fator de orientação da rua onde a estação móvel se encontra, corrigindo o efeito da difração no topo das edificações quando a direção de propagação não é perpendicular.

$$L_{msd} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\chi}\right)(LA_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{para } l > d_S \text{ e } dh_{bp} > 0 \\ \tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\chi}\right)(LB_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{para } l \leq d_S \text{ e } dh_{bp} > 0 \\ LB_{msd}(d) & \text{para } dh_{bp} = 0 \\ LA_{msd}(d) - \tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\zeta}\right)(L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{para } l > d_S \text{ e } dh_{bp} < 0 \\ LB_{msd}(d) + \tanh\left(\frac{\log(d)-\log(d_{bp})}{\zeta}\right)(L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{para } l \leq d_S \text{ e } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

onde:

$$d_S = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_A^2}$$

$$\Delta h_A = h_A - h_r$$

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low}$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low})\nu$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2}$$

$$L_{upp} = LA_{msd}(d_{bp})$$

$$L_{low} = LB_{msd}(d_{bp})$$

$$d_{bp} = |\Delta h_1| \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$$

$$\nu = 0,0417$$

$$\chi = 0,1$$

Temos ainda:

$$LA_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log\left(\frac{d}{1000}\right) + k_f \log(f) - 9 \log(b)$$

onde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_1) & \text{para } h_1 > h_r \\ 0 & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{para } h_1 > h_r \\ 73 - 0,8\Delta h_1 & \text{para } h_1 \leq h_r \text{ e } d \geq 500 \text{ m} \\ 73 - 1,6\Delta h_1 d 1000 & \text{para } h_1 \leq h_r \text{ e } d < 500 \text{ m} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_1 > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_1}{h_r} & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases}$$

$$k_f = -8$$

$$LB_{msd}(d) = -10 \log(Q_M^2)$$

onde:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\delta h_1}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{para } h_1 > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{para } h_1 \leq h_r + \delta h_u \text{ e } h_1 \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{2\pi + \Theta} \right) & \text{para } h_A < h_r + \delta h_l \end{cases}$$

onde:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\Delta h_1}{b}\right)$$

$$\rho = \sqrt{\delta h_1^2 + b^2}$$

$$\delta h_u = 10^{-\log\left(\frac{b}{\lambda}\right) - \frac{\log(d)}{9} + \frac{10}{9} \log\left(\frac{b}{2,35}\right)}$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log(f))^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923$$

Em A.3 está apresentada uma implementação em linguagem Python para cálculo da atenuação dada pela Recomendação ITU-R P.1411 que foi desenvolvida neste trabalho.

2.3.3 Modelo ITU-R P.525-3 / 526-13

A recomendação ITU-R P.525-3 estabelece o cálculo da atenuação em espaço livre pela equação (2.2) (ITU-R, 2016, p. 1).

A recomendação ITU-R P.526-13 estabelece um método de cálculo de atenuação por difração baseado na construção de Bullington, mas também faz uso do modelo de difração da Terra esférica. Estes modelos são combinados de modo que, para um percurso sem obstruções, o resultado será o mesmo que o resultado encontrado utilizando o modelo de Terra esférica e para os casos onde há obstrução da linha de visada por múltiplos obstáculos aplica-se o método de Bullington (ITU-R, 2013, p. 27 a 31).

Segundo (VAUGHAN; ANDERSEN, 2003), para planejamento de macro-células, este modelo associado a um fator de correção baseado na cobertura do terreno vem mostrando boa performance.

A recomendação ITU-R P.526 apresenta um método generalizado de cálculo computacional para obtenção da difração por um ou mais obstáculos. Inicialmente calcula-se a maior inclinação dos obstáculos, elevações do terreno ou edificações, até o transmissor:

$$S_{tim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad (2.33)$$

onde:

- h_i : altura de um dos obstáculos no percurso do enlace
- C_e : Recíproco do Raio de curvatura da Terra
- h_{ts} altura da antena do transmissor
- d_i distância do obstáculo até o transmissor
- d comprimento total do enlace

Calcula-se a inclinação do enlace:

$$S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad (2.34)$$

A partir destes cálculos existem dois procedimentos distintos, um para LOS ($S_{tim} < S_{tr}$) e outro para NLOS ($S_{tim} \geq S_{tr}$).

LOS

Encontra-se o ponto com maior parâmetro de difração v :

$$v_{max} = \max \left[h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \quad (2.35)$$

A atenuação será dada por:

$$L_{uc} = F(v_{max}) \quad (2.36)$$

onde F é a solução de (2.11).

NLOS

Calcula-se a maior inclinação dos obstáculos do perfil do terreno/edificações com relação ao receptor:

$$S_{rim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad (2.37)$$

Calcula-se a distância e o parâmetro de difração do obstáculo de Bullington equivalente:

$$d_b = \frac{h_{rs} - h_{ts} - S_{rim}d}{S_{tim} - S_{rim}} \quad (2.38)$$

$$v_b = \left[h_{ts} + S_{tim}d_b - \frac{h_{ts}(d - d_b) + h_{rs}d_b}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_b (d - d_b)}} \quad (2.39)$$

A atenuação do obstáculo é dada por:

$$L_{uc} = F(v_b) \quad (2.40)$$

Uma vez que a atenuação L_{uc} foi calculada para ambos os casos, a atenuação do enlace é dada por:

$$L = L_{FSL} + L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02d) \quad (2.41)$$

2.4 Descrição Estatística do Canal Radio-Móvel

Devido às dificuldades de descrever o comportamento de todos os fenômenos de propagação que determinam os diferentes componentes de multipercurso no canal, pode ser preferível descrever o valor estatístico provável de certos parâmetros. O parâmetro mais importante é a atenuação do canal, determinante para o nível de sinal recebido (MOLISCH, 2012, p. 69).

Quando o receptor muda de localização em um ambiente de edificações de diferentes tamanhos e cruzamentos de ruas, ocorre uma rápida flutuação no nível do sinal recebido. A escala média de variação do sinal, que está relacionada à quantidade e dimensões das edificações no entorno, recebe o nome de desvanecimento longo ou de pequena escala. O aumento da atenuação do sinal é proporcional ao aumento da distância da estação base (BERTONI, 1999, p. 17).

Outro fenômeno que se observa é uma flutuação rápida na amplitude do sinal em um curto período de tempo ou pequenos deslocamentos da estação, mesmo que os efeitos da atenuação de pequena escala sejam desprezíveis. Denominado desvanecimento rápido, ocorre em razão da interferência entre duas ou mais versões do sinal transmitido que chega ao receptor em tempo diferido, devido aos multipercursos no ambiente. Os principais fatores que influenciam o desvanecimento rápido são (RAPPAPORT *et al.*, 1996, p. 139):

- Propagação de multipercurso relacionado a presença de objetos refletivos ou espalhadores no ambiente.
- Velocidade da estação móvel, cujo deslocamento relativo provocado em relação à estação base resulta em modulações em frequência aleatórias devido aos diferentes desvios Doppler das componentes de multipercurso.
- Velocidade dos objetos no entorno alterando os caminhos de multipercurso.
- Largura de transmissão do sinal, que pode ser superior à largura de banda do canal multipercurso.

Em canais radio-móvel, a distribuição de Rayleigh é comumente utilizada para descrever estatisticamente a variação temporal do envelope total recebido ou do envelope de uma componente individual de multipercurso. Sabe-se que o envelope da soma de dois sinais de

ruído Gaussiano em quadratura obedece à distribuição de Rayleigh. A função densidade de probabilidade (pdf) da distribuição de Rayleigh é dada por:

$$\rho(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & \text{para } 0 \leq r < \infty \\ 0 & \text{para } r < 0 \end{cases} \quad (2.42)$$

onde σ é o valor *rms* da tensão do sinal recebido antes da detecção do envelope e σ^2 é a média temporal de potência do sinal recebido antes da detecção do envelope do sinal. A probabilidade para que o envelope do sinal recebido não exceda um valor R é dado pela correspondente função de distribuição acumulada (CDF):

$$P(R) = P_r(r \leq R) = \int_0^R \rho(r) dr = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.43)$$

O valor médio $r_{\text{médio}}$ da distribuição de Rayleigh é dada por:

$$r_{\text{médio}} = B[r] = \int_0^x r \rho(r) dr = \sigma \sqrt{\frac{x}{2}} = 1.2533\sigma \quad (2.44)$$

E a mediana do valor de r é:

$$r_{\text{mediana}} = 1.177\sigma \quad (2.45)$$

A diferença entre os valores médio e mediano é de 0,55 dB na atenuação de uma sinal Rayleigh. O valor da mediana é bastante utilizado na prática, quando os dados de atenuação são medidos em campo e uma distribuição em particular não pode ser considerada. Usando os valores de mediana e não de média é de simples comparação diferentes distribuições que tenham médias muito díspares.

Em outra situação, quando há presença de uma componente estacionária dominante, como nos casos de propagação com linha de visada desobstruída, a distribuição do envelope é riceana. Os efeitos das componentes multipercorso são minorados pela presença de uma componente intensa.

A distribuição riceana é dada por:

$$\rho(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) & \text{para } A \geq 0, r \geq 0 \\ 0 & \text{para } r < 0 \end{cases} \quad (2.46)$$

onde A é o valor de pico da amplitude da componente dominante e $I_0()$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e de ordem zero. (RAPPAPORT *et al.*, 1996, p. 175 e 176)

Bases Representacionais de Ambientes Urbanos

3.1 Introdução

A determinação dos efeitos dos fenômenos de propagação no canal radio-móvel na faixa de UHF é dominada pelas considerações de espalhamento nas superfícies. Antes de realizar os cálculos relacionados à propagação, estas superfícies devem ser caracterizadas (DAMOSSO, 1998).

O desenvolvimento de técnicas de predição para estimativa de características do canal é cíclico, um processo de três estágios: primeiro, obter um modelo de superfície apropriado para alcançar predições com precisão aceitável. O segundo passo é encontrar soluções (numéricas ou aproximadas) que atendam aos problemas propostos. E por último confirmar a escolha feita no primeiro estágio (DAMOSSO, 1998, p. 115).

3.2 A Disponibilização Adequada de Dados de Representação de Ambiente a Depender da Solução Proposta

Os problemas canônicos usados para testes das técnicas de propagação das ondas eletromagnéticas descrevem o ambiente e os espalhadores através de polígonos geométricos simplificados. Nestes problemas as superfícies são descritas através de suas primitivas geométricas com precisão suficiente.

Modelos empíricos ignoram formas descritivas de ambientes, atendo-se apenas às restrições que envolvem, de alguma forma, a conformidade do terreno, com amplas margens de variação.

Modelos geométricos e soluções numéricas requerem informações descritivas com maior precisão. Contudo, a resolução desta informação espacial impacta diretamente sobre o

volume de dados a ser processado, cujo tamanho está vinculado diretamente pela extensão da área de abrangência. Assim, esta demanda por refinamento descritivo deve-se limitar à capacidade de precisão da solução que será utilizada. Portanto, deve-se considerar os seguintes pontos na especificação da representação do ambiente:

1. Comprimento de Onda
2. Capacidade de processamento *versus* quantidade de espalhadores
3. Eixos de projeção utilizados pelo modelo
4. Margem de erro do resultado entregue pelo modelo

3.3 Sistemas de Informações Geográficas (GIS)

Geographic Information System (GIS) se destinam a captura, gestão, manipulação, integração, análise, visualização e disseminação de dados espaciais. O componente principal é o interpretador dos modelos de dados espaciais. Estes modelos são coleções de conceitos descritivos quanto a forma de representação das características geográficas, além da estrutura, relacionamento e organização. (ZHU, 2016, p. 59)

Atualmente os dados dos sistemas GIS são armazenados na forma de *rasters* (matriz de mapeamento de pontos digitalizados), vetores ou modelos orientados a objetos.

Raster

São arquivos de imagem, processadas de forma a associarem algum atributo a cada pixel visualizável (célula). O modelo raster registra cada feição geográfica e sua propriedade por células (ZHU, 2016, p. 67). São utilizados frequentemente para representação de relevos (*Digital Elevation Model* (DEM)) ou ocupação de solo (*clutter*). Os arquivos de DEM podem ser definidos relativo a algum sistema de coordenadas (por exemplo *UTM* ou diretamente pelas respectivas latitudes/longitudes) e são descritos por sua resolução ou pós-espacamento (SHEKHAR; XIONG, 2007, p. 218).

Vetores

São utilizados para descrições de ambientes complexos, através de primitivas: pontos, linhas e polígonos. As estruturas de dados são geolocalizadas por coordenadas ou referências de adjacência, como dito em Shekhar e Xiong (2007) e Zhu (2016, p. 160)

Um dos formatos utilizados é o *shapefile*, composto pelos arquivos do tipo .shp (arquivo principal), .shx (índice), .dbf (base de dados de atributos). Outra forma comum são as malhas irregulares de triângulos (YANG, 2014, p. 223).

Modelos orientados a objetos

As informações geográficas são armazenadas como objetos, incluindo geometria, topologia e atributos. Um objeto encapsula estado e comportamento, e pode armazenar todos os relacionamentos que o objetos tem com os demais. Cada objeto é definido como um componente separado ou bloco de construção.

Associação de dados em camadas

Os softwares de predição de sinal fazem uso da composição de camadas à partir de arquivos de informações geolocalizadas para os cálculos, tais como: coordenadas geográficas, altimetria, alturas de construção e ocupação do solo.

Preferencialmente, as camadas devem possuir a mesma resolução do arquivo de elevação do terreno para uma maior precisão. Em alguns softwares, como por exemplo o ICS Telecom da ATDi Inc., a resolução da camada de relevo determina a resolução de varredura para o cálculo do mapa de predição de nível de sinal na área de interesse.

3.4 Dados Geográficos do Brasil

Os mapas de relevo disponíveis para o Brasil de uso geral, possuem a resolução de 30 m e estão disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe)¹. Estes mapas, advêm de uma base chamada *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Porém, esta base disponibilizada ao público em geral é nativa na resolução de 90 m, tratada e interpolada para a resolução de 30 m (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2009).

Já para as informações de ocupação de solo, temos disponíveis dados com resolução de 15 m, oriundos de imagens realizadas pelo *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat), segundo Bosquilia *et al.* (2016, p. 562).

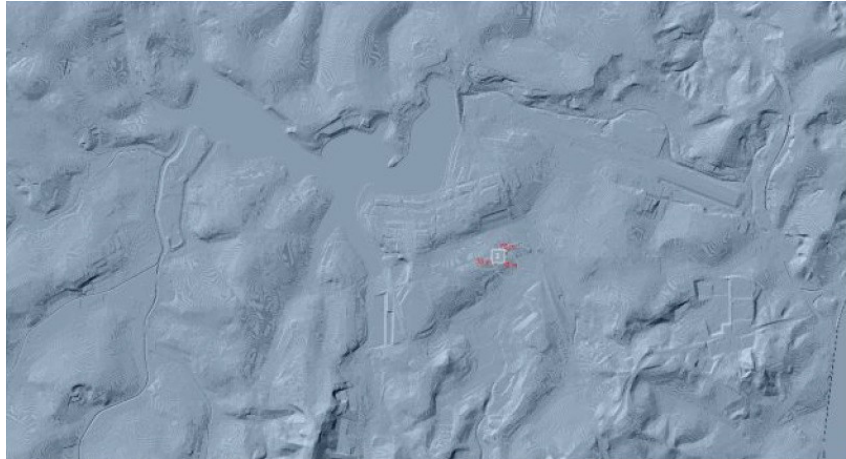
Informações sobre os obstáculos e altitude de relevo com 2 m de resolução traduzem em uma imagem muito próxima da realidade do ambiente em que foram realizadas as medidas. Esta técnica se sobressai quanto a caracterização do topo das edificações uma vez que fornecem informações mais refinadas para os modelos de propagação mais complexos e consequentemente favorecem a realização de predições de cobertura com maior precisão. Atualmente uma das técnicas mais promissoras para que se alcance tal resolução é o uso dos sistemas LiDAR, que permite alta densidade de informação geométrica de superfície na forma de varreduras laser tridimensionais referenciadas por GPS (HABIB *et al.*, 2007, p. 1 e 2).

Nas Figuras 7(a), 7(b) e 7(c) são exibidas as imagens das camadas de relevo (DEM), de ocupação do solo (*clutter*) e altura das construções (*building heights*) em alta resolução (2 m), mapas que foram adquiridos pela Anatel.

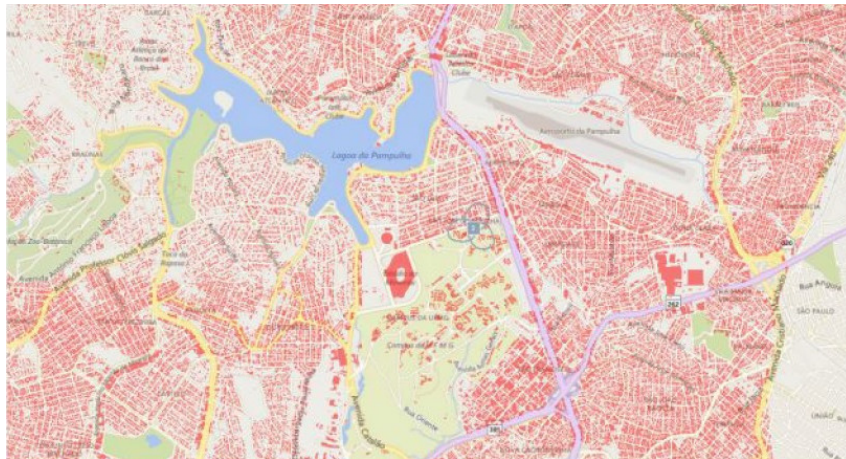
¹ <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>

Figura 7 – Exemplos de representações mápicas com resolução de 2 m

(a) Relevo



(b) Cobertura



(c) Edificações



Fonte: Elaborada pelo autor.

Campanha de Medidas e Tratamento dos Dados Coletados

4.1 Procedimentos de medição

No ano de 2014, uma parceria realizada ente a UFSJ, UFMG e Anatel proporcionou a realização de uma campanha de medições para realização de estudos de propagação nas faixas de frequência destinadas ao SMP, especialmente às tecnologias de terceira e quarta gerações.

Como principal produto foi produzida uma base de dados de informações georreferenciada coletando diversos parâmetros de redes em operação em uma área ao redor da Universidade Federal de Minas Gerais, conforme área delimitada pela Figura 8.

Figura 8 – Delimitação da área de realização da campanha de medições



Fonte: Edição baseada em imagem do GoogleEarth®

Para a coleta dos dados a Agência Nacional de Telecomunicações utilizou um analisa-

dor de redes de rádio com função de varredura apropriado para incursões de *drive-test*. O equipamento fabricado pela empresa Rhode&Schwarz, modelo TSMW, possui dois receptores de RF independentes com largura de banda de 20 MHz, opera na faixa entre 30 MHz e 6 GHz e possui GPS integrado. Suporta medições de redes LTE FDD, TD LTE, GSM, WCDMA, CDMA200 1xEVDO, TETRA e WiMax™. Em redes *Wide-Band Code-Division Multiple Access* (WCDMA) é capaz de medir simultaneamente até 12 portadoras, a uma taxa de até 100 amostras por segundo e com sensibilidade de até -123 dBm, segundo as especificações do fabricante em Shwarz (2010, p 9 a 11).

Foi utilizado um veículo embarcado com o TSMW e uma antena omnidirecional, com ganho de 0 dBi, modelo BMLPV-MBLTE-HP do fabricante PCTel, no teto, ou seja, a uma altura de 1,7 metros.

Figura 9 – Configuração típica do equipamento utilizado na campanha de medições



Fonte: Shwarz (2010).

4.2 Escolha da estação transmissora e área de simulação

Embora os sinais de 6 estações base alcançassem a área de interesse, para fins deste trabalho, foram utilizadas as medições referentes a estação especificada na tabela 2, pelos motivos à seguir.

A diversidade de formas de cobertura do solo (*clutter*) e diferentes perfis de relevo na área de abrangência da estação base foram o ponto inicial da escolha, além da disponibilidade de mapas de alta resolução no entorno.

Foram levados em consideração outros aspectos como frequência de operação, altura da antena transmissora dentro dos limites suportados por diversos modelos de propagação, e informações sobre os equipamentos de transmissão utilizados no sítio.

Somadas a estas características a principal foi a utilização de tecnologia WCDMA. Esta tecnologia apresenta aspectos que favoreceram a execução da campanha de medições de intensidade de sinal em uma rede em operação:

Tabela 2 – Características técnicas da estação base

Endereço: Av. Antônio Abrahão Caram - nº S/N (Campus da UFMG)					
Coordenadas: Latitude: 19°51'39,1"S (-19,860861), Longitude: 43°57'45,9"O (-43,96275)					
Altitude: 813,9 m					
Faixa de frequência: 2,155 a 2,165 GHz (Fc=2,16 GHz)					
Tecnologia: HSPA					
Antenas (todos os setores): Fabricante: Comba, Modelo: ODV-065R15B15J15J					
Configuração dos setores:					
Setor	Ganho Max [dBi]	Azimute [grau]	Altura [m]	Potência Máxima[dBm]	Tilt Mecânico [grau]
1	15,8	15	50	46	10,4
2	15,8	35	50	46	10,4
3	15,8	255	50	46	10,4

- Distinção de transmissores pela não-correlação de sinais pelo uso de código.
- Transmissão de sinal piloto com potência fixa.

Distinção de sinal

Segundo Tapia *et al.* (2009, p. 12) e Song e Shen (2010, p. 6) é característica destacada nos sistemas de comunicação pessoal móvel, o reuso de frequências. Assim, há ocorrência de sinais no mesmo canal de RF não oriundos da estação de interesse dentro da área de abrangência, o que prejudica os resultados da apuração do nível de sinal recebido oriundo de determinada estação (interferência co-site). Contudo, apesar das redes WCDMA utilizarem fator de reuso igual 1, o uso de diferentes códigos de embaralhamento ortogonais na modulação permitem a correta discriminação do sinal desejado, em relação às demais fontes de interferência.

Sinal piloto fixo

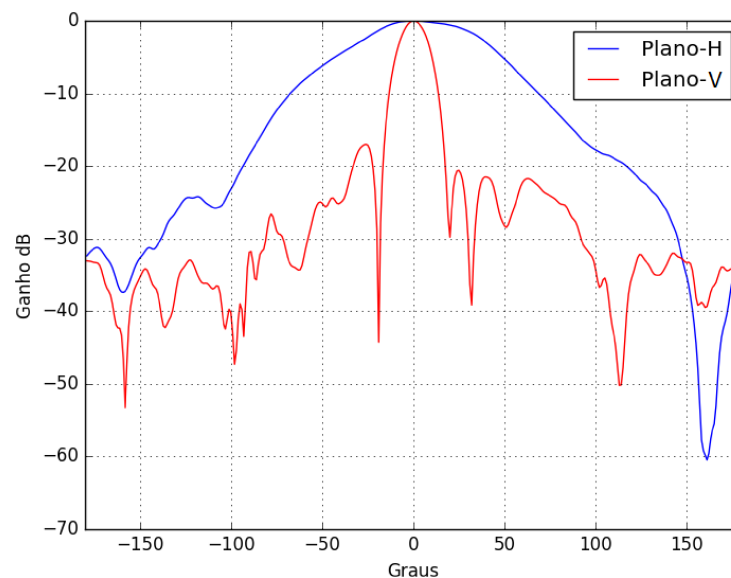
As redes móveis fazem uso do controle dinâmico de potência, prejudicando o levantamento da atenuação do enlace, uma vez que a potência transmitida é variável. As redes WCDMA reservam um canal para transmissão de uma portadora piloto comum (CPICH), não sujeito ao ajuste dinâmico, configurado para utilizar 10% da potência total do transmissor, de onde extrai-se a potência de sinal recebida por código de embaralhamento *Received Signal Code Power* (RSCP). Sob este mesmo parâmetro são definidos os critérios de nível de sinal recebido na estação móvel para procedimentos de *handover*. Estas informações estão presentes em Tapia *et al.* (2009, p. 135) e Song e Shen (2010, p. 145 a 148).

4.3 Parâmetros da estação transmissora

Montados sobre uma torre, 50 m acima do solo, estão três unidades de rádio remota do fabricante Ericson, modelo RBS-3518, um para cada um dos três setores que compõem a estação base. O uso de transmissores junto às antenas tornam desprezíveis as perdas de alimentação até as antenas. Cada transmissor opera na banda IV (1700 a 2100 MHz), e entrega 40 W nominais (ERICSSON, 2007, p. 13).

Cada setor foi equipado com uma antena direcional do fabricante Comba, modelo ODV-065R15B15J15J, com ganho 15,8 dBi na direção de máxima irradiação e cujo diagrama de irradiação normalizado está apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de irradiação normalizado da antena ODV-065R15B15J15J



Fonte: Dados Técnicos Fornecidos pelo Fabricante

Os setores foram configurados nos azimutes de 15° , 135° e 255° , com um *tilt* mecânico de $10,4^\circ$.

4.4 Base de medidas e tratamento do dados

No raio de 1000 metros da estação base foram coletadas 5.192 medidas georreferenciadas de CPICH-RSCP. As medidas foram realizadas em sua grande maioria com o veículo em movimento. Uma vez que o TSMW estava programado para varrer vários canais das redes implantadas no local das medições, a taxa de amostras por segundo configurada foi próxima a 5.

Como a taxa de amostragem foi relativamente baixa para as velocidades registradas pelo veículo durante a campanha, em torno de 50 km/h, foi necessário aplicar o método de Lee para estimativa da potência média local do sinal rádio móvel, minimizando os efeitos do desvanecimento rápido. Tornando possível a comparação deste conjunto de dados com os resultados obtidos através das diversas técnicas de predição de cobertura.

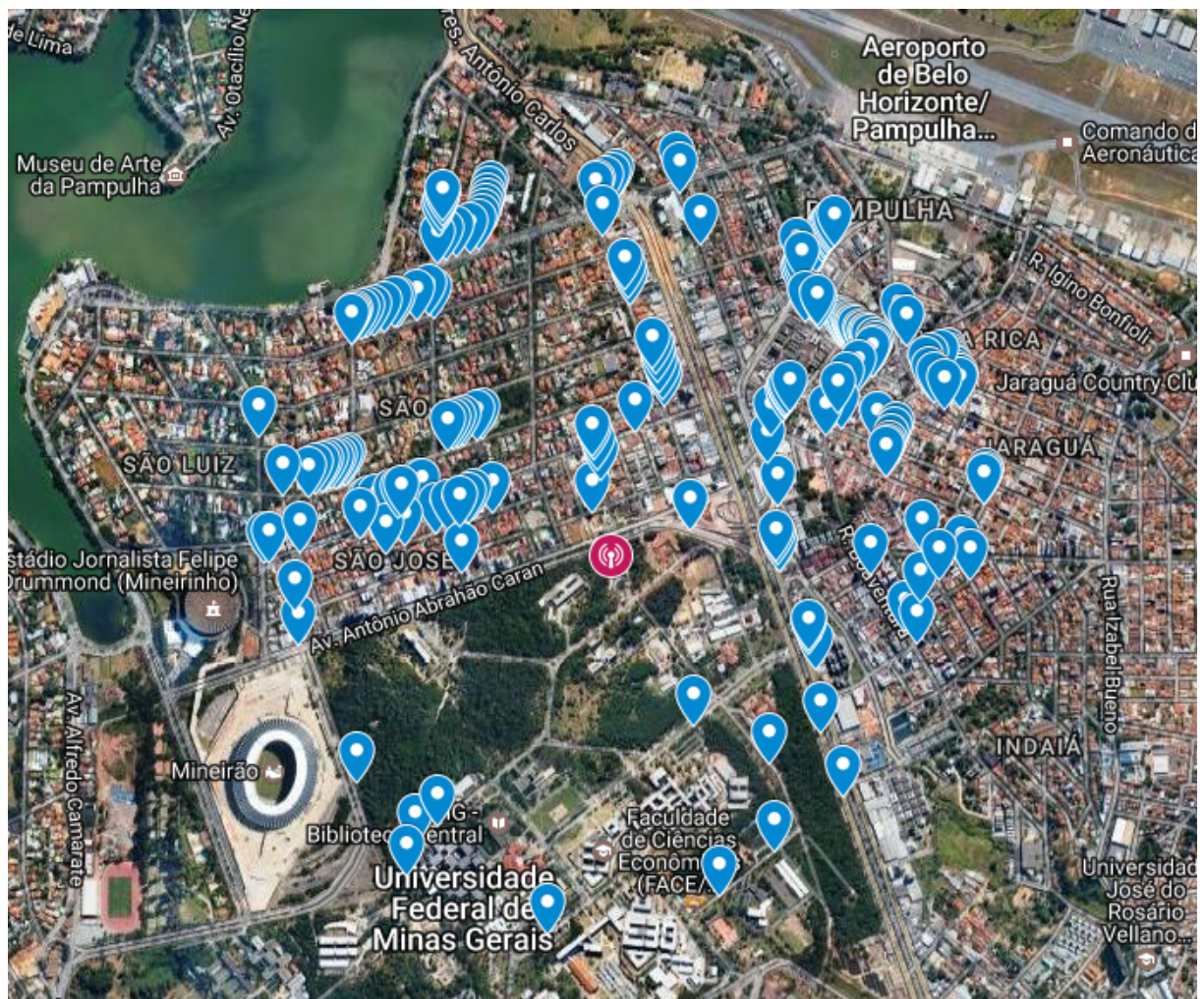
Este método é o procedimento de referência para estimar a potência média local, em regime permanente, do sinal radio móvel que é recomendado pelo ITU-R (ITU-R, 2005, p. 3 e 4) e CEPT (CEPT, 2000, p. 2). Trata-se de uma sistematização da técnica sugerida em Clarke (1968), estabelecendo os parâmetros necessários para obtenção da média local, quais sejam: comprimento da janela de média ($2L$), número mínimo de amostras (N) e a distância mínima (d) para que as amostras sejam consideradas descorrelacionadas. O valor médio local é obtido pela média de pelo menos N amostras do valor instantâneo do nível de sinal, separados por uma distância d e obtidos em uma distância de até $2L$. (VEGA *et al.*, 2009, p. 506 e 507)

De acordo com Lee (1985a, p. 24 e 25) esta distância ($2L$) deve ser igual a 40λ .

Foi desenvolvido um script em linguagem *Visual Basic for Application* (VBA) para a aplicação do referido método, produzindo 195 pontos georeferenciados com os respectivos valores de nível de sinal médio.

Apesar da redução significativa de pontos, restou preservada a dispersão geográfica na área de interesse, como ilustra a Figura 11. Este conjunto de valores resultante passou a ser considerados como a base de referência de medidas para ajustes e comparação dos métodos de predição de cobertura de sinal neste trabalho.

Figura 11 – Distribuição geográfica dos pontos de amostra de nível médio de sinal



Fonte: Imagem do Google Earth® combinada com geolocalização dos pontos

Implementação de Modelos de Radiopropagação com Análise de Dados Geolocalizados

5.1 Introdução

Como dito anteriormente na Seção 2.3, para obter os resultados esperados neste trabalho foram selecionados três modelos de propagação para implementação computacional. Esta seleção se baseou nas restrições encontradas em diversos modelos conhecidos, optando-se por aqueles que pudessem ser aplicadas no ambiente de medições existente, são eles: COST 231-Hata, ITUR-P.1411 e ITUR-P.525/526.

Estes três modelos em conjunto fazem uso das informações de representação de ambiente disponíveis, quais sejam, dados de elevação de terreno, descrição da forma das edificações, edificações/cobertura do solo e descrição geométrica do arruamento. Além de apresentarem restrições compatíveis com o cenário e condições da rede rádio móvel escolhida.

Um dos requisitos do desenvolvimento foi a capacidade de exportar os resultados para comparação com a base de medições descrita no Capítulo 4 e aos dados de simulação do software comercial disponível, *ICS Telecom*.

5.2 Arquitetura

Para o desenvolvimento, optou-se por um desenho modular do software, vislumbrando que o reuso de código seria possível entre os modelos de propagação que se desejava implementar. A implementação modular também permite a evolução futura adicionando-se novos modelos e funcionalidades sem alteração no sistema base.

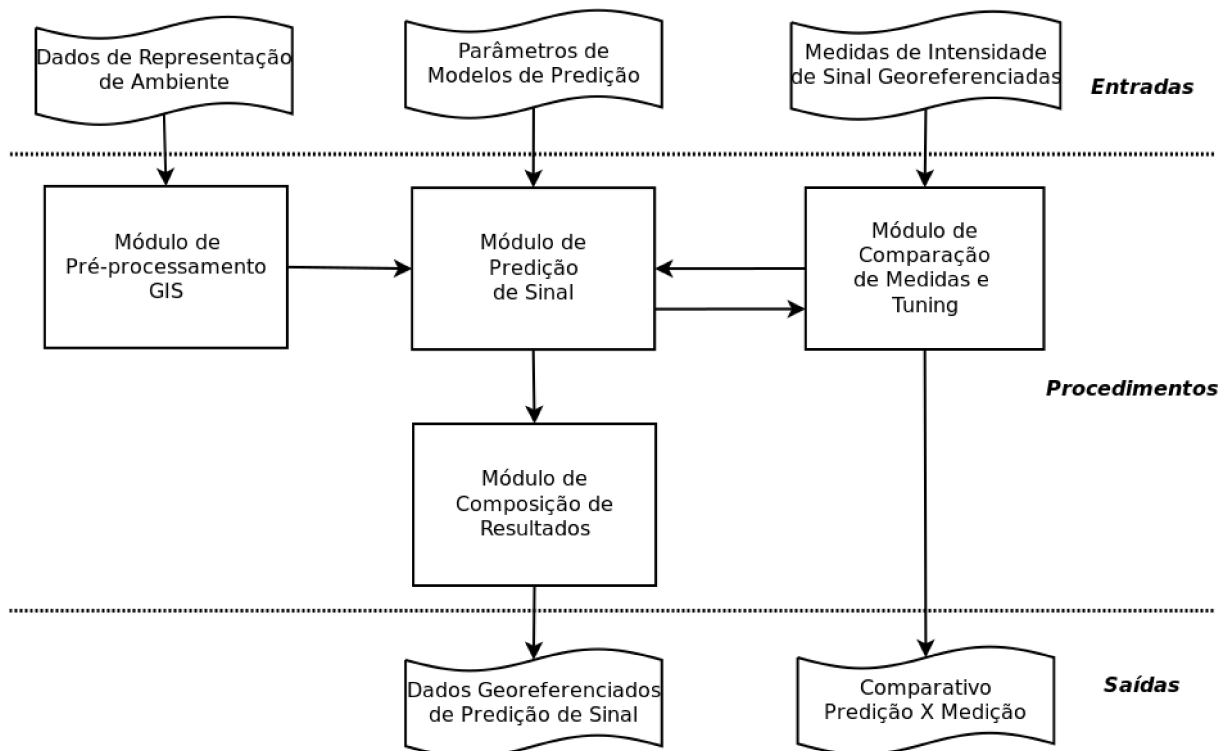
Foram quatro módulos desenvolvidos:

- Módulo de Pré-processamento GIS

- Módulo de Comparação de Medidas e Calibração (*Tuning*)
- Módulo de Composição de Resultados
- Módulo de Predição de Sinal

O relacionamento entre estes módulos está representado na Figura 12 e serão pormenorizados nas seções a seguir.

Figura 12 – Arquitetura modular da implementação



Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma geral, o sistema é uma adaptação do Método de Durkin (PARSONS, 1992, p. 54 a 56). Neste método a área interesse da análise é gradeada, e realizada a análise dos enlaces entre a estação base e cada um dos centroides das células da grade, este processo está detalhado em Edwards e Durkin (1969, p. 1493 a 1495).

De forma ilustrativa, na Figura 13 a análise do enlace entre os pontos TX e RX, representado pela reta pontilhada que une os dois pontos, requisita que se considere todas as células sob a reta. Cada célula da grade traz os atributos: altura em relação ao solo (podendo ser nulo caso não haja edificações no ponto), elevação em relação ao nível do mar e definição de uso/ocupação. Todas estas informações estarão dispostas em uma matriz 3D que representa toda a grade, nesta matriz os parâmetros de linha e coluna referem-se à localização (coordenadas geográficas) e na terceira dimensão estão armazenados as propriedades ou atributos da localização.

Figura 13 – Visualização da grade de amostra do ambiente



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 Módulo de Pré-processamento GIS

Em ambientes externos quando utilizamos resoluções de representação da ordem de metros, mesmo pequenas áreas como as cobertas por pico e micro-células, apresentam grandes quantidades de pontos ou objetos descritos. A título de exemplo, a área de aproximadamente 18 km^2 (um perímetro próximo de $4,2 \text{ km}$) da Figura 7, utilizando-se uma resolução de 2 metros, temos 26.667 objetos e 3.730.312 blocos de representação de relevo.

Este volume de objetos descritivos requerem mecanismos eficientes para o acesso a seus atributos. Neste trabalho, a estratégia utilizada foi a criação de um módulo pré-processamento. As informações de representação espacial da área sob análise devem ser tratadas por este módulo e seu produto pode ser eficientemente interpretado pelos demais módulos.

Os diversos conjuntos de representação de dados de descrição de ambiente são agrupados em camadas por similaridade de atributo, formando camadas separadas de: dados de elevação, altura de edificações, uso/cobertura de solo e geometria de arruamento.

À partir destas camadas, cria-se uma grade simétrica de extensão idêntica à da camada de menor extensão. Cada célula da grade tem dimensões iguais à resolução da camada com menor resolução. Esta grade é utilizada para realizar a varredura dos atributos de cada uma das camadas e reuni-los como atributos da grade gerada.

Além do gráfico os conjuntos de valores são comparados, quanto aos seguintes indicadores:

- Erro médio em dB
- Erro RMS
- Desvio padrão do módulo do erro
- Fator de correlação de Pearson
- Percentual de pontos com erro menor que 6 dB entre o conjunto predição e conjunto medido

O erro médio também é discretizado por *clutter* no conjunto predito. Estes valores são utilizados para ajuste do sistema de predição. Conforme a equação 5.2:

$$Att_{dB} = Att_{predita} - Erro_{medio\ clutter} \quad (5.2)$$

onde Att_{dB} é o valor da atenuação do enlace calculada para o respectivo ponto.

Após a calibração, um novo rol de indicadores para os pontos ajustados e um novo gráfico relacionando os valores ajustados *versus* os valores medidos é exibido, como exemplo demonstrado pela Figura 15. Caso o usuário identifique melhoras nos resultados ajustados, pode-se solicitar que os valores do fator de ajuste fiquem armazenados para que componham os próximos cálculos de predição.

Este módulo também permite a análise do resultado de predição para um único ponto, devem ser fornecidas as coordenadas do ponto, como resultado é exibido o perfil de relevo do enlace e o resultado da predição (Figura 16).

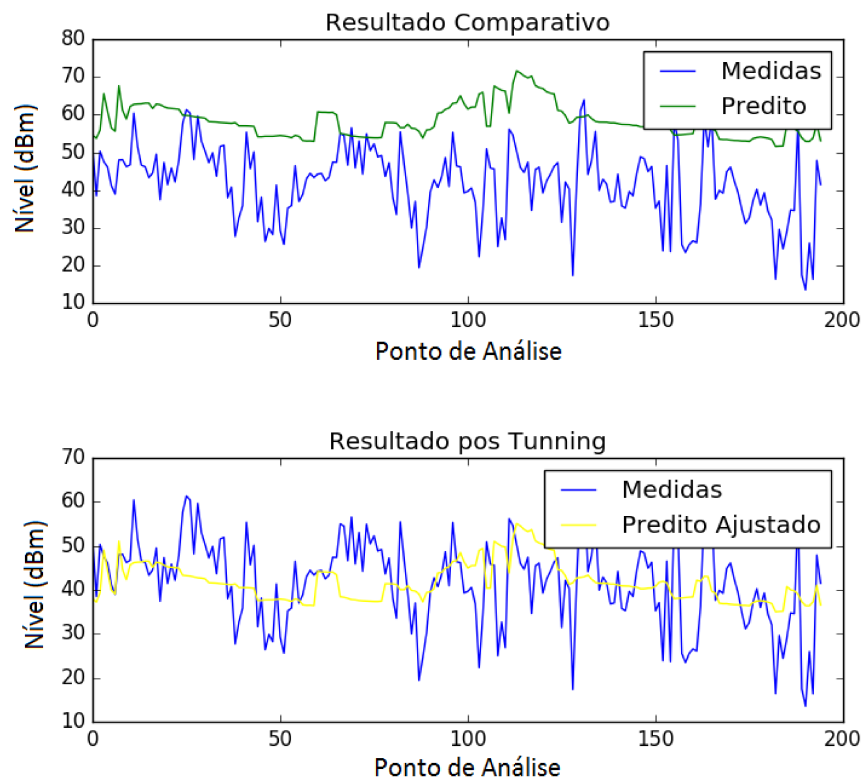
5.5 Módulo de Composição de Resultado

Este módulo tem por finalidade a representação dos dados de predição do Módulo de Predição de Sinal no formato de uma camada raster exportada para um arquivo do tipo *GEOTIFF*. Além disto, é montada uma visualização contendo o resultado da predição e uma visualização da área utilizando camada importada da base de dados aberta OpenStreetMap¹ com o uso do *plugin* OpenLayers². Os dados de predição são apresentados em uma escala gradual de cores de *colormap* do menos intenso em amarelo até o mais intenso em vermelho. As células onde o nível predito está abaixo do limite mínimo estipulado não são exibidos. Esta visualização é exportada no formato *.png*. Na Figura 17 temos um exemplo desta visualização.

¹ <<https://www.openstreetmap.org/>>

² <https://plugins.qgis.org/plugins/openlayers_plugin/>

Figura 15 – Exemplo de gráfico resultado do Módulo Comparação de Medidas e Calibração



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.6 Módulo de Predição de Sinal

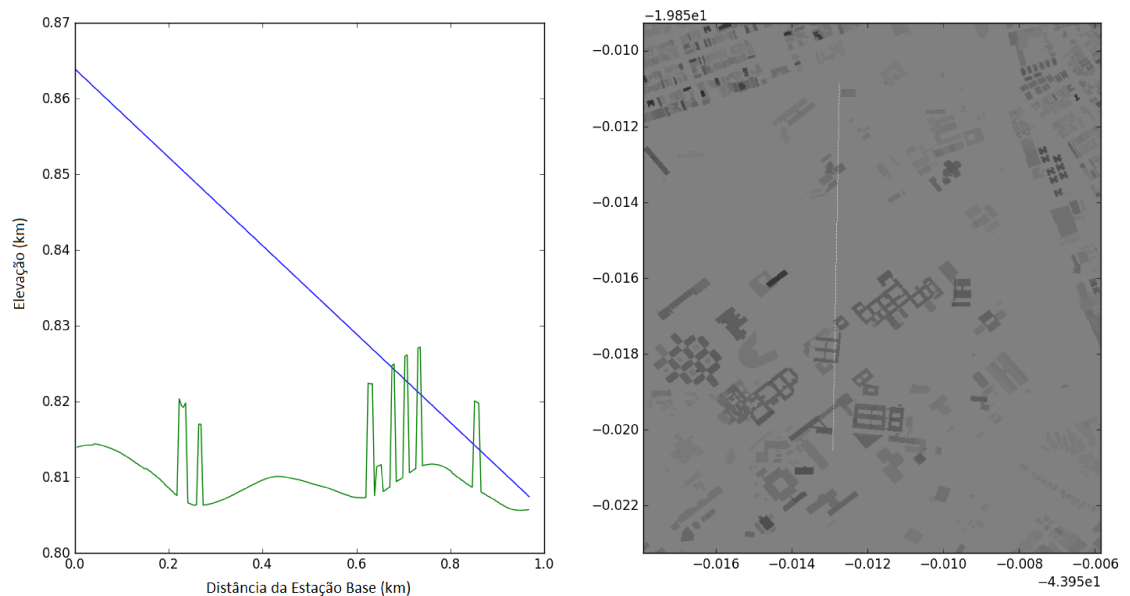
Neste módulo são realizadas as operações finalísticas do sistema. Suas funções estão organizadas conforme o fluxograma apresentado na Figura 18.

Ele faz interface com todos os outros módulos (vide Figura 12), recebendo ou passando parâmetros. Contudo, a interação essencial é com o Módulo de Pré-processamento GIS, que fornece a compilação de dados de representação de ambiente em uma grade regular, representada na forma de uma coleção de indexada de vetores.

Este módulo, requisita os seguintes parâmetros de entrada:

- Coordenadas da estação base em graus decimais.
- Altura das antenas com relação ao solo em metros.
- Frequência de operação em MHz.
- Ganho máximo das antenas em dBi e diagrama de irradiação

Figura 16 – Detalhes de um enlace: a) perfil de elevações de relevo/edificações b) vista aérea



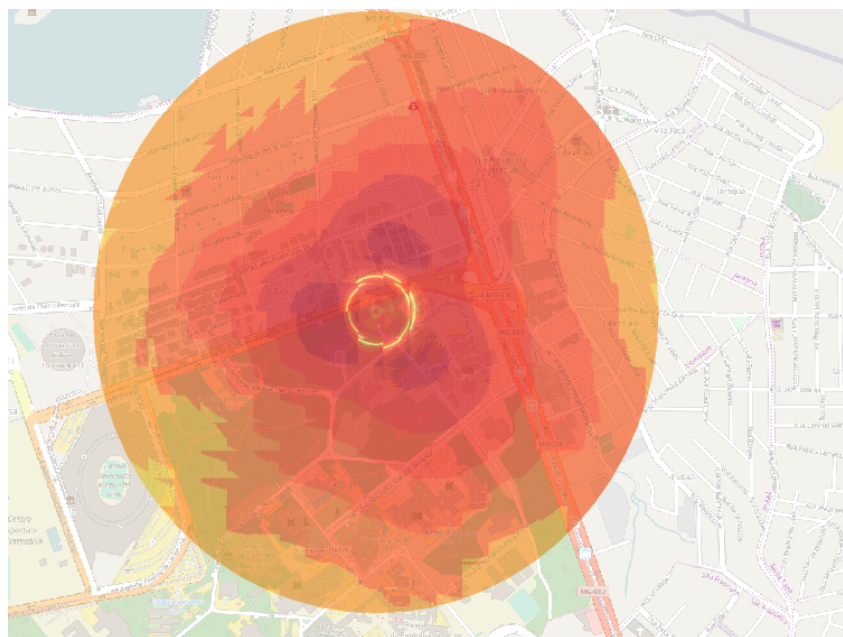
Fonte: Elaborada pelo autor.

- Quantidade de setores.
- Azimute dos setores.
- Inclinação das Antenas.
- Potência dos transmissores da estação base em dBm.
- Sensibilidade mínima da estação móvel em dBm.
- Raio de interesse entorno da estação base em metros.
- Modelo de propagação utilizado para predição.

Quanto ao diagrama de irradiação das antenas, devem ser informados em dois arquivos, um *.SPV* que é um arquivo texto contendo ganho da antena no plano E, informado em uma única coluna com passo de 1° , de 0° a 359° e outro arquivo *SPH*, no mesmo formato do anterior com o ganho no plano H.

Para redução do tempo de processamento, a atenuação da estação base até o ponto desejado é calculada apenas uma vez utilizando o modelo escolhido. Após este passo é levantado o ganho de cada uma das antenas analisando o azimute e a inclinação relativos ao ponto de interesse. Por fim calculada a contribuição de cada conjunto transmissor/antena e então a soma dos níveis de sinal para obtenção do resultado definitivo.

Figura 17 – Exemplo de resultado gráfico de predição de cobertura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Também como pode ser visto na Figura 18, executa-se uma preparação de dados antes de executar o cálculo de atenuação, de acordo com a exigência de cada modelo. Esta montagem sequencial de dados permite que caso se implemente modelos com exigências ainda não atendidas, reaproveite-se a implementação apenas agregando as demandas ao fim da montagem.

Os modelos de propagação estão concentrados no mesmo ponto do fluxograma, a caixa onde-se lê: "Calcula-se a atenuação para o modelo selecionado", sendo cada um desenvolvido de forma isolada como sub-módulo próprio.

5.6.1 Módulo Modelo COST 231-Hata

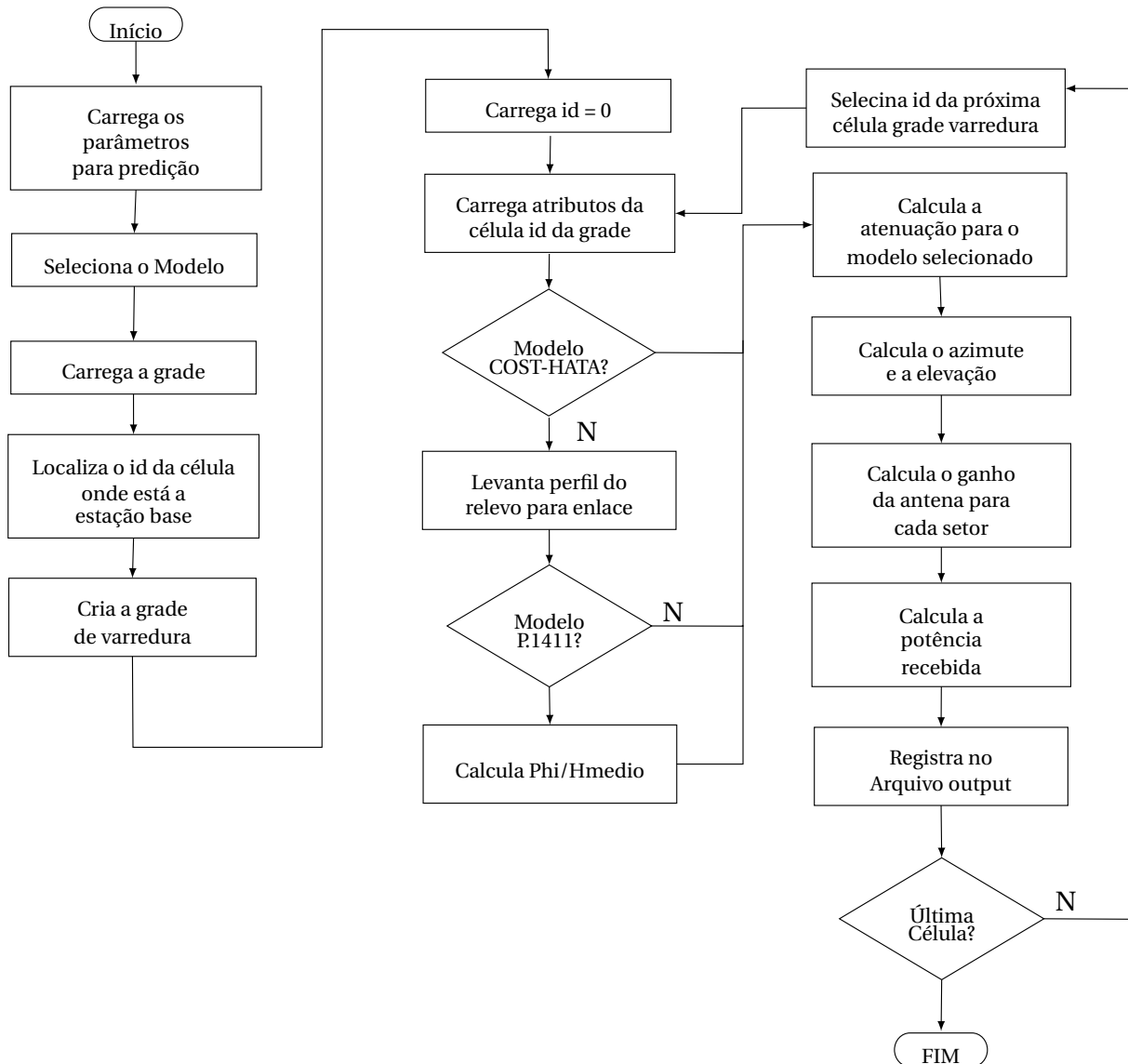
Este módulo utiliza além das informações da geometria das edificações nos pontos iniciais e finais do enlace, as informações de cobertura/ocupação de solo.

O cálculo de atenuação se dá de acordo com as equações apresentadas na subseção 2.3.1. Não apresenta qualquer sofisticação sendo de baixa complexidade a sua implementação.

5.6.2 Módulo Modelo ITU-R P.525/526

Este módulo requer informações de geometria tanto dos pontos iniciais e finais do enlace, como todo o perfil topográfico ao longo do enlace. Para levantamento do perfil, de forma

Figura 18 – Fluxograma de operação do módulo de predição de sinal



a evitar uma varredura por todas as células da grade que tivesse pontos de interseção com o segmento de reta que liga a estação base e o ponto de interesse, utilizou-se a seguinte solução. Uma vez calculado o azimute do ponto de recepção em relação à estação base, levantou-se a equação da reta que contém o segmento de reta mencionado. Esta reta foi dividida em duas semi-retas pelo ponto da localização da estação base. À partir da estação base, utilizando-se a definição de semelhança de triângulos e ângulo de inclinação da reta, definiu-se o passo de longitude e o passo de latitude para se encontrar um coordenada pertencente à semi-reta, no sentido do ponto de interesse. Este passo foi definido para criar pontos de coordenada de amostra no segmento de reta. Através dos pontos de amostragem foram encontrados os ids das células na grade utilizando-se a equação (5.1). Com a informação de id da célula pode-se obter a informação de elevação somada à altura da construção ao longo do segmento de reta, reconstruindo o perfil. Para evitar a perda de pontos relevantes utilizou-se uma sobre

amostragem de pontos, com o passo no segmento de reta da ordem de um quinto do passo da grade.

Os cálculos envolvendo apenas a Recomendação ITU-R P.525 são bastante simples e se resumem à equação (2.2).

Para avaliação da Recomendação ITU-R P.526, após o levantamento perfil aplicou-se a rotina descrita na subseção 2.3.3.

5.6.3 Módulo Modelo ITU-R P.1411

Quanto ao custo computacional este modelo é o de maior consumo, principalmente devido ao cálculo do ângulo entre o raio incidente e a orientação do arruamento (Figura 6). Contudo para reduzir a latência no resultado, optou-se pelo processamento desta informação em tempo diferido, ou seja, transferido este cálculo para a etapa de pré-processamento GIS. Assim, todas as células trazem a informação do azimute da rua a que pertencem. Esta implementação tornou o cálculo do ângulo Φ_{ori} uma mero cálculo aritmético subtrativo entre azimutes na etapa de processamento da atenuação.

O levantamento de perfil seguiu a mesma técnica explicada na Subseção 5.6.2 e a rotina de cálculo seguiu ao que foi exposto na Subseção 2.3.2.

Apresentação e Avaliação dos Resultados Obtidos

6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados resultados obtidos com a implementação realizada neste trabalho. Os modelos de predição COST 231-Hata e Recomendação ITU-R P.525/526 tiveram seus resultados comparados com a campanha de medidas realizada e com os resultados da predição destes mesmos modelos utilizando o *software* comercial ICS Telecom. Como não há implementação da Recomendação ITU-R P.1411 no referido *software*, os resultados obtidos neste trabalho foram comparados apenas aos demais modelos. O ICS Telecom foi configurado com os mesmos parâmetros de transmissor e sistema irradiante utilizados no programa computacional criado para este trabalho. O passo de predição utilizado foi de 2 metros, sem calibração (*tunning*) e métodos associados para análise de difração, reflexão no solo ou *subpath* conforme as referências dos modelos utilizados.

Há uma comparação entre os resultados de predição dos três modelos referidos entre si, avaliando peculiaridades além de quesitos de precisão e performance.

Foi realizada uma comparação com os resultados obtidos através da aplicação de técnicas analíticas (FDTD e MoM), divulgados em 2015 no Relatório Técnico - Análise de Predição de Cobertura Radioelétrica de Sistema Celular (Anatel/UFSJ/UFMG) (BATISTA, 2015, p. 33 a 35) e no artigo *Improved High-Order FDTD Parallel Propagator for Realistic Urban Scenarios and Atmospheric Conditions*(BATISTA *et al.*, 2016, p. 1781 e 1782).

Os *hardwares* utilizados para realização das simulações foram os seguintes:

- Códigos desenvolvidos neste trabalho: *Notebook* Asus K84C/ INTEL i3-2330M a 2,2 GHz e 4 GB RAM.
- Simulações do Relatório Técnico - Análise de Predição de Cobertura Radioelétrica de Sistema Celular (Anatel/UFSJ/UFMG): *Desktop* DELL XPS 8700/ INTEL i7-4770 a 3,4

GHz e 16 GB RAM

- ICS Telecom: *Desktop* Lenovo ThinkCentre / INTEL i7-4765T a 2,0 GHz e 8 GB RAM.

6.2 Resultados Obtidos com o Modelo COST 231-Hata

Nas Figuras 19(a) e 19(b) temos o resultado da simulação utilizando a implementação desenvolvida neste trabalho. Na primeira, a mancha de cobertura está sobreposta ao mapa urbano da área de simulação. Estes resultados têm resolução igual a 2 metros e o tempo de simulação foi de 1 min 49,8 s .

Na Figura 20 está a área de cobertura obtida utilizando o ICS Telecom.

Os resultados obtidos foram comparados com a campanha de medidas conforme o gráfico da Figura 21.

A tabela 3 apresenta uma avaliação qualitativa dos conjuntos de resultados preditos. Os diferentes resultados obtidos pelas predições são atribuídas a adoção de uma adaptação proposta na implementação desenvolvida para este trabalho. O modelo COST 231 - Hata não utiliza dados de elevação do terreno. Supõe-se que as cotas de terreno nas bases das antenas são semelhantes. No cenário avaliado temos uma variação altimétrica de 88,3 metros. Esta variação impacta sobre o ganho da antena da estação radio-base na direção da estação móvel e no comprimento do enlace. Assim, optou-se por realizar a correção da altura do transmissor conforme 6.1 e manter a altura da antena da estação móvel com relação ao solo.

$$h_{base} = h_{ant\ base} + Elev_{base} - Elev_{móvel} \quad (6.1)$$

onde h_{base} é altura da antena da estação radio base utilizada para a simulação, $h_{ant\ base}$ é altura de instalação da antena da estação base, $Elev_{base}$, $Elev_{móvel}$ são as elevações do terreno na localização das respectivas estações base e móvel.

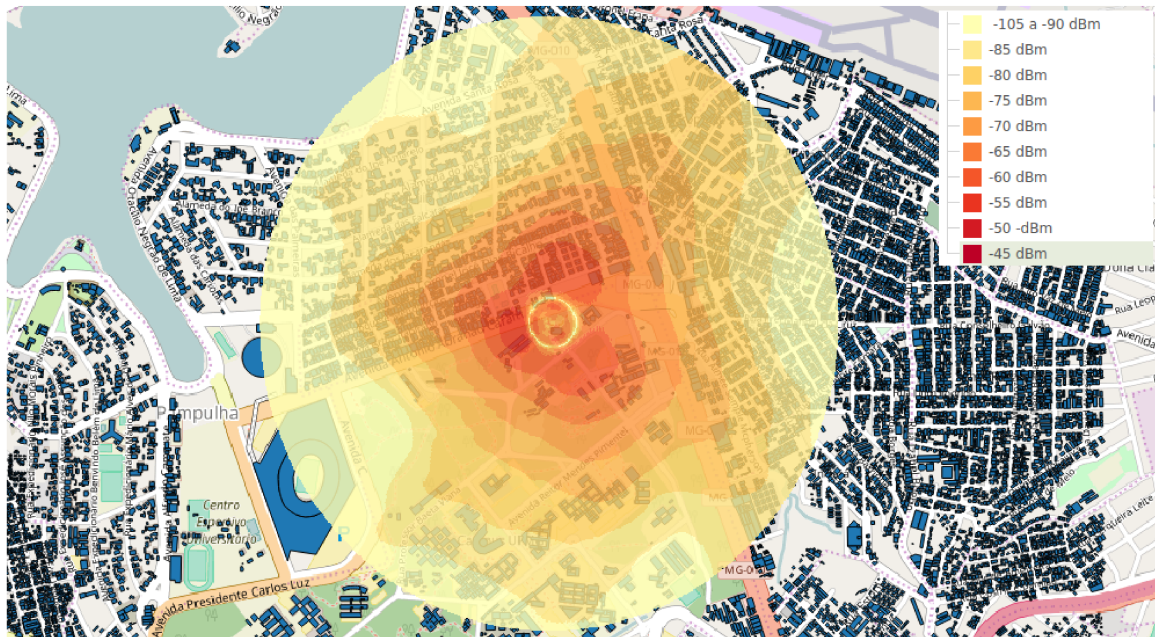
Tabela 3 – Comparativo de resultados das simulações COST 231 - Hata

Comparativo Predição COST 231 - Hata				
	Erro Médio Absoluto (dB)	Diferença percentual do desvio padrão relativo ao conjunto de medidas	Percentual de pontos com erro menor que 6 dB	Coefficiente de Correlação de Pearson
Simulação	19,2	29,6%	7,2%	0,28
Simulação calibrada	0,0	29,6%	45,0%	0,28
ICS Telecom	19,2	42,8%	7,7%	0,17

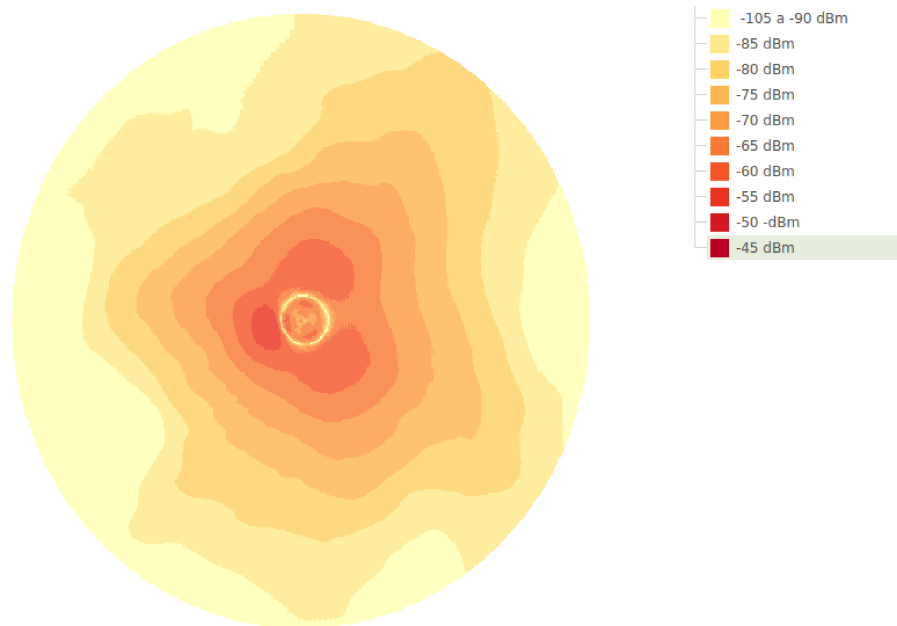
Observa-se que os resultados da implementação e do ICS Telecom são próximos e as curvas dos resultados das simulações na Figura 21 têm comportamento semelhantes. Contudo, o conjunto de resultados da implementação apresenta maior correlação com as

Figura 19 – Resultado da implementação cobertura COST 231 - Hata

(a) Área de Cobertura



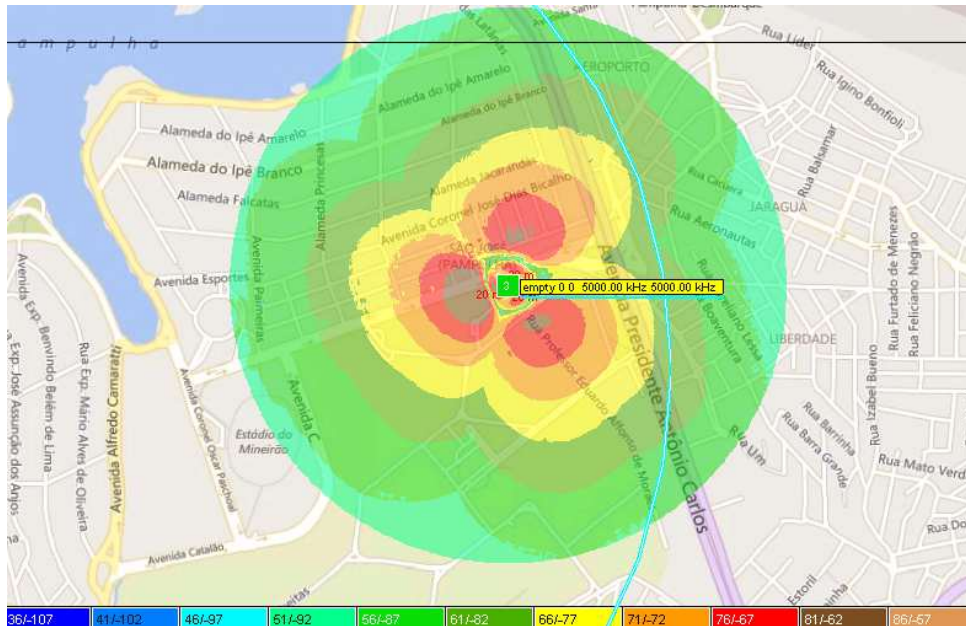
(b) Mancha de Cobertura



Fonte: Elaborada pelo autor.

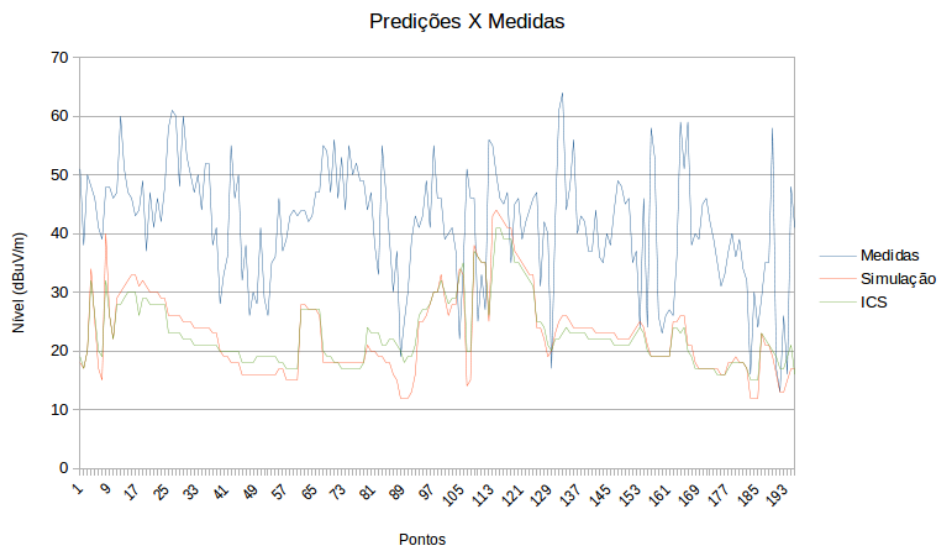
medidas realizadas, conforme Tabela 3. Embora o percentual de pontos com diferença menor que 6 dB em relação às medidas do conjunto de resultados da simulação seja 0,5% menor se comparado ao conjunto de resultados obtido pelo ICS Telecom, a simples aplicação de um fator de correção por *clutter* baseado no erro médio (forma de calibragem bastante comum comercialmente) faz com que todos os indicadores superem os resultados obtidos com o *software* da ATDi.

Figura 20 – Predição de cobertura COST 231 - Hata com ICS Telecom



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Comparação predições COST 231 - Hata versus dados da campanha de medidas



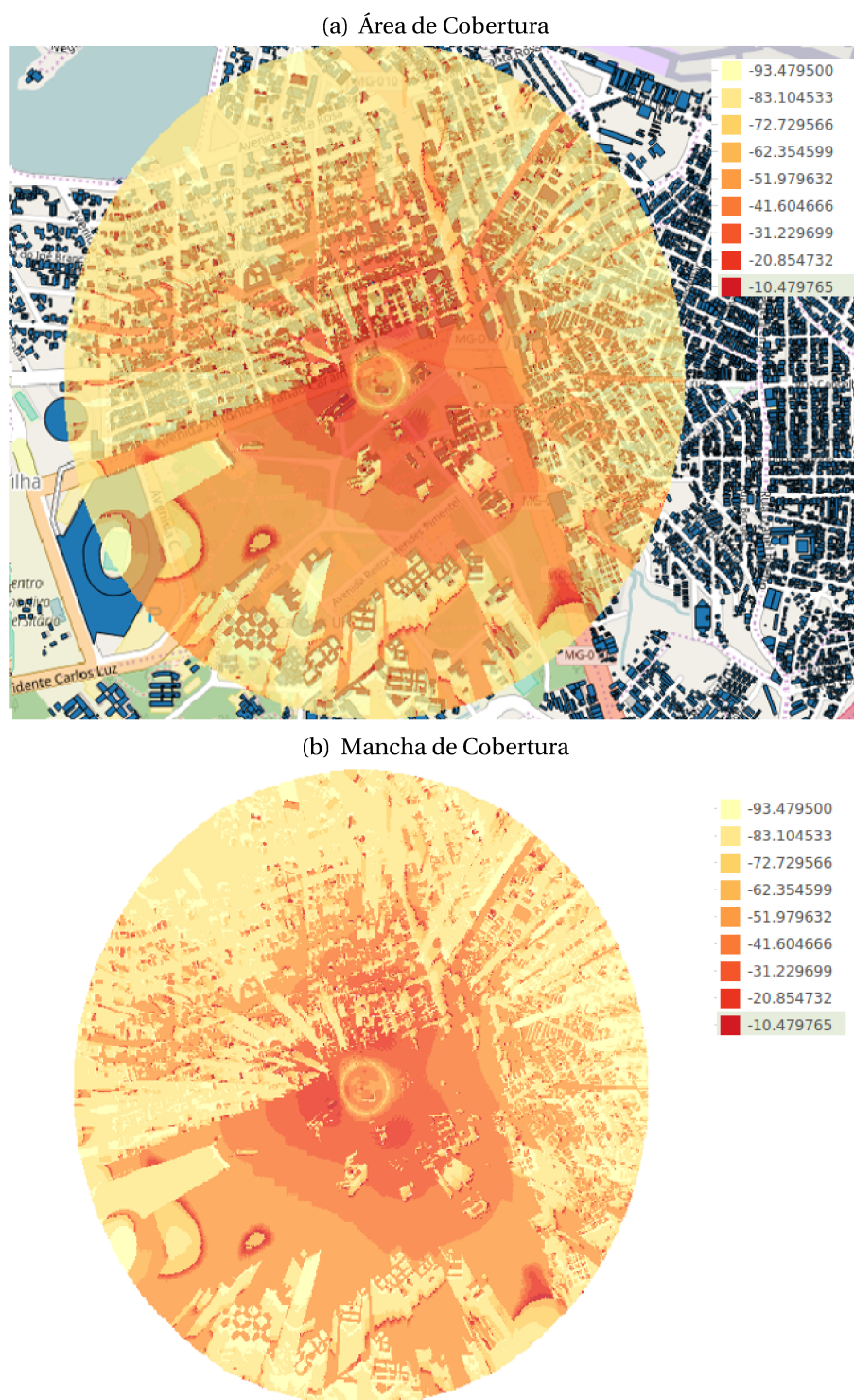
Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 Resultados obtidos com o Modelo ITU-R P.525/526

Nas Figuras 22(a) e 22(b) temos o resultado da simulação utilizando a implementação desenvolvida neste trabalho. Na primeira, a mancha de cobertura está sobreposta ao mapa urbano da área de simulação. Estes resultados têm resolução igual a 2 metros e o tempo de simulação foi de 08 min 43,7 s.

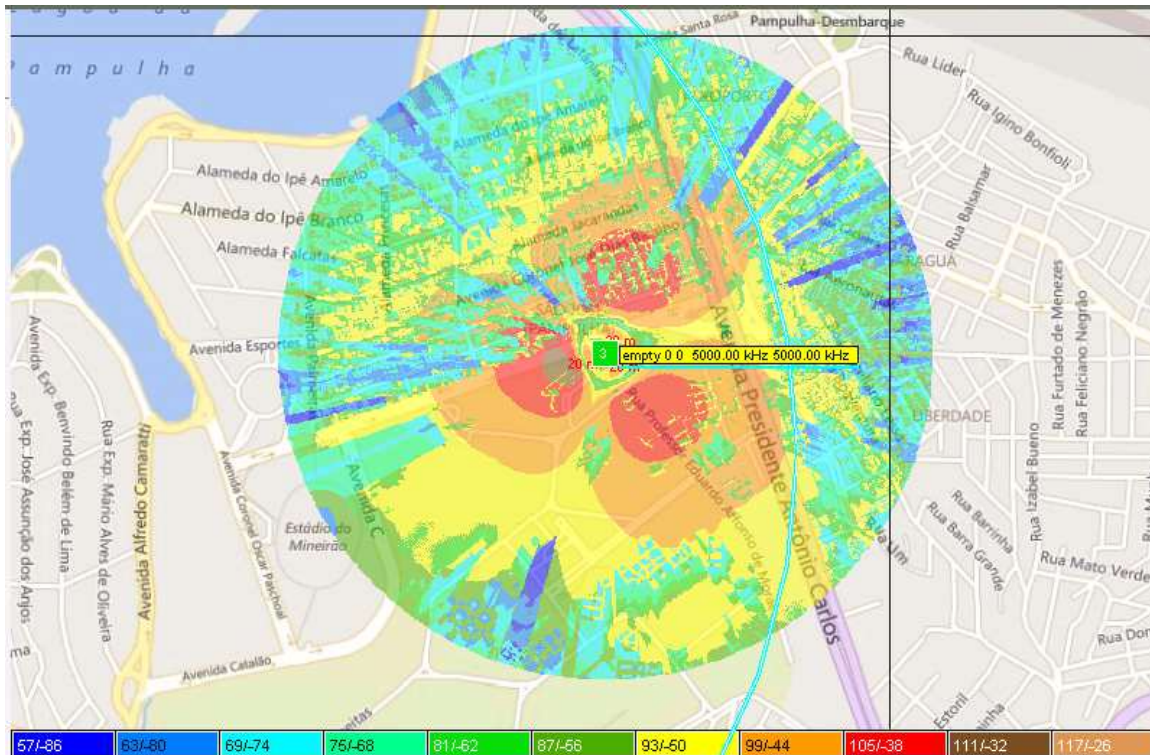
Na Figura 23 está a área de cobertura obtida utilizando o ICS Telecom.

Figura 22 – Resultado da implementação cobertura ITU-R P.525/526



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Predição de cobertura ITU-R P.525/526 com ICS Telecom



Fonte: Elaborada pelo autor.

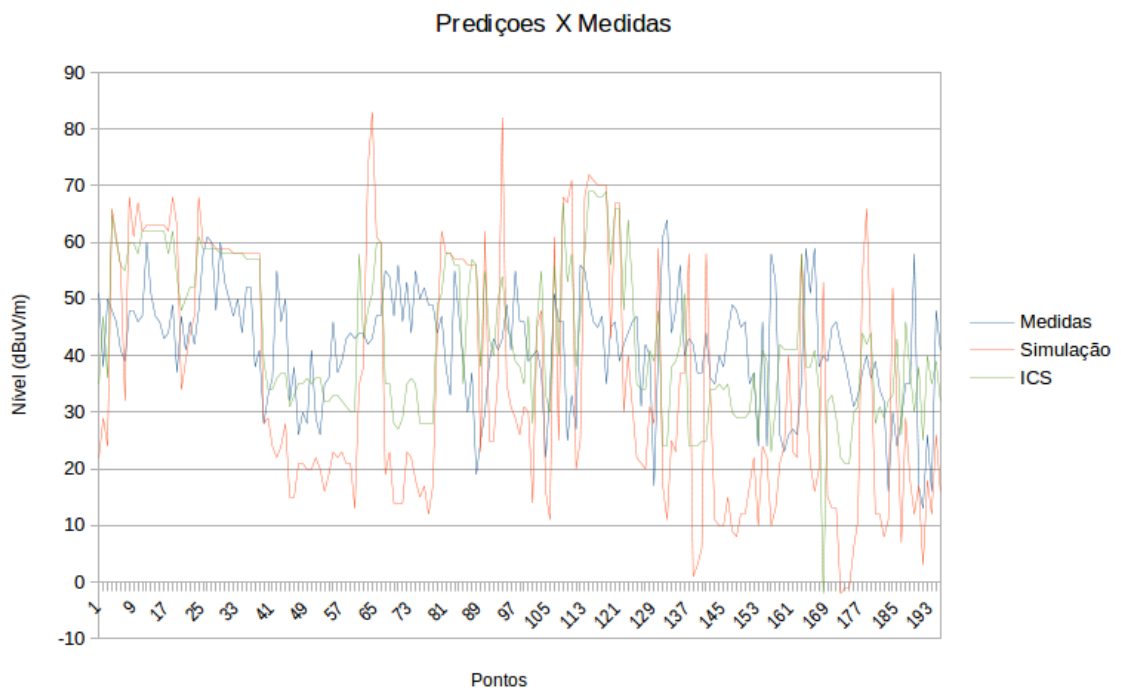
Os resultados obtidos foram comparados com a campanha de medidas conforme o gráfico da Figura 24.

Tabela 4 – Comparativo de resultados das simulações ITU-R P.525/526

Comparativo Predição ITU-R P.525/526				
	Erro Médio Absoluto (dB)	Diferença percentual do desvio padrão relativo ao conjunto de medidas	Percentual de pontos com erro menor que 6 dB	Coefficiente de Correlação de Pearson
Simulação	19,2	116,6%	14,9%	0,22
ICS Telecom	12,4	32,4%	25,1%	0,20

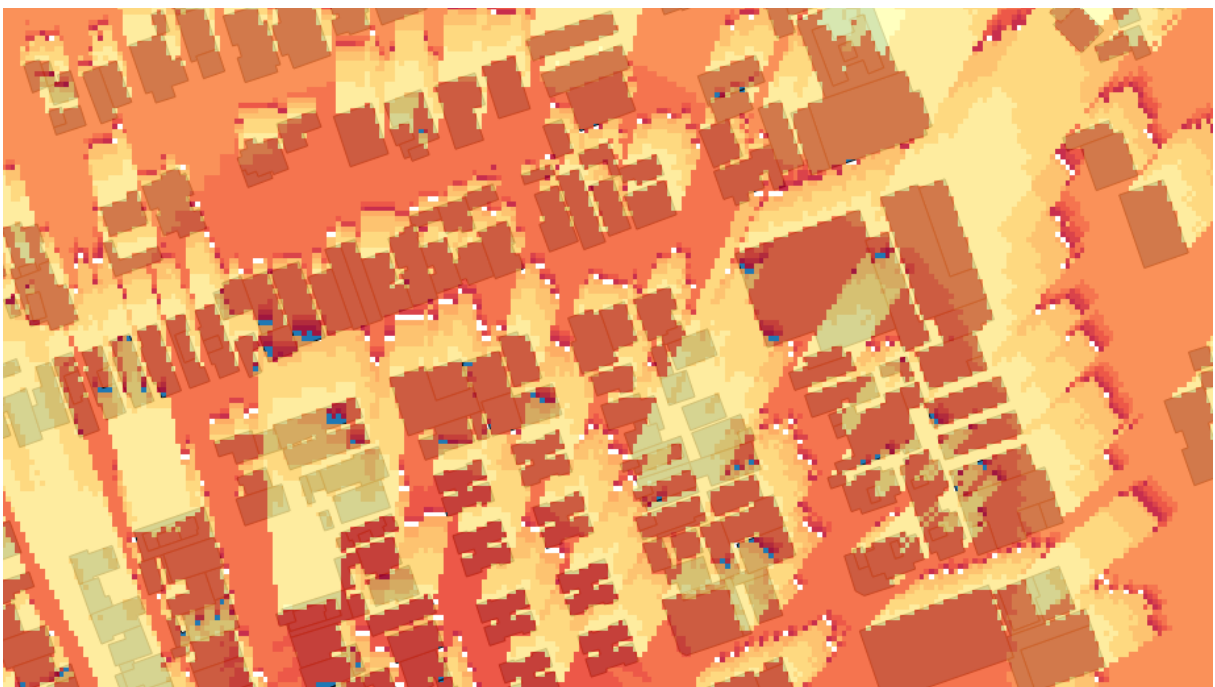
Na comparação entre os resultados este foi o que apresentou pior desempenho, com ênfase à região de maior adensamento urbano, especialmente nos pontos com alguma obstrução da linha de visada. O motivo principal é a existência marcante de multipercursos de propagação neste tipo de ambiente e faixa de frequência utilizadas. As Rec. ITU-R P.525/526 não avaliam o fenômeno de reflexão, apenas a difração da componente propagante na linha de visada. Um exemplo do que foi dito está melhor demonstrado na Figura 25, que apresenta uma região destacada da mancha de cobertura, esta região está localizada na parte superior à direita da Figura 22(a), onde pode ser visto com detalhe as regiões de sombra criadas pelas edificações e transições graduais à medida que a linha de visada é desobstruída.

Figura 24 – Comparação predições ITU-R P.525/526 versus dados da campanha de medidas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Detalhe da Figura 22(b)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A comparação de resultados no gráfico da Figura 24 indica convergência de valores e comportamento nas regiões de melhor nível de sinal (visada desobstruída). Onde os valores de predição se apresentam subestimados em relação aos valores medidos (visada obstruída), apesar da conformação das curvas apresentarem boa semelhança, o conjunto de valores apresentados pela simulação desenvolvida neste trabalho se apresenta com níveis menores que os níveis obtidos pelo *software* ICS Telecom.

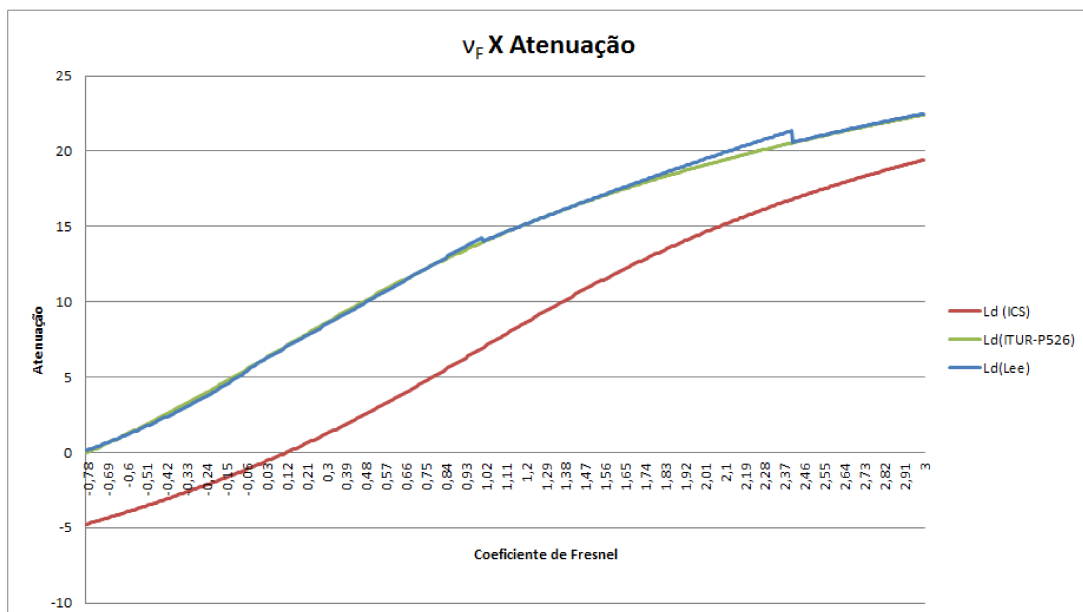
O comportamento analisado no parágrafo anterior corrobora com os resultados apresentados na Tabela 4 em que os valores de erro médio absoluto, diferença percentual do desvio padrão relativo ao conjunto de medidas e percentual de pontos com erro menor que 6 dB são piores nos resultados da simulação desenvolvida neste trabalho.

Segundo ATDI (2004, pag. 9), o ICS Telecom utiliza para cálculo de difração por um obstáculo em dB a Equação 6.2, já a Rec. ITU-R P. 526 a Equação 6.3 e a simulação a Equação 2.15. As três equações estão plotadas na Figura 26, onde observa-se boa congruência entre as Equações 6.3 e 2.15 que apresentam uma atenuação em média 5,6 dB maior que a calculada utilizando a Equação 6.2.

$$L_d = 6,9 + 20 \log \left[(v_F - 1) + \sqrt{1 + (v_F - 1)^2} \right] \quad (6.2)$$

$$L_d = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v_F - 0,1)^2} + 1 + v_F - 0,1 \right) \quad (6.3)$$

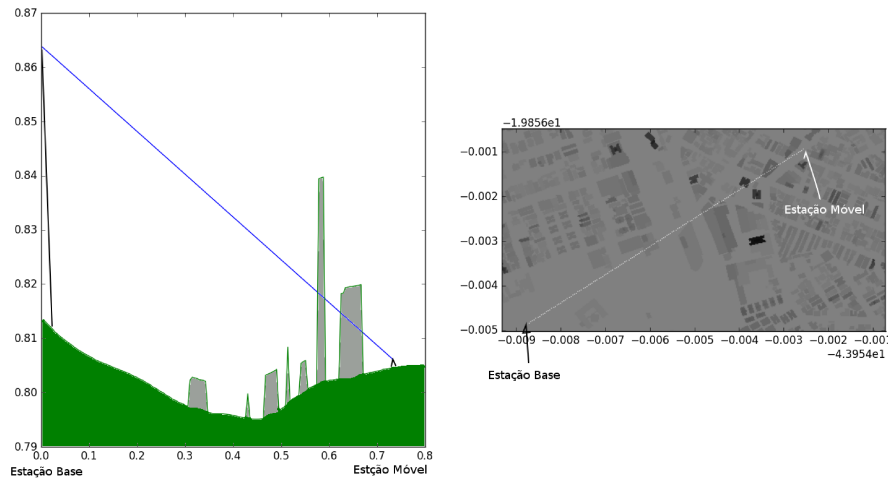
Figura 26 – Comparação das aproximações de solução para atenuação por uma cunha



Fonte: Elaborada pelo autor.

As duas ferramentas de simulação possuem recurso de análise de enlace, exemplificado nas Figuras 27 e 28. Utilizando este recurso em alguns pontos observou-se ainda uma diferença além da já citada. Há indícios, uma vez que não foi possível obter acesso ao código fonte do *software*, que o ICS Telecom não execute o passo 57 da Rec. ITU-R P.526, ou seja, adição do fator $[1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02d)$ na aplicação da Equação 2.41 para o cálculo da atenuação total do enlace utilizando o método de Bullington.

Figura 27 – Análise de enlace ponto-a-ponto utilizando Rec. ITU-R P.525/526 utilizando recurso da implementação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Análise de enlace ponto-a-ponto utilizando Rec. ITU-R P.525/526 utilizando recurso do ICS Telecom

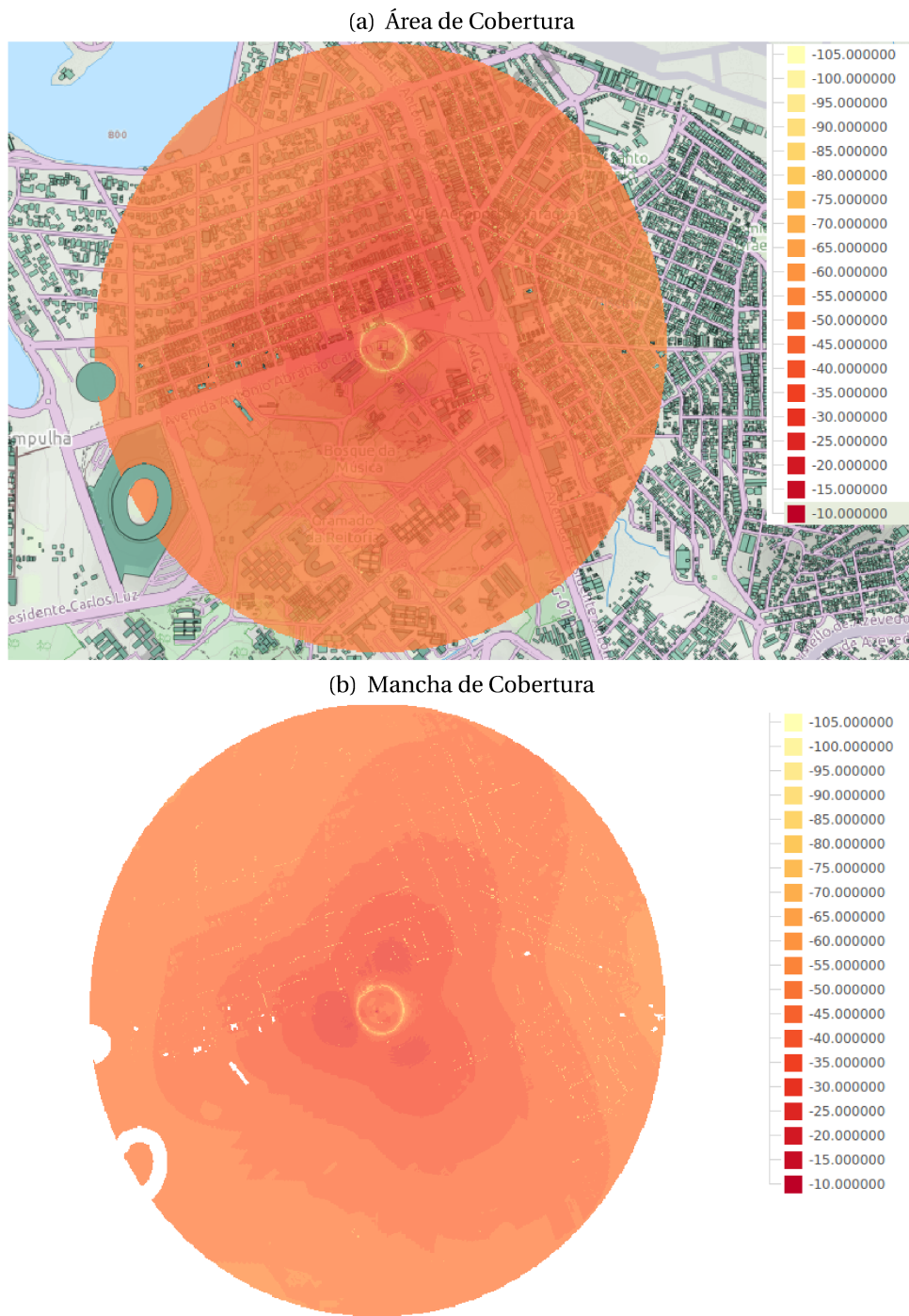


Fonte: Elaborada pelo autor.

6.4 Resultados obtidos com o Modelo ITU-R P.1411

Nas Figuras 29(a) e 29(b) temos o resultado da simulação utilizando a implementação desenvolvida neste trabalho. Na primeira, a mancha de cobertura está sobreposta ao mapa urbano da área de simulação. Estes resultados têm resolução igual a 2 metros e o tempo de simulação foi de 08 min 42,9 s.

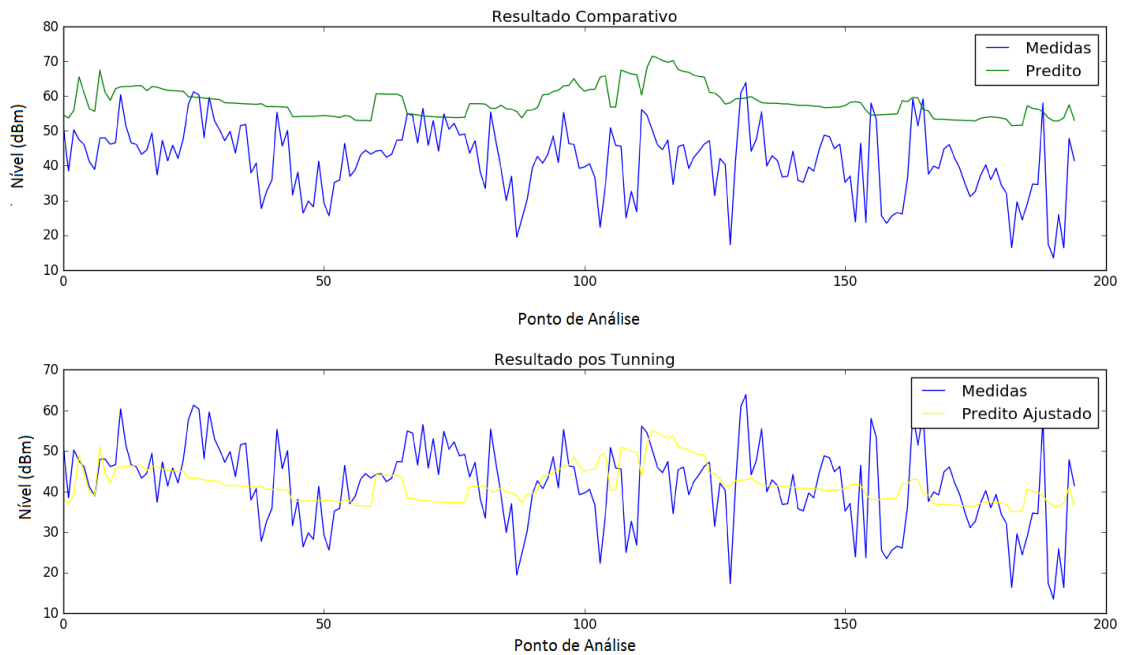
Figura 29 – Resultado da implementação cobertura ITU-R P.1411



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos foram comparados com a campanha de medidas conforme os gráficos da Figura 30. Nesta Figura, que foi obtidas com o Módulo de Comparação de Medidas da implementação realizada neste trabalho conforme subseção 5.4, temos as comparações dos resultados da predição pré e pós calibragem. O ajuste realizado foi a simples aplicação de um fator de correção por *clutter* baseado no erro médio.

Figura 30 – Comparação predições ITU-R P.1411 versus dados da campanha de medidas



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5 apresenta a avaliação qualitativa do conjunto de predições com e sem calibração.

Tabela 5 – Comparativo de resultados das simulações ITU-R P.1411

Comparativo Predição ITU-R P.1411				
	Erro Médio Absoluto (dB)	Diferença percentual do desvio padrão relativo ao conjunto de medidas	Percentual de pontos com erro menor que 6 dB	Coefficiente de Correlação de Pearson
Pré-calibragem	16,5	65,9%	14,4%	0,23
Pós-calibragem	0,0	65,9%	54,4	0,23

6.5 Comparação com resultados obtidos por técnicas analíticas

Como dito anteriormente, uma frente de pesquisa utilizou-se dos dados realizados na campanha de medidas realizada pela Agência Nacional de Telecomunicações publicando

seus resultados no anteriormente referenciado Relatório Técnico - Análise de predição de cobertura radioelétrica de sistema celular (Anatel/UFSJ/UFMG) (BATISTA, 2015, p. 33 a 35) e (BATISTA *et al.*, 2016, p. 1781 e 1782). Deste conjunto de resultados e pontos de medidas foram calculadas as atenuações estimadas, estes valores também foram comparados com os resultados obtidos com a implementação realizada neste trabalho.

Figura 31 – Mapa dos pontos de análise utilizados no Relatório técnico - Análise de predição de cobertura radioelétrica de sistema celular (Anatel/UFSJ/UFMG) (BATISTA, 2015, p. 4)



Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico exibido na Figura 32 apresenta o resultado comparativo de medições e simulações em 44 pontos conforme o mapa da Figura 31. No gráfico são exibidos os resultados obtidos através da campanha de medidas (Att. Medição), método dos momentos (MOM), método das diferenças finitas no domínio do tempo sem considerar as edificações (FDTD) e considerando as edificações (FDTD-BH), além dos resultados obtidos com as simulações geradas neste trabalho. Os pontos de 1 a 20 foram classificados com linha de visada desobstruída e os demais com obstrução.

Os conjuntos de resultados gerados foram comparados de forma qualitativa na Tabela 6.

Os resultados apresentados na linha 3 da Tabela 6 foram obtidos aplicando-se um fator para calibração do modelo diferente para os enlaces com e sem obstrução na linha de visada. Este fator é igual ao erro médio relativo às medidas no mesmo agrupamento (LOS ou NLOS), denominou-se “erro médio qualitativo”. O erro médio encontrado para os pontos sem obstrução foi de 9,9 dB e com obstrução 4,9 dB. A comparação do efeito deste método para calibração com o aplicado anteriormente pode ser visualizado na Figura 33.

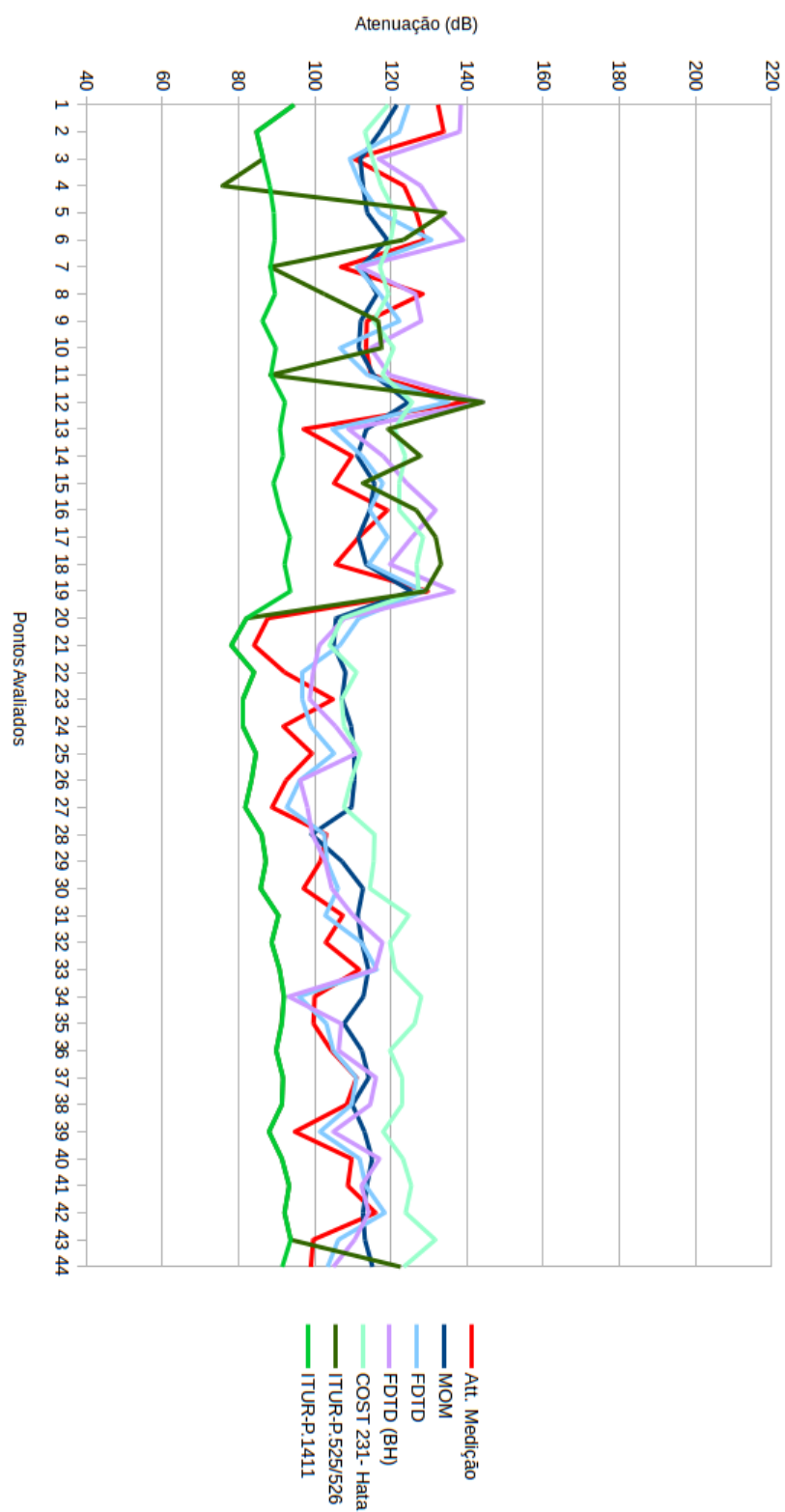
Restou evidenciado que as técnicas analíticas apresentam ótimos desempenhos se

Tabela 6 – Comparativo com resultados obtidos por técnicas analíticas

Comparativo métodos analíticos				
	Erro Médio Absoluto (dB)	Diferença percentual do desvio padrão relativo ao conjunto de medidas	Percentual de pontos com erro menor que 6 dB	Coefficiente de Correlação de Pearson
COST 231 -Hata	14,3	-50,0%	15,9%	0,41
ITU-R P.1411	19,7	-70,0%	4,5%	0,51
ITU-R P.1411 (Calibrado)	7,1	-30,0%	47,7%	0,75
ITU-R P. 525/526	15,9	40,0%	15,9%	48,5
MoM	9,2	-60,0%	43,2%	0,72
FDTD	6,2	-30,0%	56,8%	0,82
FDTD(BH)	7,9	0,0%	40,9%	0,89

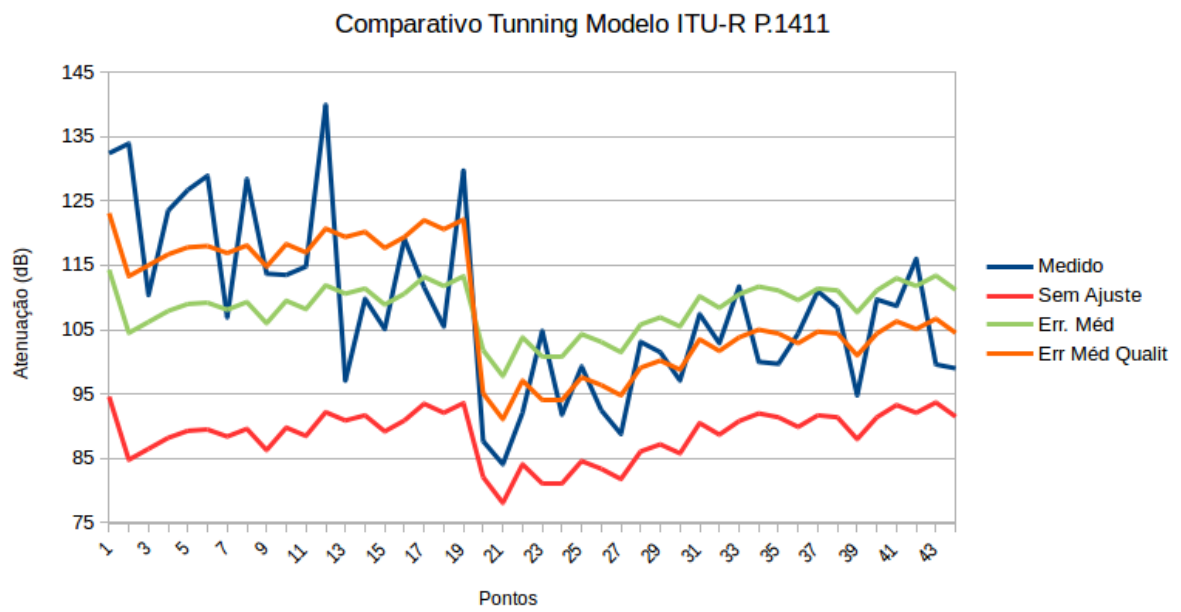
comparadas às demais. A aplicação da Rec. ITU-R P.1411 com o fator de calibração qualitativo supera a técnica de método dos momentos e se aproxima do uso de FDTD. Cabe então, uma consideração sobre o custo computacional: um ponto utilizando FDTD, a uma distância de 500 m da base leva aproximadamente 1.620 minutos para ser calculado, utilizando o método dos momentos leva 22 minutos (BATISTA, 2015, p. 28) e utilizando a implementação da Rec. ITU-R P.1411 leva 0,57 milissegundos. Nos resultados apresentados, cada mancha de cobertura tem um total de 916.100 pontos distribuídos no raio de 1.000 metros em torno da estação base.

Figura 32 – Comparação com resultados obtidos por técnicas analíticas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Comparação de métodos de calibração



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conclusão

Diante dos resultados apresentados pode-se concluir que a utilização do Modelo COST 231 - Hata em distâncias inferiores a 1.000 metros é factível, com uma faixa de acerto de 6 dB no valor de 45% após o ajuste do Modelo com base na campanha de medidas. Este Modelo tem baixa demanda de recursos (informacionais e computacionais) e apenas um grau de liberdade que é a classificação de ambiente, tais informações disponíveis em domínio público. Estes fatores fazem com que se torne de fácil aplicação.

Em relação ao Modelo COST 231 - Hata, neste trabalho, em razão da topografia acidentada na área de análise, adotou-se, conforme 6.2 uma correção na altura da estação base conforme a equação 6.1. Esta variação na implementação do modelo apresentou melhora do coeficiente de correlação em relação ao obtido pela implementação original. Como consequência todos os indicadores qualitativos do resultado, após a calibração, superaram a implementação original com ou sem calibração.

Conclui-se, também, que a utilização das Recomendações ITU-R P.525/526 em ambientes urbanos/suburbanos para enlaces onde uma das estações esteja abaixo do nível das construções não apresentam bom desempenho em comparação aos demais modelos utilizados.

A Recomendação ITU-R P.1411, apresentou desempenho bastante satisfatório, superando o Método dos Momentos e se aproximando bastante dos resultados do FDTD. Este desempenho deve ser atribuído, principalmente, ao fornecimento do extenso rol de requisitos informacionais para seu devido cálculo. Muito embora, algumas destas informações como, por exemplo, ângulo entre a linha de visada das estações e o eixo de orientação das ruas, apresentem complexidade para sua obtenção.

Ficou demonstrado, ainda, que o uso de um “erro médio qualitativo”, distinguindo enlaces com e sem obstrução da linha de visada como mencionado em 6.4, para calibração dos modelos, apresenta resultados superiores se comparados ao método de calibração sem

esta distinção.

Um fator impactante sobre o desempenho das simulações foi o pré-processamento dos mapas conforme relatado no Capítulo 3. Durante o desenvolvimento, observou-se que o tempo de processamento foi reduzido de dezenas de horas para alguns minutos.

Propostas de Continuidade

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

A Recomendação ITU-R P.526 apresenta apenas o método de Bullington para avaliação da difração, sugere-se a avaliação da implementação de outros métodos mais recentes e até métodos que se utilizam da teoria uniforme da difração conforme Schettino e José (2002), com vistas ao impacto computacional da aplicação em ambientes reais.

Em ambientes urbanos densos a Rec. ITU-R P.526 apresentou resultado insatisfatório pela ausência da análise dos efeitos do campo refletido pelas construções, a extensão da análise do enlace para além do ponto de recepção poderia acrescentar na identificação do valor de campo refletido para inclusão na predição. Uma vez que as bases informacionais necessárias à aplicação desta Recomendação já contêm as informações para esta análise, caberia avaliar a distância limite, evitando excessivo custo computacional.

A Recomendação ITU-R P.1411 apresentou desempenho satisfatório quanto a aplicação para o caso de estação base acima do nível das construções, contudo, as novas tecnologias além da 4ª geração de sistemas móveis utilizarão células menores e frequências superiores às avaliadas. Com isto, serão frequentes as instalações de estações base abaixo do nível das construções nos locais de médio/grande adensamento urbano, e embora esta Recomendação preveja esta situação, uma contribuição importante é a avaliação comparativa do seu desempenho neste cenário.

A última proposta é o desenvolvimento de uma interface gráfica adequada que facilite a manipulação da implementação realizada neste trabalho, tornando-a amigável ao usuário.

Referências

AMENT, W. Toward a theory of reflection by a rough surface. **Proceedings of the IRE**¹, IEEE, v. 41, n. 1, p. 142–146, 1953. Citado na página 25.

ARAI, H. **Measurement of mobile antenna systems**. [S.l.]: Artech House, 2013. Citado nas páginas 17 e 28.

ATDI. **Training resources. Radio propagation in ICS Telecom: technical conventions, propagation models**. [S.l.]: ATDI, 2004. Citado nas páginas 26, 27 e 64.

AVEENCHANDRA K. N. L OKESH, U. S. B. N.; HAT, H. A. B. Signal strength measurements and coverage estimation of mobile communication network using IRS-IC multispectral and Cartosat-1 stereo images. 2011. Citado na página 15.

BATISTA, C. G. **Relatório técnico - Análise de predição de cobertura radioelétrica de sistema celular (Anatel/UFSJ/UFMG)**. [S.l.]: UFSJ, 2015. Citado nas páginas 10, 57, 68 e 69.

BATISTA, C. G.; REGO, C. G. do. Predição de cobertura em terrenos mistos de baixa rugosidade: uma abordagem via equações integrais. **XXV Simpósio Brasileiro de Telecom.-SBrT**, v. 7, 2007. Citado na página 17.

_____. Moving-window propagation model based on an unconditionally stable FDTD method. p. 1178–1182, 2012. Citado na página 17.

BATISTA, C. G.; REGO, C. G. do; NUNES, M. L.; NEVES, F. F. Improved high-order FDTD parallel propagator for realistic urban scenarios and atmospheric conditions. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, IEEE, v. 15, p. 1779–1782, 2016. Citado nas páginas 16, 17, 57 e 68.

BERTONI, H. L. **Radio propagation for modern wireless systems**. [S.l.]: Pearson Education, 1999. Citado nas páginas 16, 20 e 35.

¹ Dos membros do *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE), em 1912, surgiu o *Institute of Radio Engineers* (IRE) voltado inicialmente para comunicações por ondas de rádio e posteriormente abrangendo eletrônicos em geral. Com o passar do tempo e como os assuntos das duas entidades começaram a se sobrepor, em 1963, se uniram formando o atual IEEE (IEEE, 2015)

BOSQUILIA, R. W. D.; FIORIO, P. R.; DUARTE, S. N.; BARROS, P. P. D. S. Diferentes imagens de satélite no mapeamento visual de drenagens e nascentes em amostras circulares. **Interciencia**, Interciencia, v. 41, n. 4, p. 254, 2016. Citado na página 39.

BULLINGTON, K. Radio propagation at frequencies above 30 megacycles² **Proceedings of the IRE**, IEEE, v. 35, n. 10, p. 1122–1136, 1947. Citado nas páginas 17 e 24.

CEPT. **ERC Report 77 - Field strength measurements along a route**. [S.l.]: CEPT, 2000. Citado na página 45.

CLARKE, R. A statistical theory of mobile-radio reception. **Bell Labs Technical Journal**, Wiley Online Library, v. 47, n. 6, p. 957–1000, 1968. Citado na página 45.

DAMOSSO, E. (Ed.). **Digital mobile radio: towards future generation systems**. [S.l.]: European Commission, 1998. Citado nas páginas 17, 26, 28 e 37.

EDWARDS, R.; DURKIN, J. Computer prediction of service areas for VHF mobile radio networks. In: IET. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**. [S.l.], 1969. v. 116, n. 9, p. 1493–1500. Citado na página 48.

ERICSSON. **RBS 3518 Product description**. [S.l.]: Ericsson, 2007. Citado na página 44.

FELSEN, L. B.; MARCUVITZ, N. **Radiation and scattering of waves**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994. v. 31. Citado na página 17.

GRAHAN, A.; KIRKMAN, N.; PAUL, P. **Mobile radio network design in the VHF and UHF bands-A practical approach**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Chichester, 2007. Citado nas páginas 17 e 19.

HABIB, A.; BANG, K.; ALDELGAWY, M.; SHIN, S.; KIM, K. Integration of photogrammetric and LiDAR data in a multi-primitive triangulation procedure. **Proceedings of the ASPRS 2007**, 2007. Citado na página 39.

HOLM, P. D. UTD-diffraction coefficients for higher order wedge diffracted fields. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 44, n. 6, p. 879–888, 1996. Citado na página 17.

_____. A new heuristic UTD diffraction coefficient for nonperfectly conducting wedges. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 48, n. 8, p. 1211–1219, 2000. Citado na página 17.

IEEE. History of ieee. In: _____. **About IEEE**. Estados Unidos da América, 2015. Disponível em: <https://www.ieee.org/about/ieee_history.html>. Acesso em: 17 jul. 2017. Citado na página 74.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Banco de dados geomorfoétricos do brasil. In: _____. **TOPDATA**. São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php>>. Acesso em: 17 mai. 2017. Citado na página 39.

ITU-R. **Recomendação ITU-R SM.1708 Field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations**. [S.l.]: ITU, 2005. Citado na página 45.

² Ainda em 1947 quando este artigo foi publicado era usual expressar frequências em ciclos por segundos junto com seus respectivos múltiplos. Em 1960 na Conferência Geral de Pesos e Medidas passou-se a adotar o hertz (Hz) em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolf Hertz.

_____. **Recomendação ITU-R P.526/13 - Propagation by diffraction**. [S.l.]: ITU, 2013. Citado nas páginas 17 e 33.

_____. **Recomendação ITU-R P.1411/8 - 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**. [S.l.]: ITU, 2015. Citado nas páginas 17, 28, 29 e 30.

_____. **Recomendação ITU-R P.525/3 - Calculation of free-space attenuation**. [S.l.]: ITU, 2016. Citado nas páginas 17 e 33.

KOUYOUMJIAN, R. G.; PATHAK, P. H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 62, n. 11, p. 1448–1461, 1974. Citado na página 17.

KURNER, T.; MEIER, A. Prediction of outdoor and outdoor-to-indoor coverage in urban areas at 1.8 ghz. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 20, n. 3, p. 496–506, 2002. Citado na página 16.

LEE, W. C. Estimate of local average power of a mobile radio signal. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 34, n. 1, p. 22–27, 1985. Citado nas páginas 17 e 45.

_____. **Mobile Communication Engineering: Theory and Applications**. [S.l.]: McGraw Hill Publications, 1985. Citado na página 23.

MCNAMARA, D.; PISTORIUS, C.; MALHERBE, J. The uniform geometrical theory of diffraction. **Artech House, London**, 1990. Citado na página 17.

MOLISCH, A. F. **Wireless communications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. v. 34. Citado nas páginas 16, 20, 21, 22, 23, 24 e 35.

MOREIRA, F. J. Aplicação de equações integrais para a predição da propagação radioelétrica sobre solos suavemente irregulares e incidência rasante. **X Simpósio Brasileiro de Microondas³ e Optoeletrônica (SBMO 2002), Recife, PE**, p. 191–195, 2002. Citado na página 17.

PARSONS, J. J. D. The mobile radio propagation channel. Pentech press London, 1992. Citado nas páginas 16, 20, 21, 22, 24 e 48.

RAPPAPORT, T. S. *et al.* **Wireless communications: principles and practice**. [S.l.]: Prentice Hall PTR New Jersey, 1996. v. 2. Citado nas páginas 16, 23, 25, 35 e 36.

SCHETTINO, D. N.; JOSÉ, F. da S. M. Técnicas assintóticas para a predição de cobertura radioelétrica. **Dissertação de Mestrado, PPGEE/UFMG**, 2002. Citado na página 73.

SCHETTINO, D. N.; MOREIRA, F. J. Um algoritmo eficiente para o traçado de raios na predição de cobertura radioelétrica em ambientes urbanos. **X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife, PE, Brasil**, p. 196–200, 2002. Citado na página 15.

SCHETTINO, D. N.; MOREIRA, F. J.; REGO, C. G. Heuristic UTD coefficients for electromagnetic scattering by lossy conducting wedges. **Microwave and Optical Technology Letters**, Wiley Online Library, v. 52, n. 12, p. 2657–2662, 2010. Citado na página 17.

³ Foi preservada a grafia atinente a data de publicação, com o Acordo Ortográfico que passou a vigorar por completo em 2016 esta palavra teve sua grafia alterada para **micro-ondas**

- SEVGI, L. **Electromagnetic modeling and simulation**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 17.
- SHEKHAR, S.; XIONG, H. **Encyclopedia of GIS**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. Citado na página 38.
- SHWARZ, R. & **TSMW universal radio network analyzer - Data sheet - ver. 5.0**. [S.l.]: Rhode & Shwarz, 2010. Citado na página 42.
- SILVA WILLIAM EUSTÁQUIO DA; REGO, C. G. d. Predição de cobertura radioelétrica em terrenos irregulares usando método de funções de base características. **Dissertação de Mestrado, PPGEE/UFMG**, 2011. Citado na página 17.
- SONG, L.; SHEN, J. **Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE**. [S.l.]: CRC Press, 2010. Citado na página 43.
- TAFLOVE, A.; HAGNESS, S. **Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method**. [S.l.]: Artech House, 2000. Citado na página 17.
- TAPIA, P.; LIU, J.; KARIMLI, Y.; FEUERSTEIN, M. **HSPA performance and evolution: a practical perspective**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado na página 43.
- VAUGHAN, R.; ANDERSEN, J. B. **Channels, propagation and antennas for mobile communications**. [S.l.]: Iet, 2003. v. 50. Citado nas páginas 24, 25, 26 e 33.
- VEGA, D. de la; LÓPEZ, S.; MATIAS, J. M.; GIL, U.; PENA, I.; VELEZ, M. M.; ORDIALES, J. L.; ANGUEIRA, P. Generalization of the Lee method for the analysis of the signal variability. **IEEE transactions on vehicular technology**, IEEE, v. 58, n. 2, p. 506–516, 2009. Citado nas páginas 17 e 45.
- WESTRA, E. **Python geospatial development**. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2016. Citado na página 17.
- YANG, C. **Introduction to GIS programming and fundamentals with Python and ArcGIS**. [S.l.]: CRC Press, Inc., 2014. Citado na página 38.
- ZHU, X. **GIS for environmental applications: a practical approach**. [S.l.]: Routledge, 2016. Citado na página 38.

APÊNDICE

A

Implementações Numéricas

A.1 Cálculo de difração por múltiplos obstáculos segundo ITU-R P.526-13

```

# lonRX: longitude do ponto de RX
# latRX: latitude do ponto de TX
#id_poly_intersec: localização na matriz de dados de relevo(altitude)
#e altura das construções
#HRX: altura da antena receptora até sua base no solo
#distancia: distancia entre TX e RX em graus
#passo= distância entre dois pontos na matriz de dados de relevo

alturaRX = float (0 if grade_ori[id_poly_intersec]['properties']['AGL']
                 is None else grade_ori[id_poly_intersec]['properties']['AGL'])
                 #verifica se tem construção no ponto
alturaRX = HRX + alturaRX + float(grade_ori[id_poly_intersec]
                                   ['properties']['u'DN'])
                 #soma valor anterior a altitude em relação ao nível do mar
sgnlat = 1.0
sgnlon = 1.0
if latTX > latRX:
    sgnlat = -1.0
if lonTX > lonRX:
    sgnlon = -1.0
latRT = sgnlat * (latRX - latTX)
lonRT = sgnlon * (lonRX - lonTX)
passo_lat = (5*meio_passo * latRT)/(distancia*1000.0*m)

```

```

passo_lon = (5*meio_passo * lonRT)/(distancia*1000.0*m)
lat_i= latTX + passo_lat
lon_i= lonTX + passo_lon
distancia_i = 5*meio_passo
id_poly_intersec = int((lat_i-lat_inicio)/passo) +
    (int((lon_i-lon_inicio)/passo)*(dimen_ver+1))
altura_i = float (0 if grade_ori[id_poly_intersec]['properties']['AGL']
    is None else grade_ori[id_poly_intersec]['properties']['AGL'])
altura_i = altura_i + float(grade_ori[id_poly_intersec]['properties']['u'DN'])
distancia_i_km = distancia_i/(1000.0*m)
hr = altura_i
dr = distancia_i_km
ht = altura_i
dt = distancia_i_km
alfaTX = (altura_i - alturaTX)/distancia_i_km
alfaRX = (altura_i - alturaRX)/(distancia - distancia_i_km)
while (abs(lon_i-lonTX)) < lonRT:
    distancia_i_km = distancia_i/(1000.0*m)
    id_poly_intersec = int((lat_i-lat_inicio)/passo)
        + (int((lon_i-lon_inicio)/passo)*(dimen_ver+1))
    altura_i = float (0 if grade_ori[id_poly_intersec]
        ['properties']['AGL'] is None
        else grade_ori[id_poly_intersec]['properties']['AGL'])
    altura_i = altura_i + float(grade_ori[id_poly_intersec]
        ['properties']['u'DN'])
    alfaTX_i = (altura_i - alturaTX)/distancia_i_km
    alfaRX_i = (altura_i - alturaRX)/(distancia - distancia_i_km)
    if (alfaTX_i > alfaTX):
        alfaTX = alfaTX_i
        ht = altura_i
        dt = distancia_i_km
    if (alfaRX_i > alfaRX):
        alfaRX = alfaRX_i
        hr = altura_i
        dr = distancia_i_km
    lat_i= lat_i + passo_lat
    lon_i= lon_i + passo_lon
    distancia_i = distancia_i + 5*meio_passo

if (5*meio_passo) < (distancia*1000.0*m):

```

```

d_di = distancia - dt
s1 = ht+Ce500 * dt* d_di
st_max = (s1-alturaTX)/dt
if ((alturaRX - alturaTX)/distancia) > st_max:
    ni_max = (s1-(alturaTX*d_di+alturaRX*dt)/distancia)
    *(((0.002*distancia)/(lamb*dt*d_di))**0.5)
    if ni_max > -0.78:
        Luc = 6.9 + 20* log10(((ni_max-0.1)**2 + 1)
        **0.5 + ni_max - 0.1)
    else:
        Luc = 0
else:
    d_di = distancia-dr
    sr_max = (hr+Ce500*dr*d_di-alturaRX)/d_di
    d_b = ( alturaRX - alturaTX + sr_max * distancia )
    / ( st_max + sr_max )
    d_db = (distancia - d_b)
    ni_b = (alturaTX+st_max*d_b-((alturaTX*d_db
    + alturaRX*d_b)/distancia))*(((0.002*distancia )
    / ( lamb * d_b * d_db ))**0.5)
    ##Tabela abaixo retirada do livro Wireless
    ##Communications Principle and Praticce - Rappaport
    if ni_b <= -1.0:
        Luc = 0
    elif (ni_b >= -1.0 and ni_b <= 0):
        Luc = (20*log10(0.5-0.62*ni_b))
    elif (ni_b >= 0 and ni_b <= 1):
        Luc = (20*log10(0.5*exp(-0.95*ni_b)))
    elif (ni_b >= 1 and ni_b <= 2.4):
        Luc = (20*log10(0.4-(0.1184-(0.38-0.1* ni_b)
        **2)**0.5))
    else:
        Luc = (20*log10(0.225/ni_b))
Lb = Luc + (1 - exp(-Luc/6.0))*(10+0.02*distancia)
else:
    Lb = 0

```

A.2 Programa para cálculo atenuação pelo modelo COST-Hata

```

def calc_COSThata (latTX, lonTX, latRX, lonRX, HTX, HRX, freqTX, clutter, relevo)
    #
    #
    #1)relevo é o nome do arquivo vetorial no formato ESRI
    #(.shp) que contém a representação do relevo da área de interesse
    #     p.ex.: './mapas/recorte_relevo.shp'
    #2)as coordenadas são passadas em formato grau decimal
    #3)a unidade das alturas HTX e HRX é metros
    #4)variável clutter: 'Cidade Pequeno ou Medio Porte' : 1,
    #'Cidade Grande Porte' : 2, 'Suburbano' : 3, 'Rural' : 4
    #
    #
    #

    mapa = fiona.open(relevo)
    PTX = Point([(lonTX, latTX)])
    PRX = Point([(lonRX, latRX)])

    for f in mapa:
        if PTX.intersection(shape(f['geometry'])):
            altitudeTX = float(f['properties']['u'DN'])
            break

    for f in mapa:
        if PRX.intersection(shape(f['geometry'])):
            altitudeRX = float(f['properties']['u'DN'])
            break

    HTX_corrigido = HTX+(altitudeTX- altitudeRX)

    latTXutm,lonTXutm = aux.conv_grau2umt(latTX, lonTX)
    latRXutm,lonRXutm = aux.conv_grau2umt(latRX, lonRX)

```

```

    distancia = (aux.comprimento_enlace(latTXutm, lonTXutm,
    HTX_corrigido, latRXutm, lonRXutm, HRX))/1000

    return att_COSThata(freqTX, distancia, HTX_corrigido, HRX, clutter)

```

A.3 Cálculo predição de cobertura segundo a Recomendação ITU-R P.1411-8

```
# coding=UTF-8
```

```

from osgeo import gdal
import shutil, sys, time
from numpy import array, log10, arctan2, pi, exp, sin, cos, arctan, tanh
import auxiliares as aux

def p1411(latTX, lonTX, HTX, HRX, freqTX, mapa_grade, mapa_constr,
mapa_phi, mapa_w, raio, gMaxAnt, Az1, Tilt1, Az2, Tilt2, Az3, Tilt3,
PotTX, RXMin, AntV, AntH):
    RXMin = 10**((RXMin) / 10)
    lamb = 3.0e8/(freqTX*1e6)
    Ce500 = 500.0/8500.0
    m = 9.9999950000953277e-06
    barr_status = 0
    ini = time.time()
    raio_g = raio * m
    ganhoV, ganhoH = aux.arq_antena(AntV, AntH)
    grade = gdal.Open(mapa_grade)
    grade2 = gdal.Open(mapa_constr)
    grade3 = gdal.Open(mapa_phi)
    grade4 = gdal.Open(mapa_w)
    lon_inicio, passo_lon, dxdy, lat_inicio,
    dydx, passo_lat = grade.GetGeoTransform()
    media_passo = 5*(abs(passo_lon) + abs(passo_lat))/4.0 #media_passo em graus
    relevo = grade.GetRasterBand(1).ReadAsArray()
    constr = grade2.GetRasterBand(1).ReadAsArray()
    phi_ori = grade3.GetRasterBand(1).ReadAsArray()
    omega = grade4.GetRasterBand(1).ReadAsArray()
    nlines, ncols = relevo.shape
    linTX = int((latTX-lat_inicio)/passo_lat)

```

```

colTX = int((lonTX-lon_inicio)/passo_lon)
alturaTX = HTX + float(relevo[linTX][colTX]) + float(constr[linTX][colTX])
lonTXutm,latTXutm = aux.conv_grau2utm(latTX, lonTX)
lonRX = lon_inicio + passo_lon/2.0
latRX = lat_inicio + passo_lat/2.0
shutil.copy('./mapas/output.tif', 'output.tif')
novo_ds = gdal.Open('output.tif',gdal.GA_Update)
nova_banda = novo_ds.GetRasterBand(1)
nivel = nova_banda.ReadAsArray()
for cx in range(ncols):
    if (100*cx/ncols)>=barr_status:
        sys.stdout.write('\r')
        i = barr_status/5
        sys.stdout.write("[%s] %d%%" % ('='*i, 5*i))
        sys.stdout.flush()
        barr_status += 5
    for lx in range(nlins):
        distancia_var = ((lonRX-lonTX)**2+(latRX-latTX)**2)**0.5
        if distancia_var <= raio_g :
            lonRXutm,latRXutm = aux.conv_grau2utm(latRX, lonRX)
            alturaRX = HRX + float(relevo[lx][cx]) + float(constr[lx][cx])
            elev_pt = aux.elevacao(latTXutm, lonTXutm, HTX,
            alturaTX - HTX, latRXutm,lonRXutm, HRX, alturaRX - HRX)
            azm_pt = aux.azimute(latTXutm, lonTXutm, latRXutm, lonRXutm)
            distancia = distancia_var/(1000.0*m) ###distancia em km
            aten_el = 32.4 + 20 * ( log10(freqTX) + log10(distancia))
            latRT = (latRX - latTX)
            lonRT = (lonRX - lonTX)
            passo_lat_reta = media_passo * latRT/distancia_var
            passo_lon_reta = media_passo * lonRT/distancia_var
            lat_i= latTX + passo_lat_reta
            lon_i= lonTX + passo_lon_reta
            distancia_i = media_passo
            lin_i = int((lat_i-lat_inicio)/passo_lat)
            col_i = int((lon_i-lon_inicio)/passo_lon)
            altura_i = float(relevo[lin_i][col_i]) + float(constr[lin_i][col_i])
            distancia_i_km = distancia_i/(1000.0*m)
            alfaRX = (alturaTX - alturaRX)/(distancia - distancia_i_km)
            hr=0.0
            ihr=0.0

```

```

helev = altura_i
delev = distancia_i_km
alfaRX_i = (altura_i - alturaRX)/(distancia - distancia_i_km)
alfaM = alfaRX_i
while (distancia_i < distancia_var):
    distancia_i_km = distancia_i/(1000.0*m)
    lin_i = int((lat_i-lat_inicio)/passo_lat)
    col_i = int((lon_i-lon_inicio)/passo_lon)
    aux1 = float(constr[lin_i][col_i])
    altura_i = float(relevo[lin_i][col_i]) + aux1
    alfaRX_i = (altura_i - alturaRX)/(distancia - distancia_i_km)
    if altura_i > alturaRX and aux > 0.0:
        hr = hr + altura_i
        ihr+=1.0
    if (alfaRX_i < alfaRX):
        LOS = True
    else:
        LOS = False
    if alfaRX_i >= alfaM:
        alfaM = alfaRX_i
        if aux1 == 0.0:
            helev = altura_i
            delev = distancia_i
            obstr_constr = False
        else:
            obstr_constr = True

    lat_i= lat_i + passo_lat_reta
    lon_i= lon_i + passo_lon_reta
    distancia_i = distancia_i + media_passo
    if LOS:
        h1h2 = (alturaTX-alturaRX)*alturaRX
        Rbp = (4*h1h2)/lamb
        Lbp=abs(20*log10((lamb*lamb)/(8*pi*h1h2)))
        distancia_m = distancia_var/m
        if distancia_m <= Rbp:
            atenuacao = Lbp+6+20*log10(distancia_m/Rbp)
        else:
            atenuacao = Lbp+6+40*log10(distancia_m/Rbp)
    else:

```

```

Lbf = 32.4 + 20 * ( log10(freqTX) + log10(distancia))
if obstr_constr:
    phi = float(phi_ori[lx][cx])
    w = float(omega[lx][cx])
if w == 0.0:
    w= 10
    phi = 90
if phi<35:
    Lori = -10+0.354*phi
elif phi < 55:
    Lori = 2.5+0.075*(phi-35)
else:
    Lori = 4.0-0.114*(phi-55)
hr = hr/ihr
deltah2 = hr - alturaRX
deltah1 = alturaTX - hr
Lrts = -8.2-10.0*(log10(w)+log10(freqTX))+20.0*
log10(deltah2)+Lori
b = 2*w
dbp = deltah1/lamb**0.5
Qm = 2.35*(((deltah1/dbp)*((b/lamb)**0.5))**0.9)
Lbsh=-18.0*log10(1+deltah1)
L2 = -10.0 *log10(Qm*Qm)
L1linha = Lbsh+71.4-8.0*(log10(freqTX))-9.0*log10(b)
L1d = L1linha+18.0*log10(distancia_m/1000)
Lupp = L1linha+18.0*log10(dbp/1000)
dhbp = (Lupp - L2)
zeta = dhbp * 0.0417
Lmid = (Lupp + L2)/2.0
if dhbp == 0:
    Lmsd = L2
elif dhbp > 0:
    Lmsd = -tanh((log10(distancia_m)-log10(dbp))
/0.1)*(L1d-Lmid)+Lmid
else:
    Lmsd = L1d+tanh((log10(distancia_m)-log10(dbp))
/zeta)*(Lupp-Lmid)-Lupp+Lmid
if (Lrts+Lmsd) > 0:
atenuacao = Lbf + Lrts + Lmsd
else:

```

```

        atenuacao = Lbf

    else:
        d_di = distancia-delev
        sr_max = (helev-alturaRX)/d_di
        St_max = (helev-alturaRX)/delev
        d_b = ( alturaRX - alturaTX + sr_max * distancia )
            / ( st_max + sr_max )
        d_db = (distancia - d_b)
        ni_b = (alturaTX + st_max * d_b - (( alturaTX
            * d_db + alturaRX * d_b ) / distancia )) * ((( 0.002 *
            distancia ) / ( lamb * d_b * d_db ))**0.5)
        ##Tabela abaixo retirada do livro Wireless Communications
        Principle and Praticice - Rappaport
        if ni_b <= -1.0:
            Luc = 0
        elif (ni_b >= -1.0 and ni_b <= 0):
            Luc = (20*log10(0.5-0.62*ni_b))
        elif (ni_b >= 0 and ni_b <= 1):
            Luc = (20*log10(0.5*exp(-0.95*ni_b)))
        elif (ni_b >= 1 and ni_b <= 2.4):
            Luc = (20*log10(0.4-(0.1184-(0.38-0.1* ni_b)**2)**0.5))
        else:
            Luc = (20*log10(0.225/ni_b))
        Lb = Luc + (1 - exp(-Luc/6.0))*(10+0.02*distancia)
        atenuacao = Lbf - Lb

    ganho1 = aux.ganho_antena(ganhoH, ganhoV, Az1, Tilt1, gMaxAnt, azm_pt, elev_pt)
    ganho2 = aux.ganho_antena(ganhoH, ganhoV, Az2, Tilt2, gMaxAnt, azm_pt, elev_pt)
    PotRX = 10**((PotTX - atenuacao + ganho1) / 10) + 10**((PotTX
    - atenuacao + ganho2) / 10) + 10**((PotTX - atenuacao + ganho3) / 10)
    if PotRX >= RXMin:
        PotRX = 10*log10(PotRX)
        nivel[lx][cx] = PotRX
    latRX = latRX + passo_lat
    latRX = lat_inicio + passo_lat/2.0
    lonRX = lonRX + passo_lon

nova_banda.WriteAll(nivel)
sys.stdout.write('\r')
sys.stdout.write("[%s] %d%" % ('='*(barr_status/5), barr_status))

```

```
sys.stdout.flush()
fim = time.time()
print "\nTempo de Execução: ", ("%02d'%02d.%02d'"
% (int((fim-ini)/60), int((fim-ini)%60), int((fim-ini)*100%100)))
nova_banda = None
novo_ds = None
```