

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice sob a  
perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Área de Clima  
Tropical

Cristiano Torres do Amaral

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado N° 761

Título: *“Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice sob a perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Área de Clima Tropical”*

Autor: Cristiano Torres do Amaral

Data da Defesa: 19 de dezembro de 2012

CRISTIANO TORRES DO AMARAL

UMA ANÁLISE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO LONGLEY-RICE SOB A PERSPECTIVA DE  
AMBIENTES URBANOS LOCALIZADOS EM ÁREA DE CLIMA TROPICAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Antenas, Propagação de Ondas de Rádio e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: PROF. DR. CÁSSIO GONÇALVES DO REGO

Belo Horizonte

2012

CRISTIANO TORRES DO AMARAL

UMA ANÁLISE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO LONGLEY-RICE SOB A PERSPECTIVA DE  
AMBIENTES URBANOS LOCALIZADOS EM ÁREA DE CLIMA TROPICAL

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola da Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Antenas, Propagação de Ondas de Rádio e Eletromagnetismo Aplicado.

Aprovada em 19 de dezembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

(a) Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rego - Orientador (UFMG)

(a) Prof. Dr. Ricardo Luiz da Silva Adriano (UFMG)

(a) Prof. Dr. Cláudio Garcia Batista (UFSJ)

*“Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco.” (I Tessalonicenses 5:18)*

*Aos meus pais e às minhas  
queridas LÍlian e Marina...*

# Agradecimentos

A Deus e aos meus pais que me concederam o dom da vida e sabedoria necessária para superar todos os desafios;

À Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG), em especial ao amigo e Chefe, Coordenador dos Cursos Técnicos de Formação Militar e Engenheiro Eletricista, Coronel da Reserva Adilson de Oliveira Prado, que me proporcionou o incentivo necessário para superar todos os obstáculos em minha carreira profissional e acadêmica. Ressalto ainda o incentivo e apoio dos Oficiais e Praças da Seção de Logística e Tecnologia do Estado-Maior da PMMG;

Aos professores, funcionários, discentes e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG que acompanharam e colaboraram para meu desenvolvimento acadêmico e profissional, em especial, a todos os integrantes do Grupo de Pesquisa de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética (GAPTEM);

Ao meu Professor Orientador, Cássio Gonçalves, que confiou em meu trabalho, bem como na produção deste texto, revisando-o de maneira minuciosa para que pudesse ser apresentado com segurança ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais.

# Resumo

A modelagem computacional da propagação de sinais radioelétricos é uma importante ferramenta para determinação da área de cobertura de emissoras de rádio e televisão em todo o mundo. Este recurso permite reduzir os custos de implantação dos sistemas de televisão e radiodifusão, os quais têm a cobertura geográfica previamente avaliada em estudos analíticos, para, em um momento posterior, orientar os investimentos de instalação de sua infraestrutura. Entre diferentes modelos computacionais para cálculo da propagação, o modelo Longley-Rice foi um dos pioneiros e, nos anos 50, orientava a instalação de redes de rádio e televisão nos Estados Unidos. Este modelo ainda é utilizado e considera parâmetros de atenuação que dependem de variáveis relacionadas com o clima, relevo, entre outras características que somadas apresentam sua contribuição para atenuar o sinal recebido em um ponto ou uma área. Contudo, essas variáveis são diferentes para cada localidade, sendo necessária uma avaliação mais cuidadosa para cada cenário e ambiente. Para tanto, este trabalho apresenta um estudo acerca da contribuição das particularidades de ambientes urbanos em áreas de clima tropical para generalização do fator de atenuação urbano-tropical, adequando o modelo de predição estadunidense para o contexto brasileiro, em especial, aferindo com maior eficiência os cálculos analíticos de predição.

Palavras-chave: Longley-Rice; Rádio; Predição; Propagação; Telecomunicações.



# Abstract

Computer modeling of the propagation of radio frequency and signals is an important tool for determining the coverage of radio and television around the world. This feature allows you to reduce deployment costs of broadcasting systems, which have the coverage previously evaluated in analytical studies for, at a later time, installation guide investment in infrastructure. Between different propagation models, the Longley-Rice model has emerged in 50 years to guide the installation of radio and television networks in the United States. Even today this model is used and considers attenuation parameters that depend on variables related to climate, topography, among other features that have added their contribution to attenuate the signal received at one point or an area. However, these variables are different for each location, requiring a careful evaluation of each scenario and environment. Therefore, this paper presents a study on the contribution of the peculiarities of the state capital for formatting an attenuation factor-tropical city, adapting the U.S. model prediction for the Brazilian context, in particular, the state capital, which sent more efficiently analytical calculations to predict.

Keywords: Longley-Rice; Radio; Prediction; Propagation; Telecommunications.

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>vi</b>
<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativas . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Organização do Trabalho . . . . .	4
<b>2 Referencial Teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Histórico . . . . .	5
2.2 Parâmetros de Análise Computacional . . . . .	10
2.3 Distribuição Rice . . . . .	18
2.3.1 Variabilidade no Modelo Longley-Rice . . . . .	21
2.4 Contribuição ao Modelo Longley-Rice . . . . .	22
<b>3 Modelagem Computacional</b>	<b>24</b>
3.1 Descrição do Algoritmo de Predição Longley-Rice . . . . .	24
3.2 Ensaios de Validação . . . . .	27
3.3 Ensaios de Predição em Áreas de Clima Tropical . . . . .	41

	x
3.3.1 Ensaio em Belo Horizonte . . . . .	41
3.3.2 Ensaio em Brasília . . . . .	47
<b>4 Considerações Finais</b>	<b>58</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>60</b>
<b>A Programa Longley-Rice</b>	<b>63</b>

# Lista de Figuras

2.1	Curvas de Rugosidade do Terreno nos Estados Unidos [5]	7
2.2	Variação do Fator de Irregularidade do Terreno $\Delta_h$ [6]	8
2.3	Geometria do enlace no modelo Longley-Rice [21]	11
2.4	Atenuação de Referência [12]	13
2.5	Mapa da Refratividade [5]	16
2.6	Função Probabilidade no Modelo Rice [18]	20
2.7	Variabilidade de Tempo [5]	22
3.1	Algoritmo do Modelo Longley-Rice [11]	25
3.2	Validação com dados de Baltimore/EUA (200 MHz) - $\Delta_h=150$ [4]	28
3.3	Perfil Topográfico de Baltimore/EUA [4]	29
3.4	Validação com dados de Springfield/EUA (90 MHz) - $\Delta_h=50$ [4]	30
3.5	Validação com dados de Springfield/EUA (90 MHz) - $\Delta_h=250$ [4]	31
3.6	Perfil Topográfico de Springfield [4]	32
3.7	Validação com dados de Philadelphia/EUA (90 MHz) - $\Delta_h=250$ [4]	34
3.8	Perfil Topográfico Philadelphia [4]	35
3.9	Validação com dados de Nova Iorque/EUA (600 MHz) - $\Delta_h=50$ [4]	36
3.10	Perfil Topográfico de Nova Iorque [4]	37
3.11	Validação com dados de Cinarkoy/Turquia (200 MHz) - $\Delta_h=50$ [23]	39
3.12	Perfil Topográfico Cinarkoy/Turquia [23]	40
3.13	Busca de dados atmosféricos em Belo Horizonte no período de medição (01/02/2010) [27]	42
3.14	Características da Temperatura em Belo Horizonte no período de medição (01/02/2010) [27]	43
3.15	Características da Umidade Relativa em Belo Horizonte no período de medição (01/02/2010)[27]	44

3.16	Percurso de medidas radioelétricas em Belo Horizonte [24] . . . . .	45
3.17	Relevo do percurso de medidas radioelétricas em Belo Horizonte [24] . . . . .	45
3.18	Comparativo dos resultados LRM ( $\Delta_h=150$ ) e SPRad [24] . . . . .	46
3.19	Comparativo dos resultados LRM e SPRad [24] . . . . .	47
3.20	Características da Temperatura em Brasília no período de medição (01/01/2005)[27] . . .	48
3.21	Características da Umidade Relativa em Brasília no período de medição (01/01/2005)[27]	49
3.22	Percurso de medidas radioelétricas em Brasília (pontos de medida na cor azul) [29] . . .	50
3.23	Relevo do percurso de medidas radioelétricas em Brasília [29] . . . . .	51
3.24	Mapa altimétrico do percurso de medidas radioelétricas em Brasília [29] . . . . .	52
3.25	Comparativo entre medidas radioelétricas e predição em Brasília (856 MHz) - $\Delta_h=50$ [29]	53
3.26	Ensaio de predição em Brasília (856 MHz) com refratividade tabelada - $\Delta_h=50$ [29] . . . .	54
3.27	Cobertura com LRM em <i>modo área</i> para a cidade de Brasília (856 MHz - dB $\mu$ V/m) [29] .	55
3.28	Cobertura LRM em modo área para a cidade de Brasília (856 MHz - dB $\mu$ V/m) [29] . . .	56
3.29	Cobertura em modo área para a cidade de Brasília com o software Radio Mobile [31] . . .	57

# Lista de Tabelas

2.1	Irregularidade do Terreno $\Delta_h$ [5]	7
2.2	Parâmetros do Modelo Longley-Rice [11]	13
2.3	Valores estimados para a Irregularidade do Terreno [11]	14
2.4	Refratividade da Superfície em Relação ao Clima [11]	15
2.5	Permissividade e condutividade de referência do solo [11]	17
3.1	Parâmetros de Entrada do Aplicativo [11]	26
3.2	Arquivos do aplicativo LRM [11]	27
3.3	Resultados das medidas radioelétricas da Rádio UFMG em Belo Horizonte (104,5 MHz) [26]	46

# Lista de Abreviaturas

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações

DRM *Digital Radio Mondiale*

FCC *Federal Communications Commission*

GAPTEM Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ITU *International Telecommunication Union*

LRM Modelo Longley-Rice

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NTIA *National Telecommunications and Information Administration*

RF Rádio Frequência

SPRAD Sistema de Predição de Cobertura Radioelétrica

TASO *Television Allocation Study Organization*

UHF *Ultra High Frequency*

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

VHF *Very High Frequency*

# Lista de Símbolos

- $A$  Amplitude do sinal recebido
- $A_{los}$  Atenuação em linha de visada
- $A_{dif}$  Atenuação por difração
- $A_{es}$  Atenuação por espalhamento
- $d$  Distância
- $d_{Lb}$  Horizonte de rádio da antena transmissora
- $d_{Lm}$  Horizonte de rádio da antena receptora
- $D_0$  Distância de referência
- $\epsilon$  Permissividade complexa do solo
- $\epsilon_r$  Permissividade do solo
- $f$  Frequência
- $G_{Tx}(\theta, \phi)$  Ganho da antena transmissora
- $G_{rx}(\theta, \phi)$  Ganho da antena receptora
- $h_b$  Altura estrutural da antena transmissora
- $h_m$  Altura estrutural da antena receptora
- $h_{eb}$  Altura efetiva da antena transmissora
- $h_{em}$  Altura efetiva da antena receptora
- $k$  Número de onda
- $m_r$  Valor médio do nível de sinal
- $N_s$  Refratividade da superfície
- $N_1$  Refratividade de referência da superfície
- $P(r)$  Função Probabilidade



- $r$  Função do nível de sinal recebido
- $UF$  Fator de atenuação urbano
- $W_{ref}$  Atenuação de referência
- $W_0$  Atenuação de espaço livre
- $Y_L$  Variabilidade de localização
- $Y_S$  Variabilidade de situação
- $Y_T$  Variabilidade de tempo
- $\gamma_a$  Fator de raio da curvatura efetiva da Terra
- $\gamma_e$  Curvatura efetiva da Terra
- $Z_0$  Impedância característica do solo
- $Z_1$  Elevação de referência da superfície refrativa
- $Z_e$  Impedância de transferência do solo
- $Z_s$  Elevação da superfície refrativa
- $Z_g$  Impedância da superfície
- $\lambda$  Comprimento de onda
- $\Delta_h$  Irregularidade do Terreno
- $\Delta_h(d)$  Irregularidade do Terreno em função da distância  $d$
- $\Delta_h(s)$  Irregularidade do Terreno em função da distância  $s$
- $\delta$  Desvio na atenuação com distribuição Rice
- $\sigma$  Desvio padrão / Condutividade do solo
- $\sigma^2$  Variância da potência do sinal recebido
- $\theta_e$  Ângulo de elevação no horizonte de rádio entre os terminais
- $\theta_{eb}$  Ângulo de elevação do horizonte de rádio da antena transmissora
- $\theta_{em}$  Ângulo de elevação do horizonte de rádio da antena receptora

# Capítulo 1

## Introdução

Durante séculos, a comunicação mais rápida e segura era aquela que utilizava as pessoas como meio de transporte das mensagens. Um mensageiro chinês chegava a percorrer 400 km por dia para entregar uma correspondência ao seu destino. Os gregos, persas e romanos enviavam mensagens por meio de um código visual formado por tochas acesas em lugares altos, onde as pessoas erguiam ou abaixavam seus artefatos segundo um código próprio [1].

Seguindo este princípio, em 1794, o francês Claude Chappe, inventou um código telegráfico visual, que consistia em um conjunto de hastes móveis que transmitiam letras e sinais. Contudo, apenas no século XIX que Samuel Morse construiu um aparelho elétrico capaz de transmitir códigos, isso a partir das descobertas de Oersted e Ampère [2].

Até a metade do século XIX, as comunicações telegráficas estavam limitadas às comunicações guiadas por cabos nos continentes. Apenas em 1897, o italiano Guglielmo Marconi conseguiu enviar sinais telegráficos modulados em ondas eletromagnéticas sem utilizar cabos metálicos. As descobertas de Heinrich Hertz sobre as ondas *radioelétricas*, em 1866, permitiram o envio dessas mensagens. A primeira transmissão transatlântica sem-fio foi feita em 1901. Dezenove anos depois, em 1920, um discurso foi transmitido de uma estação de rádio da Grã-Bretanha e recebido na América do Norte [2].

Pouco tempo depois, o desenvolvimento da eletrônica permitiu melhorar ainda mais os meios de comunicação à distância. Em 1926, a Grã-Bretanha transmitiu as primeiras imagens de televisão. Os sistemas de comunicação evoluíram e permitiram, já em 1932, transmissões regulares nos Estados Unidos e Grã-Bretanha. Depois da II Guerra Mundial, a televisão foi reconhecida mundialmente e as ondas de

radioelétricas permitiam a difusão do rádio e da televisão em diferentes partes do globo [2].

Muitos estudos foram realizados para determinação da cobertura dos sinais radioelétricos de rádio e televisão em uma determinada área, prevendo diferentes cenários e condições ambientais. As ondas de rádio, ou eletromagnéticas, se propagam de acordo com as características físicas, climáticas e ambientais das localidades atendidas pelas emissoras. Entre essas variáveis, é necessário considerar também todos os elementos que possam influenciar a propagação desses sinais nessa área, seja ela urbana ou rural [3].

Diferentes modelos de propagação das ondas eletromagnéticas foram propostos para previsão dos sinais de rádio e televisão em diferentes cenários e ambientes. Longley-Rice é um desses modelos, o qual é adotado nos Estados Unidos para predição de sinais de televisão e radiodifusão. Além da predição dos sinais de rádio, o modelo Longley-Rice também é utilizado pela Agência Espacial Norte Americana (NASA - sigla em inglês) para determinação das perdas de propagação das ondas de rádio por sondas espaciais e modelagem de canais de rádio em outros planetas [10].

Em 2004, Philip Vishwanath modelou canais de rádio sobre a superfície de Marte utilizando este modelo de predição [9]. Por sua vez, L. Foore, em 2007, utilizou o modelo Longley-Rice para predição do sinal de enlaces de rádio utilizados por estações espaciais na Lua [14]. Em 2011, Ali Akoglu apresentou modificações paralelas ao modelo Longley-Rice para uso em processadores aplicáveis em projetos de sondas espaciais, uma vez que consideram, de maneira eficaz, as perdas por atenuação e difração, em tempo reduzido e baixo custo computacional, essenciais para equipamentos espaciais embarcados [10].

Além das aplicações espaciais, nas comunicações comerciais, outros critérios também devem ser considerados na instalação de uma estação de rádio ou televisão. Por exemplo, as características de cobertura do sinal nas áreas mais distantes e/ou mais densas para previsão da intensidade dos sinais recebidos pelo público. No modelo Longley-Rice, o estudo de viabilidade para instalação das antenas considera os pontos topograficamente privilegiados e o somatório das atenuações em função da distância, do caminho de propagação, topologia da rede, ambiente, faixa espectral e outros que possam ser determinantes no nível de sinal recebido [11].

Essas características são diferentes para cada localidade e, no caso de cidades de clima tropical, existem elementos com relevante distinção das localidades do continente norte-americano. Em Belo Horizonte, por exemplo, observa-se que na área aproximada da cidade de 300 km<sup>2</sup> existe com altimetria bastante variada, alternando-se entre 500 a 1300 metros acima do nível do mar. Além disso, o cenário do ambiente

também é bastante diferenciado, alternando de alta densidade de edificações no hiper-centro da cidade à zonas de vale com vegetação tropical/serrado de até 5 metros nas bordas do município. Estes elementos podem caracterizar um fator de atenuação diferenciado, que pode ser descrito como um fator de atenuação específico para cidades urbanas em área de clima tropical, bem diferente das cidades dos Estados Unidos.

Nesta discussão, este trabalho também descreve o desenvolvimento do algoritmo do Modelo Longley-Rice (LRM), elaborado em linguagem de MatLab<sup>TM</sup> conforme proposição de Hufford [11]. Este aplicativo será utilizado para análise e comparação de medições da intensidade de campo de emissoras de rádio realizadas em Belo Horizonte e Brasília. Para a calibração e validação do aplicativo, são apresentados resultados comparados com dados históricos da Comissão Federal de Comunicações do Estados Unidos (FCC - sigla em inglês).

## 1.1 Justificativas

A modelagem de sinais de rádio ou televisão é uma importante ferramenta para instalação de sítios de repetição e estações de transmissoras. Este recurso permite reduzir os custos dos sistemas de comunicações, os quais podem ser previamente avaliados em estudos analíticos, amparados em laboratório para, em um momento posterior, orientar os investimentos de instalação de infraestrutura.

Portanto, o aprimoramento dos estudos acerca do modelo Longley-Rice pode auxiliar os processos de instalação de redes de comunicação, em especial, os sistemas de comunicação comerciais de televisão e radiodifusão. Trata-se de um modelo de predição ágil e eficiente, que exige baixo custo computacional e que apresenta resultados satisfatórios.

Além disso, este trabalho é motivado pela oportunidade de aprofundar os estudos acerca dos fenômenos da propagação dos sinais radioelétricos, de maneira que essa discussão possa ser útil no meio acadêmico (GAPTEM/UFMG), e profissional, no âmbito do dimensionamento de redes de comunicações comerciais, militares e de segurança pública. A discussão acerca do fator de atenuação urbano-tropical também pode adequar o modelo de predição estadunidense para o contexto brasileiro, em especial, aferindo com maior eficiência e eficácia os cálculos analíticos de predição.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a aplicabilidade do modelo de propagação Longley-Rice para cidades de clima tropical, utilizando para isso ensaios realizados em Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, e Brasília, no Distrito Federal. Para tanto, como objetivo específico deste trabalho, o desenvolvimento de um aplicativo computacional baseado no modelo Longley-Rice. Este aplicativo será útil na modelagem da atenuação em cidades de clima tropical, contribuindo no desenvolvimento e elaboração de projetos de radiocomunicação.

## 1.3 Organização do Trabalho

Para alcançar os objetivos deste trabalho, este texto está organizado de maneira que o primeiro capítulo apresenta uma breve introdução acerca do modelo de propagação Longley-Rice e sua aplicabilidade. Também são apresentados os objetivos, justificativas e metodologia de estudo deste trabalho. O segundo capítulo apresenta um breve estudo acerca do modelo Longley-Rice, iniciando por seu histórico de criação, passando pelas etapas de elaboração do modelo de predição e análise das variáveis de atenuação, consolidando o referencial teórico necessário para essa discussão. O terceiro capítulo descreve o processo de modelagem computacional, os ensaios de calibração e validação, e a análise da atenuação em dados medidos em Belo Horizonte e Brasília. Por fim, o quarto capítulo discute os resultados obtidos com a modelagem computacional, apresentando as considerações finais, sugestões de estudos futuros e as referências bibliográficas utilizadas.

## Capítulo 2

# Referencial Teórico

O modelo Longley-Rice foi proposto para frequências entre 20 MHz a 20 GHz em ambientes diferenciados, para distintas alturas de antenas transmissoras e receptoras. O modelo apresenta uma generalização da potência de sinal recebido sem uma caracterização detalhada do canal. Para isso, o modelo utiliza recursos estatísticos para compensar a caracterização do canal, que depende das variáveis de cada cenário e ambiente [3]. A variação do sinal é determinada no modelo de predição de acordo com as mudanças atmosféricas, perfil topográfico e espaço livre. Estas variações são descritas com a ajuda de estimativas estatísticas, que apresentam os desvios que contribuem na atenuação total de sinal. Neste Capítulo é apresentado o contexto histórico de proposição do modelo de predição Longley-Rice, em seguida, um breve estudo acerca dos parâmetros de cálculo das variáveis de atenuação e da distribuição estatística Rice neste processo.

### 2.1 Histórico

Durante o início dos anos 60, muitos estudos acerca da propagação das ondas eletromagnéticas foram desenvolvidos nos Estados Unidos e Europa para detectar o comportamento dos sinais das emissoras de rádio e televisão, bem como de uso militar. Nesses estudos foram previstos cenários que consideravam as estações transmissoras e receptoras em trechos fixos, de maneira a modelar os efeitos da atenuação por difração e espalhamento da rádio frequência (RF). Para tanto, Barsis & Miles [20] realizaram testes de medição nas faixas de 20, 50, e 100 MHz. Outras faixas em VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) também foram estudadas com o apoio da Organização de Estudo de Alocação

de Televisão (TASO - sigla em inglês) de maneira a compreender a propagação dos sinais de estações de *broadcasting* entre distâncias uniformes e circulares com antenas receptoras posicionadas entre 3 e 9 metros do solo [5].

Nesses estudos, o enlace do sistema de comunicação era analisado de acordo com a geometria do sistema formado pela antena transmissora, receptora, obstáculos e curvatura da Terra. As informações do perfil do terreno era disponível para um caminho específico, de maneira que as distâncias do horizonte, os ângulos de elevação e a distância angular entre as estações eram calculados diretamente. Em uma previsão de área de cobertura, no entanto, todos perfis de caminho não estavam disponíveis com facilidade, e estes parâmetros deveriam ser calculados estatisticamente.

Logo, observou-se que esses estudos apresentavam-se limitados, pois necessitavam compreender melhor o efeito da aleatorização das variáveis de atenuação quando o caminho de propagação das ondas de rádio deixasse de ser fixo e assumisse mobilidade. Esse problema começa a ficar latente quando o avanço da tecnologia proporcionou às estações transmissoras e receptoras certa mobilidade em uma área geográfica [5].

A mudança aleatória de percurso pode associar variáveis de atenuação relevantes para a previsão do nível de sinal recebido e, por isso, era preciso considerá-las nos modelos de predição que fossem propostos. Esse problema foi detectado pela Agência Nacional de Padronização dos Estados Unidos (NBS - sigla em inglês) em um estudo acerca das características de propagação das tropas do exército estadunidense em campo de batalha. No contexto militar, isto é, no teatro de operações, as estações móveis de batalha assumiam posições táticas em intervalos de tempo muito reduzidos. Essa mobilidade proporcionava condições desfavoráveis para as comunicações ou o encerramento do contato entre o posto de coordenação e a estação móvel [6].

Em 1963, Barsis & Rice apresentaram um relatório que descreveu um modelo de cobertura de sinais de rádio sobre vários tipos de terreno [6]. Neste documento, os autores apresentam seus dados relacionados com as regiões dos estados do Colorado e Ohio, uma vez que essas áreas apresentam relevo bastante variado, alternando-se entre planícies e montanhas. Para tanto, os autores descreveram as contribuições dos tipos de relevo para a análise espectral de um sinal discreto, de intervalo finito, bem como a análise de harmônicos para uma área circular entre os terminais de teste. Esses estudos progrediram e foi estabelecido um parâmetro de rugosidade do terreno ( $\Delta_h$ ) para caracterizar estatisticamente tais irregularidades

conforme observado na Tabela 2.1 a seguir:

Tipo do Terreno	Parâmetro de Irregularidade do Terreno
Liso (ou sobre a água)	0
Planície	30
Colinas	90
Serras	200
Montanhas	500

Tabela 2.1: Irregularidade do Terreno  $\Delta_h$  [5]

Estes estudos avançaram e, de acordo com Longley & Rice [5], o parâmetro  $\Delta_h$  pode ser obtido de várias maneiras, mas o método escolhido vai depender da finalidade do projeto e o perfil do terreno. No trabalho original desses autores, para determinar  $\Delta_h$  em uma área determinada nos Estados Unidos, um grande número de perfis foram avaliados em intervalos uniformes. O valor médio encontrado em cada distância foi utilizado para obter uma curva suave sobre o continente. O resultado parcial deste trabalho pode ser observado na Figura 2.1 a seguir:

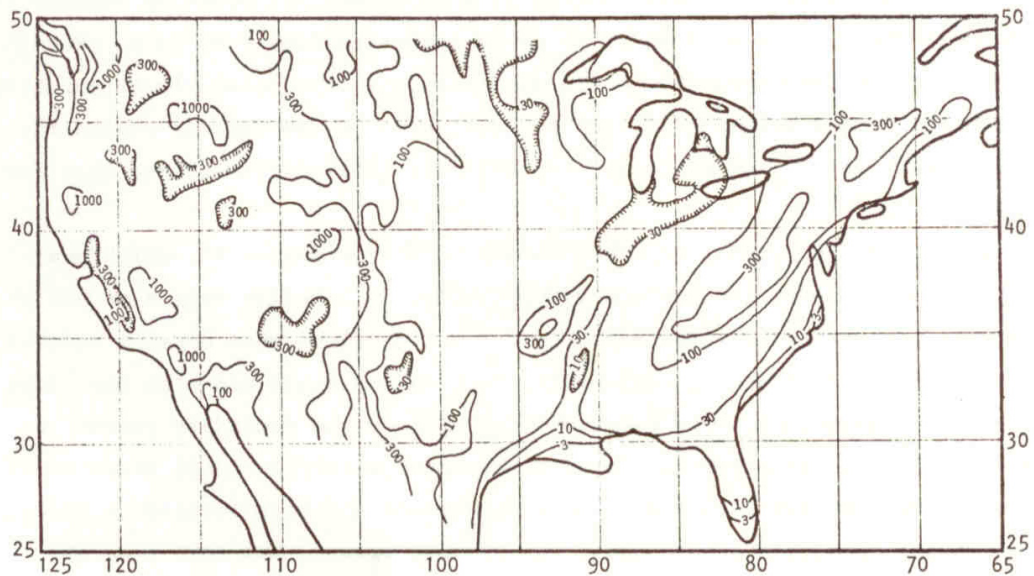


Figura 2.1: Curvas de Rugosidade do Terreno nos Estados Unidos [5]

O parâmetro de rugosidade do terreno  $\Delta_h(d)$  proposto por Barsis & Rice [5] e aprimorado por Longley [6], foi bastante modesto para distâncias de até 2 km, uma vez que a distância de referência utilizada



para seu cálculo era de 50 km. Entretanto, na área estudada, esse resultado foi mais expressivo nas distâncias superiores à 2 km. Foram considerados 36 modelos distintos de perfil topográfico, em seis direções, em área de 60 km, perfazendo um total de 216 modelos de terreno, espaçados em áreas de 100 km<sup>2</sup>. Além disso, também foram analisadas áreas com outros tamanhos (5, 10, 20, até 60 km). Nessa área, a interdeclividade, ou irregularidade do terreno, foi determinada com o parâmetro  $\Delta_h(d)$ :

$$\Delta_{h(d)} = \Delta_h \left( 1 - 0,8 \exp \left( -\frac{d}{D_0} \right) \right) \quad (2.1)$$

A distância de referência ( $D_0$ ) equivale 50 km e a distância entre níveis de irregularidade ( $d$ ) depende de cada tipo de terreno. Quando a distância entre os picos de elevação do terreno é muito grande em relação à ( $D_0$ ), não há alteração no valor estabelecido na Tabela 2.1 para o parâmetro  $\Delta_h$ . Essa análise pode ser avaliada na Figura 2.2, que apresenta a variação do fator de irregularidade do terreno para uma distância de referência de 50 km.

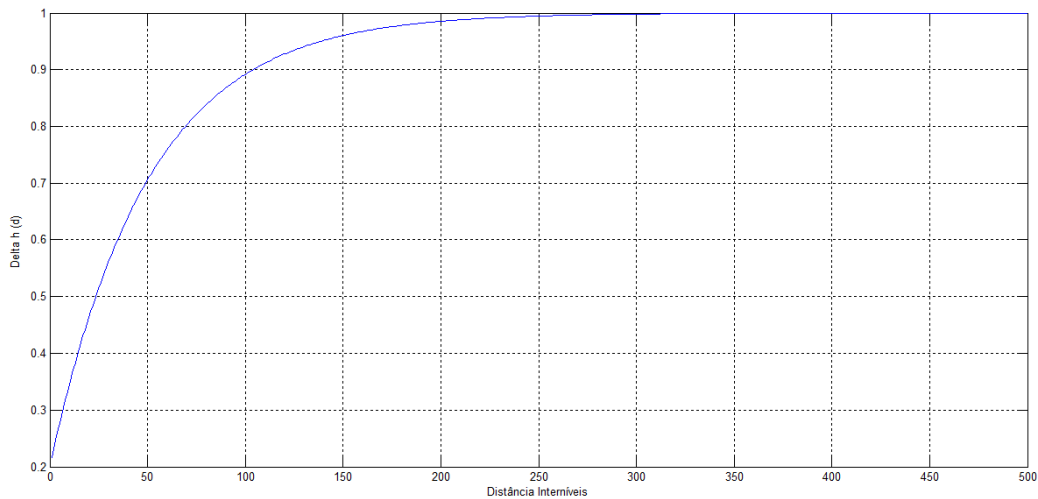


Figura 2.2: Variação do Fator de Irregularidade do Terreno  $\Delta_h$ [6]

Longley & Rice [5] avaliaram um grande número de perfis de terreno para diferentes distâncias e descobriram que, onde o terreno não é homogêneo, ocorre uma dispersão maior de valores do parâmetro  $\Delta_h$  e seu valor estimado não pode representar uma mediana em cada distância. Em tais circunstâncias,

é necessário prever maior variabilidade na localização da estação, ou, por vezes, considerar diferentes setores de uma área e prever um  $\Delta_h$  para cada setor. Um exemplo disso seria uma área que inclui planícies, serras e montanhas. As perdas previstas para cada setor poderiam ser determinadas pelo valor do parâmetro calculado para essa área como um todo. Em resumo, de acordo com Longley & Rice [5], o parâmetro  $\Delta_h$  pode ser determinado a partir da análise dos intervalos entre as elevações do terreno, isto é, o somatório total das contribuições de elevações.

Além disso, Longley & Rice realizaram a análise do comportamento da propagação dos sinais de estações de rádio em diferentes tipos de terrenos e observaram o mesmo comportamento para as faixas de 20 MHz à 20 GHz [5]. Ao considerar a irregularidade do terreno, os pesquisadores também foram capazes de identificar outras variáveis que também contribuíam com a atenuação do sinal medido. Essas variáveis aleatórias estavam relacionadas com as condições do tempo ( $Y_T$ ), localização ( $Y_L$ ) e situação ( $Y_S$ ) na qual a estação móvel estava sujeita.

Em função dessa variabilidade, Longley & Rice também observaram desvios ( $\delta$ ) caracterizados por uma distribuição estatística de Rice, os quais poderiam ser mais ou menos significativos para a atenuação do sinal transmitido [7]. Segundo Longley & Rice [5], o sinal recebido por uma estação móvel é obtido pela diferença do nível de sinal transmitido atenuado no espaço livre ( $W_0$ ) e o somatório da atenuação formada pelas variáveis aleatórias que apresentam-se como uma atenuação de referência ( $W_{ref}$ ), em dB, para o modelo:

$$W_{ref} = W_0 + \delta_s Y_S + \delta_t Y_T + \delta_L Y_L \quad (2.2)$$

Longley & Rice [5] apresentaram este modelo baseado em um programa computacional capaz de calcular o somatório das atenuações dessas variáveis, juntamente com a contribuição da irregularidade do terreno. A descrição matemática de cada uma dessas variáveis é bastante complexa e está disposta no trabalho de Hufford [11]. Alguns anos mais tarde, foram observadas outras contribuições, em especial, para as edificações nas áreas urbanas, responsáveis por um fator de atenuação urbano [6].

Para Vishwanath [9], Foore [14] e Akoglu & Song [10], o modelo Longley-Rice realiza cálculos de predição de maneira semi-empírica, com baixo custo computacional e apresenta resultados satisfatórios em relação aos modelos tradicionais. Trata-se de um modelo de predição bastante eficiente para o uso embarcado, bem como para ensaios de comunicação entre estações terrenas e estações espaciais móveis

enviadas para explorar outros planetas.

Atualmente, além da NASA, da Comissão Federal das Comunicações estadunidense (FCC - sigla em inglês) e da Agência Nacional de Administração da Informação e Telecomunicações (NTIA - sigla em inglês), radioamadores de todo o mundo também utilizam o modelo Longley-Rice para análise da propagação dos sinais de suas estações de comunicação.

## 2.2 Parâmetros de Análise Computacional

Segundo Longley & Rice [5], o sinal recebido por uma estação móvel é resultado do sinal transmitido devidamente atenuado no espaço livre ( $W_0$ ) e pelo somatório da atenuação formada pelas variáveis aleatórias em seu caminho. Neste cálculo, também é importante considerar o ganho das antenas transmissora ( $G_{Tx}(\theta, \phi)$ ) e receptora ( $G_{Rx}(\theta, \phi)$ ). Para a atenuação de espaço livre é considerada a distância entre as duas estações ( $d$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ). No modelo proposto por esses autores, inicialmente é calculada a atenuação de espaço livre  $W_0$ , em dB, definida por:

$$W_0 = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (2.3)$$

Em seguida, o modelo Longley & Rice [5] calcula a distância entre as estações onde ocorrem três regiões de atenuação ao longo do caminho de propagação do sinal de rádio: *Linha-de-Visada* ( $A_{los}$ ); *Difração* ( $A_{dif}$ ) e *Espalhamento* ( $A_{es}$ ). Nestas três faixas de atenuação também ocorrem os efeitos aleatórios de situação  $Y_S$ , localização  $Y_L$  e tempo  $Y_T$ .

Segundo Longley & Rice, a região de Linha-de-Visada é definida como a região onde a superfície da Terra não interrompe a propagação das ondas de rádio. Em outras palavras, esta região se estende até a distância do horizonte de rádio. Nesta região, a atenuação ( $A_{los}$ ) é calculada como uma função direta da distância entre as estações [5]. A região de difração é onde ocorre o aumento bastante rápido e linear da atenuação ( $A_{dif}$ ). Na região de espalhamento (ou dispersão), esse fenômeno de atenuação ( $A_{es}$ ) é mais lento.

Para o cálculo da atenuação de referência ( $W_{ref}$ ), em dB, são utilizados os modos de predição em uma área ou ponto-a-ponto. No modo área é considerada a variabilidade de localização das estações em uma área. No modo ponto-a-ponto, o cálculo da atenuação de referência considera as distâncias conhecidas entre as estações transmissora e receptora, além das distâncias onde se iniciam os fenômenos da difração

e espalhamento.

$$W_{ref} = W_0 + A_{los} + (Y_L + Y_S + Y_T) \quad \text{para } d < d_{Lb} \quad (2.4)$$

$$W_{ref} = W_0 + A_{dif} + (Y_L + Y_S + Y_T) \quad \text{para } d_{Lb} \leq d \leq d_{Lm} \quad (2.5)$$

$$W_{ref} = W_0 + A_{es} + (Y_L + Y_S + Y_T) \quad \text{para } d_{Lm} < d \quad (2.6)$$

Estas faixas de atenuação são obtidas a partir da análise da geometria do enlace observada na Figura 2.3. Neste cálculo são consideradas a altura da antena transmissora ( $h_b$ ), receptora ( $h_m$ ), altura efetiva (estrutura + elevação do perfil) da antena transmissora ( $h_{eb}$ ), antena receptora ( $h_{em}$ ), a distância entre as estações ( $d$ ), o horizonte de rádio da antena transmissora ( $d_{Lb}$ ), o horizonte de rádio da antena receptora ( $d_{Lm}$ ), os ângulos de elevação do horizonte de rádio da antena transmissora ( $\theta_{eb}$ ), da antena receptora ( $\theta_{em}$ ) e do cruzamento dos horizontes de rádio das antenas transmissora e receptora ( $\theta_e$ ).

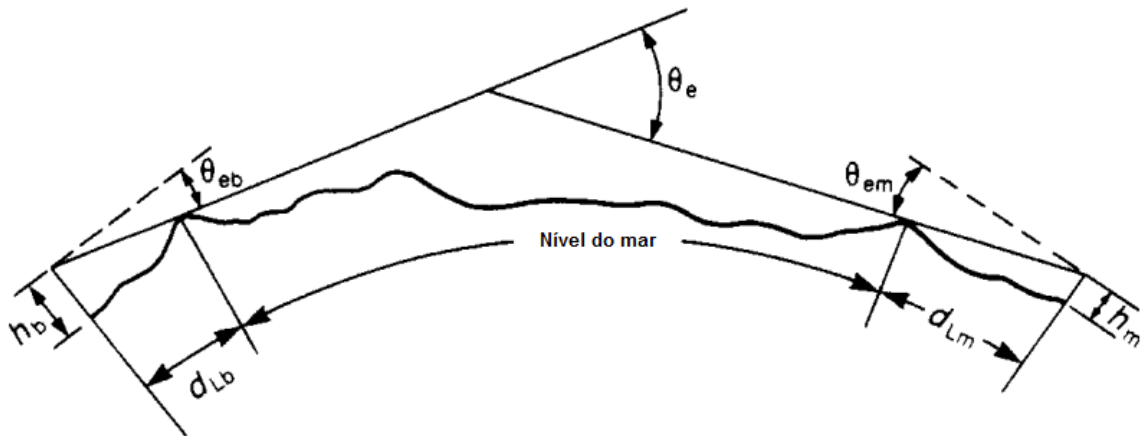


Figura 2.3: Geometria do enlace no modelo Longley-Rice [21]

De acordo com Parsons [21] e Bertoni [19], as distâncias  $d_{Lb}$  e  $d_{Lm}$ , em quilômetros, podem ser estimadas estatisticamente em função da irregularidade do terreno ( $\Delta_h$ ) e das alturas efetivas ( $h_{eb}$ ) e ( $h_{em}$ ):

$$d_{Lb} = \sqrt{17h_{eb}} \exp \left( -0,07 \sqrt{\left( \frac{\Delta_h}{h_{eb}} \right)} \right) \quad (2.7)$$

$$d_{Lm} = \sqrt{17h_{em}} \exp \left( -0,07 \sqrt{\left( \frac{\Delta_h}{h_{em}} \right)} \right) \quad (2.8)$$

Por sua vez, os ângulos de elevação, em radianos, segundo Parsons [21] e Bertoni [19] podem ser obtidos a partir dos seguintes cálculos:

$$\theta_{eb} = \frac{0,0005}{\sqrt{17h_{eb}}} \left( 1,3 \left( \frac{\sqrt{17h_{eb}}}{d_{Lb}} \right) \Delta_h - 4h_{eb} \right) \quad (2.9)$$

$$\theta_{em} = \frac{0,0005}{\sqrt{17h_{em}}} \left( 1,3 \left( \frac{\sqrt{17h_{em}}}{d_{Lm}} \right) \Delta_h - 4h_{em} \right) \quad (2.10)$$

$$\theta_e = \max \left( \theta_{eb} + \theta_{em}, \left( -\frac{d_{Lb} + d_{Lm}}{8495} \right) \right) \quad (2.11)$$

Estes parâmetros do enlace de comunicação são necessários para o cálculo dos coeficientes de atenuação, os quais serão detalhados ao longo do texto deste trabalho. Para exemplificar as faixas de atenuação ao longo do caminho de propagação do sinal de rádio, Hufford [12] apresenta um exemplo de transmissão de 1kW (ERP) na faixa 100 MHz em um perfil com  $\Delta_h=150$ , o qual pode ser observado na Figura 2.4 a seguir:

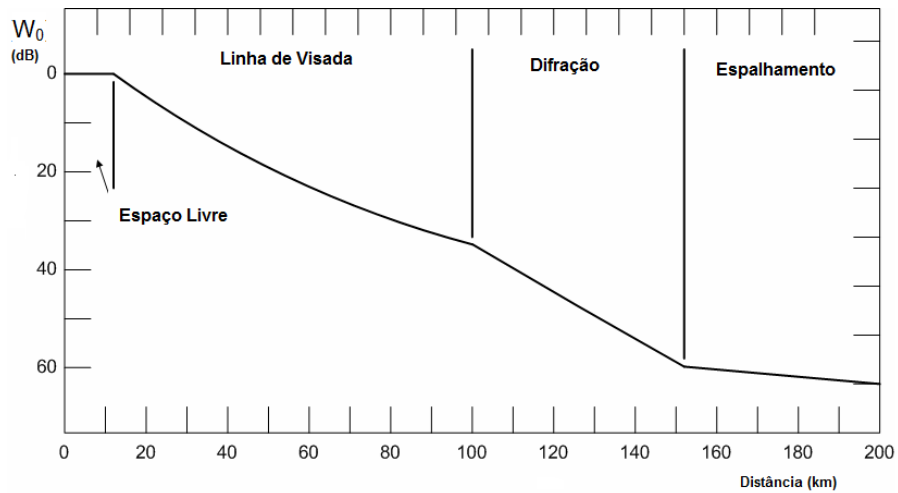


Figura 2.4: Atenuação de Referência [12]

Para o cálculo dos coeficientes de atenuação do modelo Longley-Rice, recomenda-se o algoritmo simplificado proposto por Hufford [11], o qual descreve detalhadamente a fundamentação matemática de cada coeficiente em função das distâncias das estações transmissora e receptora, altura das antenas e demais variáveis citadas anteriormente. Para tanto, o modelo Longley-Rice aplica-se aos casos que apresentem as seguintes características:

Característica	Faixa de operação
<i>Faixa de Frequência</i>	20 MHz a 20 GHz
<i>Distância entre estações</i>	2 a 2000 km
<i>Altura das antenas</i>	0.5 a 3000 m
<i>Polarização</i>	Vertical e Horizontal

Tabela 2.2: Parâmetros do Modelo Longley-Rice [11]

A irregularidade do terreno é caracterizada pelo parâmetro  $\Delta_h$  e foi descrito anteriormente. Por sua vez, a variância relacionada com a localização da estação depende da irregularidade do terreno  $\Delta_h(d)$  em função de sua posição ( $d$ ). O modelo original sugere alguns valores tabelados para aproximação deste cálculo, conforme observado na Tabela 2.3.

Tipo de terreno	$\Delta_h$ (d)
<i>Água</i>	0 a 50
<i>Planície</i>	30
<i>Serras</i>	80 a 150
<i>Montanhas</i>	150 a 300
<i>Picos e cordilheiras</i>	300 a 700

Tabela 2.3: Valores estimados para a Irregularidade do Terreno [11]

A refratividade da superfície  $N_s$  é obtida a partir da análise das condições atmosféricas. Essas características, tais como o temperatura, pressão e umidade relativa, afetam o índice de refração do ar e desempenham um papel importante na determinação da resistência e propriedades desvanecimento de sinais troposférico. Esta superfície refrativa que limita a atuação do modelo à faixa de 20 MHz a 20 GHz, uma vez que os fenômenos atmosféricos considerados neste modelo são mais relevantes para essa faixa [5].

Segundo Longley & Rice [5], o índice de refração da atmosfera perto da superfície da Terra é o parâmetro mais importante da atmosfera para cálculo da propagação de ondas eletromagnéticas. Ele é utilizado para prever, a longo prazo, o valor médio de atenuação. Este gradiente de superfície, em grande parte, determina a quantidade de sinal que é refratado pela atmosfera. No modelo Longley-Rice, define-se um raio eficaz da Terra como uma função do gradiente de refratividade superfície. Para determinação da refratividade da superfície é respeitada a seguinte formulação:

$$N_s = N_0 \exp\left(-\frac{Z_s}{Z_1}\right) \quad (2.12)$$

A refratividade da superfície  $N_s$  onde uma estação de rádio ou televisão está instalada é dada em função da refratividade de referência (ao nível do mar) ponderada pela elevação da superfície envolvida  $Z_s$  e outra elevação como referência  $Z_1 = 9,46$  km. O modelo Longley-Rice adota os valores refratividade dispostos no mapa da Figura 2.5. Esses dados foram resumidos em função do clima local e podem ser avaliados na Tabela 2.4.

Clima	Refratividade da Superfície (N-unidades)
Deserto	280
Continental Temperado	301
Continental Sub-tropical	320
Marítimo Temperado	320
Marítimo Temperado sobre o mar	350
Equatorial	360
Marítimo Sub-tropical	370

Tabela 2.4: Refratividade da Superfície em Relação ao Clima [11]

A curvatura efetiva da Terra  $\gamma_e$  utilizada nos cálculos da geometria do sistema de comunicação é obtida a partir da relação entre o índice de refratividade da superfície  $N_s$ , refratividade de referência ( $N_1$  - 179.3 N-unidades) e fator de raio efetivo da Terra ( $\gamma_a$  - 157 N-unidades/km). Essa relação pode ser avaliada a seguir:

$$\gamma_e = \gamma_a \left( 1 - 0,4665 \exp \left( -\frac{N_s}{N_1} \right) \right) \quad (2.13)$$

Segundo Rice [7], é comum definir igual à 301 N-unidades, considerando o raio efetivo da Terra com 8.495 km. Para curtas distâncias, o modelo não é particularmente sensível às mudanças no valor da refratividade superfície. Por esta razão,  $N_s$  tem o valor nominal de 301 N-unidades. Para distâncias superiores à 100 km, mudanças no índice de refratividade da superfície  $N_s$  pode ter algum efeito sobre atenuação. Por definição,  $N_1 = 179,3$  N-unidades,  $\gamma_a = 157$  N-unidades/km.

A impedância da superfície de transferência  $Z_g$  é obtida pela análise da permissividade ( $\epsilon_r$ ) e condutividade ( $\sigma$ ) do solo em relação a polarização das ondas eletromagnéticas. A impedância característica do solo em relação a polarização das antenas pode ser avaliada a seguir:

$$Z_g = \sqrt{\epsilon_r - 1} \text{ polarizada horizontalmente} \quad (2.14)$$

$$Z_g = \frac{\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\epsilon} \text{ polarizada verticalmente} \quad (2.15)$$



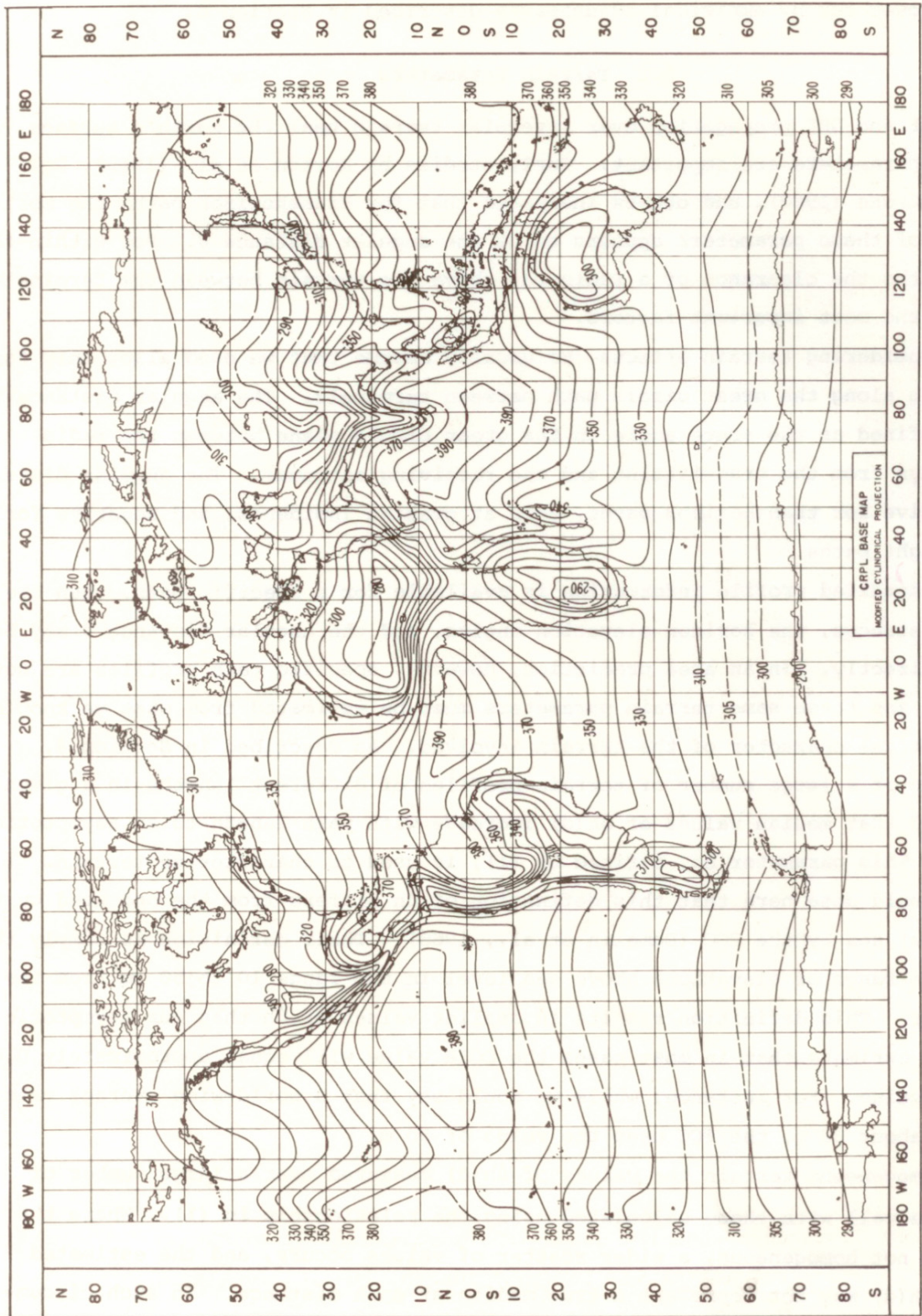


Figura 2.5: Mapa da Refratividade [5]

Por sua vez, a permissividade relativa complexa ( $\epsilon$ ) é definida de acordo com a permissividade relativa de referência ( $\epsilon_r$ ) e condutividade do solo relativa  $\sigma$  dispostos na Tabela 2.4. Ela é definida ainda em relação à impedância característica  $Z_o = 376,62 \Omega$  e frequência de operação ( $k = 2\pi\omega f$ ):

$$\epsilon = \epsilon_r + \frac{iZ_o\sigma}{k} \quad (2.16)$$

Os valores sugeridos por Longley & Rice [5] para a permissividade ( $\epsilon_r$ ) e condutividade ( $\sigma$ ) do solo podem ser avaliados conforme classificação sugerida no modelo original:

Tipo de Solo	Permissividade Relativa (F/m) ( $\epsilon_r$ )	Condutividade Relativa (S/m)( $\sigma$ )
Pobre	04	0,001
Médio	15	0,005
Bom	25	0,020
Úmido (água doce)	81	0,010
Úmido (água mar)	81	5,000

Tabela 2.5: Permissividade e condutividade de referência do solo [11]

Estes dados são considerados no modelo original Longley-Rice para cálculo dos coeficientes de atenuação e variabilidade, mas Akoglu & Song [10] sugerem aproximações para facilitar o processamento matemático. Assim, os coeficientes de atenuação  $A_{los}$ ,  $A_{dif}$  e  $A_{es}$ , em dB, podem ser determinados a partir das formulações a seguir, sendo a frequência ( $f$ ) em MHz, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) em metros, as alturas das antenas e as distâncias em quilômetros, e os ângulos em radianos:

$$A_{los} = 20 \log \left( 1 + \frac{(d_{Lb} + d_{Lm}) \Delta h}{h_{eb} h_{em}} \right) \quad (2.17)$$

$$A_{dif} = \left( 1 + 0,045 \left( \frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{a\theta_e + (d_{Lb} + d_{Lm})}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

Onde:

$$a = \frac{6370}{(1 - 0,04665 \exp(0,005577N_s))} \quad (2.19)$$

$$A_{es} = H_0 + 10 \log (f\theta_e^4) - 0,1 (N_s - 301) \exp \left( \frac{-\theta_e d}{40} \right) \quad (2.20)$$

Onde:

$$H_0 = \frac{(h_{eb}^{-1} h_{em}^{-1})}{\theta_e f \|0,007 - 0,058\theta_e\|}$$

## 2.3 Distribuição Rice

Segundo Rice [8], a distribuição de envelope de atenuação em pequena escala sobre uma senoide ocorre quando existe um componente de sinal estacionário dominante. Essa característica pode ser modelada com uma distribuição estatística específica, sendo essa denominada de *Distribuição Rice*. Nessa condição, os sinais que chegam ao receptor seguem caminhos múltiplos e aleatórios, em diferentes ângulos que, mesmo sendo sobrepostos, sobressairá um único sinal dominante estacionário. Isso é muito comum em sistemas de radiodifusão e televisão, uma vez que o sinal com potência extremamente elevada é irradiado até um receptor e, mesmo que sinais múltiplos apareçam por múltiplas reflexões e encaminhamento, eles surgem em pequena escala se comparados ao sinal principal da emissora recebido diretamente [8].

Portanto, é nesse contexto que muitos autores sustentam que o modelo estatístico mais adequado para previsão da variabilidade de cenário em sistemas de radiodifusão e televisão é aquele que adota uma distribuição Rice. Por sua vez, nos casos em que o sinais refletidos ou re-encaminhados por múltiplos percursos tenham envelope com dimensão semelhante ao sinal principal, tal como ocorre na telefonia móvel, essa característica não será observada. No caso da telefonia móvel a potência dos sinais emitidos pelos terminais é muito reduzida e, mesmo que pequena, a contribuição dos sinais refletidos ou re-encaminhados podem ser relevantes para atenuação do sinal recebido.

De acordo com Fontán & Espiñeira [18], enquanto o sinal principal não é totalmente bloqueado por um obstáculo, este sinal dominante estacionário prevalece. Entretanto, se houver queda do sinal principal e forte reflexão especular de uma superfície lisa, como a de um grande edifício, ainda assim, poderá haver condições semelhantes e prevalecer um sinal dominante estacionário. Logo, em condições de desvanecimento, quando o sinal direto está desbloqueado ou ligeiramente atenuado, a sua propagação pode ser muito bem descrita com a distribuição Rice.

Segundo Montgomery [17], para determinação da soma da distribuição de variáveis aleatórias, tal como proposto inicialmente por Longley & Rice [5], e posteriormente por Fontán & Espiñeira [18], é necessário recorrer ao *Teorema do Limite Central*. Este postulado estabelece que a função distribuição de probabilidade da soma de variáveis aleatórias independentes aproxima-se do comportamento gaussiano a medida que a quantidade de variáveis cresce indefinidamente.

Para o modelo Longley-Rice, foi utilizado o estudo estatístico de Rice [8], o qual descreve detalhadamente como o Teorema do Limite Central pode ser utilizado para compreender o comportamento da função densidade de probabilidade para um sinal dominante estacionário. A função densidade de probabilidade  $P(r)$  pode ser descrita em função do nível de sinal ( $r$ ), o valor médio ( $m_r$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ):

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(r - m_r)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.23)$$

Considerando um sinal dominante de amplitude ( $A$ ), a variância da potência do sinal recebido antes da detecção do envelope ( $\sigma^2$ ) e o envelope do sinal aleatório recebido ( $r$ ), de acordo com Rice [5], a probabilidade de um sinal alcançar o nível  $r$  no receptor será dada por:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \text{ para } A \geq 0, r \geq 0 \quad (2.24)$$

$$P(r) = 0 \text{ para } r < 0 \quad (2.25)$$

No exemplo descrito na Figura 2.6, a probabilidade de recepção do sinal se altera em função da sua variabilidade ( $\sigma^2$ ) que, neste exemplo, está limitada entre 0,2 e 5 para um nível de recepção  $r = -90 \text{ dBm}$  e sinal dominante com amplitude  $A = -122 \text{ dBm}$ . Verifica-se, portanto, que quanto maior a variabilidade do sinal, menor a probabilidade de recepção para a distribuição Rice.

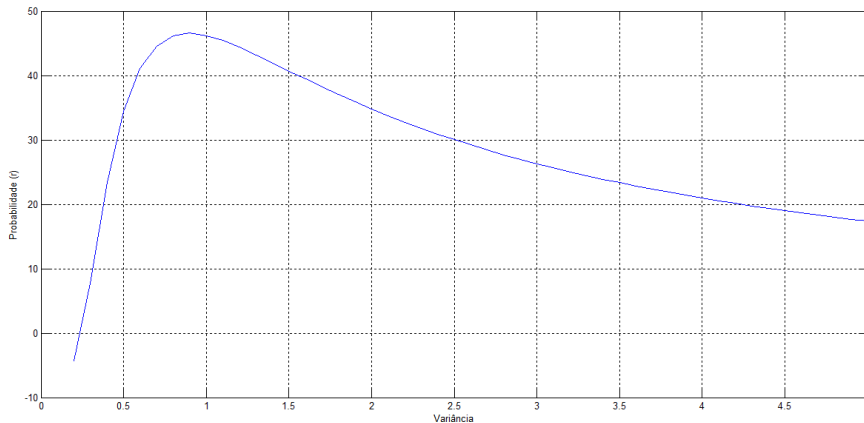


Figura 2.6: Função Probabilidade no Modelo Rice [18]

Segundo Rappaport [3] e Bertoni [19], o sinal estacionário dominante descrito por Rice [8], proporciona, na saída do detector de envelope, uma componente contínua ao caminho múltiplo aleatório. À medida que o sinal dominante se torna mais fraco, o sinal composto fica semelhante a um sinal de ruído que tem um envelope que possui características de *Rayleigh*. Dessa maneira não há componente dominante estacionária no sinal recebido e assume características de distribuição *Rayleigh*. Nessa condição, a distribuição Rice é degenerada quando o sinal dominante desvanece e o sinal assume características da distribuição Rayleigh. Nessas condições a probabilidade do sinal recebido alcançar um nível específico será dada por:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) \text{ para } r \geq 0 \quad (2.26)$$

$$P(r) = 0 \text{ para } r < 0 \quad (2.27)$$

Em área urbana, dificilmente essa característica poderia prevalecer na propagação do sinal de uma emissora de rádio ou televisão, pois o sinal transmitido possui dezenas de kilowatts. Assim, o efeito do desvanecimento pode surgir de maneira mais intensa apenas nas áreas mais distantes da emissora e, portanto, fora da sua área de cobertura principal. Logo, a característica predominante de atenuação deve adotar a distribuição Rice [8].

A função densidade de probabilidade na distribuição Rice é mais adequada para compreender o papel de cada componente de atenuação no modelo Longley-Rice. Além disso, percebe-se que este modelo

estatístico de distribuição é uma importante ferramenta para predição de sinais de emissoras *broadcasting* de rádio ou televisão, sendo utilizado amplamente para essa tarefa nos Estados Unidos.

### 2.3.1 Variabilidade no Modelo Longley-Rice

Quando a localização da estação receptora não é conhecida, ela também pode ser considerada como uma variável aleatória ( $Y_L$ ), a qual contribui para a atenuação do sinal recebido. Para o modo ponto-a-ponto, esta variabilidade é igual a zero, uma vez que a localização das estações é conhecida. Caso a localização de uma estação não seja conhecida, o cálculo da atenuação, em dB, devida a variabilidade de localização da estação em uma área deve seguir a proposição de Hufford [11], considerando o número de onda ( $k=2\pi f$ ) e a distância entre as estações ( $d$ ) em função da irregularidade do terreno ( $\Delta h$ ):

$$Y_L = \frac{10k\Delta h(d)}{k\Delta h(d) + 13} \quad (2.28)$$

De acordo Longley & Rice [5], a atenuação de um sinal também pode ser afetado severamente quando houver mudança de situação onde ocorre a propagação das ondas eletromagnéticas. Essas mudanças influenciam o modelo estatístico e, por isso, os cálculos devem ser adequados às mudanças de localização da estação de uma área para outra área, ou ainda, alterar o esquema de amostragem. O efeito das mudanças aleatórias de cenário é denominado de variabilidade situação ( $Y_S$ ), sendo definido, em dB, a partir de uma distância de referência ( $D=100 \text{ km}$ ) e a distância efetiva entre as estações ( $d_e$ ):

$$Y_S = 5 + 3 \exp\left(\frac{-d_e}{D}\right) \quad (2.29)$$

Para determinação da atenuação em função da variabilidade de tempo ( $Y_T$ ) é necessário avaliar a Figura 2.7 a seguir, considerando a distância ( $d$ ) entre as estações e os valores correspondentes para a atenuação em cada tipo de clima proposto no modelo original [5].

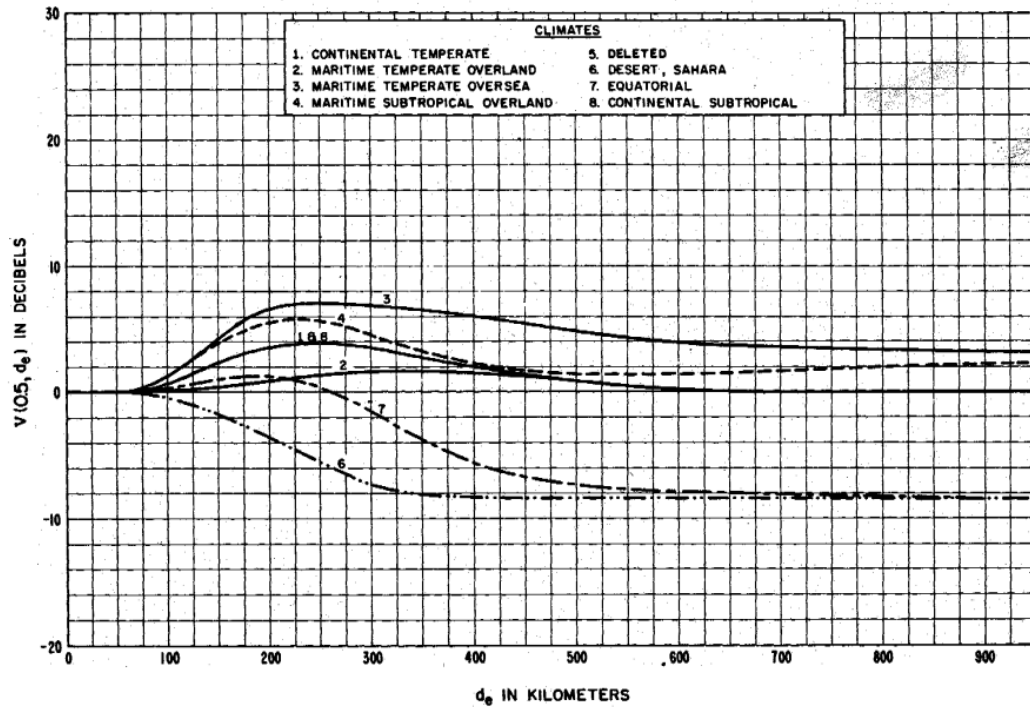


Figura 2.7: Variabilidade de Tempo [5]

Por fim, a análise da atenuação devida às variáveis de localização ( $Y_L$ ), situação ( $Y_S$ ) e tempo ( $Y_T$ ), somadas às atenuações de espaço livre ( $W_0$ ), linha-de-visada ( $A_{los}$ ), difração ( $A_{dif}$ ) e espalhamento ( $A_{es}$ ) permitem a compreensão do modelo Longley-Rice e a formulação de um modelo computacional que sirva de suporte às discussões sobre sua aplicabilidade em ambientes de clima tropical.

## 2.4 Contribuição ao Modelo Longley-Rice

De acordo com o modelo original proposto por Longley & Rice as características da superfície refrativa podem ser aproximadas e, no pior caso, foram tabeladas para determinação das perdas de propagação troposférica [5]. A superfície refrativa em função do clima regional foi definida na Tabela 2.4 e influencia diretamente nos resultados de predição utilizando o modelo Longley-Rice.

Contudo, em áreas de clima tropical, as mudanças atmosféricas de temperatura, pressão e umidade relativa do ar ocorrem com muita frequência e podem resultar em erros de predição consideráveis [30]. Estas mudanças ocorrem devido as constantes alterações no fluxo de massas de ar, umidade e incidência de raios solares mais intensas na superfície da Terra na região dos trópicos [28].

Segundo Ayoade [28], estas mudanças nos trópicos são constantes e difícil generalização, diferentemente do que ocorre nas regiões temperadas, isto é, onde o modelo Longley-Rice foi desenvolvido originalmente. Para corrigir esta deficiência para os trópicos, os valores tabelados pelo modelo podem ser alterados substituindo o valor da superfície refrativa  $N_S$  pela definição a seguir:

$$N_S = \frac{77,6}{T} + \left( P + \frac{4810E}{T} \right) \quad (2.30)$$

De acordo com a ITU-R P.453-8 [15], a superfície refrativa  $N_S$  pode ser obtida em função da temperatura ( $T$ ), pressão ( $P$ ) e vapor d'água ( $E$ ) na atmosfera. Estes dados podem ser obtidos junto aos órgãos de pesquisa meteorológica e inseridos manualmente no modelo Longley-Rice para maior precisão. Dessa maneira, evita-se a utilização de valores tabelados que referem-se ao pior caso para um cenário e, conseqüentemente, um erro de predição considerável [13].



## Capítulo 3

# Modelagem Computacional

Neste capítulo será descrito o procedimento realizado para modelagem computacional do modelo Longley-Rice na linguagem do *software* MatLab. O aplicativo desenvolvido foi editado de maneira que fosse possível reproduzir o modo ponto-a-ponto, facilitando a calibração e validação do modelo com as medidas de intensidade de campo existentes. Para tanto, inicialmente, é feita a descrição do algoritmo de desenvolvimento do aplicativo. Em seguida, a apresentação dos procedimentos de ensaios de calibração/predição e, por fim, a discussão dos resultados obtidos com a comparação entre a predição e medição da intensidade de campo de estações de rádio realizadas em Belo Horizonte.

### 3.1 Descrição do Algoritmo de Predição Longley-Rice

O aplicativo desenvolvido para predição de sinais radioelétricos utilizando o modelo Longley-Rice, modo ponto-a-ponto, utiliza o algoritmo descrito pela Figura 3.1 a seguir:

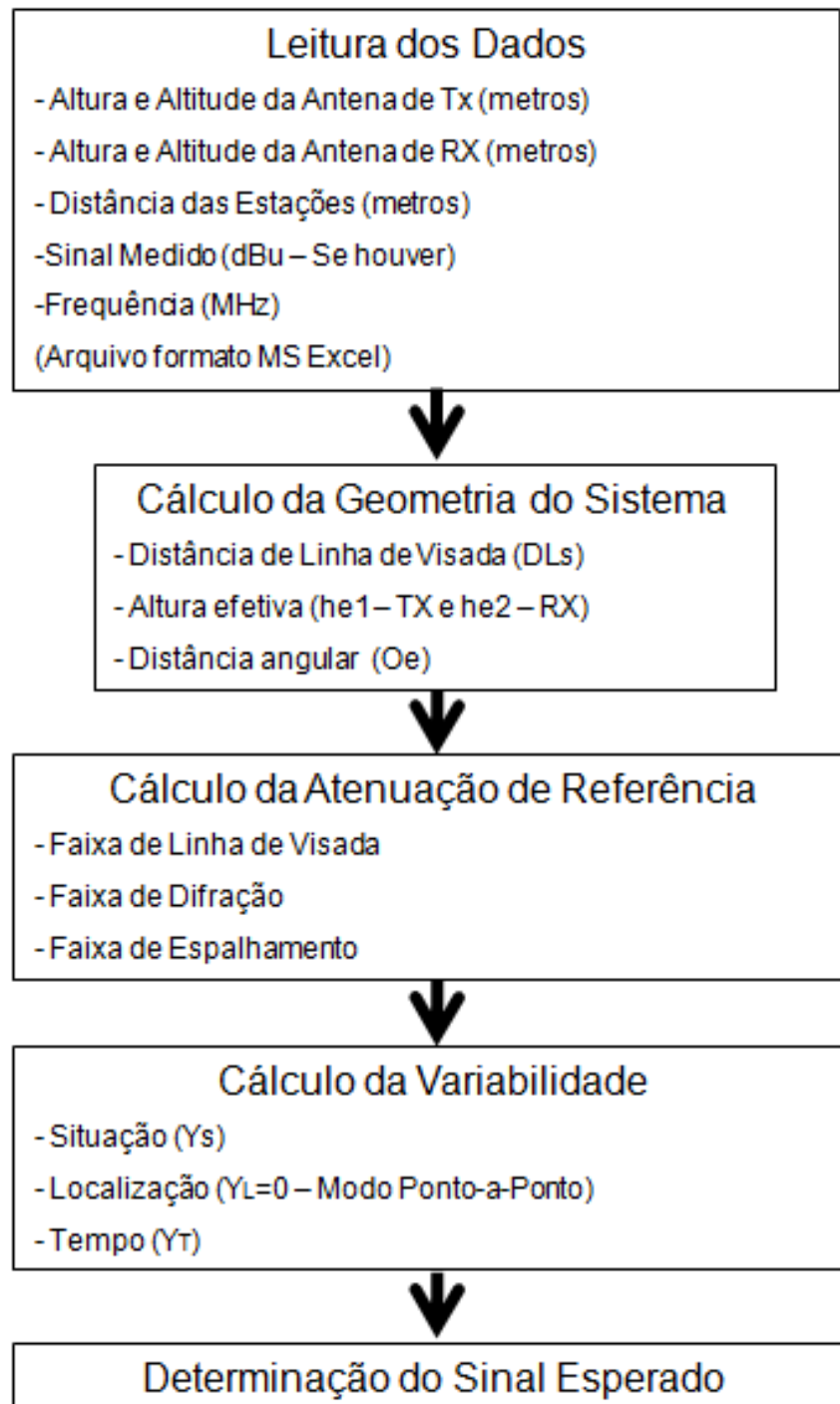


Figura 3.1: Algoritmo do Modelo Longley-Rice [11]

Ao iniciar o aplicativo é feita a leitura dos dados do ambiente cadastrado em um arquivo no formato Microsoft Excel (XLS). As linhas da tabela devem estar ordenadas de maneira crescente, em função da distância entre as estações, da menor para a maior, de maneira que seja possível prever o comportamento do sinal irradiado na medida em que a estação receptora se afasta da estação transmissora. Desse modo, o formato gráfico da previsão irá apresentar claramente as faixas de linha de visada, difração e espalhamento com um valor  $\Delta_h$  tabelado como sugere Longley & Rice [5]. Este arquivo digital deve ser criado respeitando as unidades descritas na Tabela 3.1.

Descrição	Unidade
Distância entre as Estações	kilômetros
Sinal Medido	$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
Elevação (Altitude) TX	metros
Elevação (Altitude) RX	metros
Altura da antena de TX	metros
Altura da antena de RX	metros
Potência de TX	dBk
Frequência	MHz

Tabela 3.1: Parâmetros de Entrada do Aplicativo [11]

Em seguida, o aplicativo realiza o cálculo da geometria do enlace de acordo com os parâmetros elencados no capítulo anterior para determinação das faixas de linha-de-visada, difração e espalhamento. Definidas essas distâncias, o aplicativo, utilizando um valor de  $\Delta_h$  tabelado, determina as atenuações de cada faixa em função da distância e irregularidade do terreno.

De acordo com o modelo Longley-Rice, também é necessário determinar a variabilidade inerente ao sistema de comunicação, por isso, o aplicativo recorre as variáveis encontradas anteriormente para determinação desses coeficientes. Ressalta-se que o usuário do aplicativo pode inserir manualmente os dados atmosféricos de temperatura, pressão, umidade relativa e vapor d'água na atmosfera para maior precisão dos resultados de previsão, diferentemente do modelo original que sugere valores tabelados.

Ao final, a intensidade de campo de um sinal piloto de 1kW ERP normalizado para 1km, em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  - unidade adotada pela TASSO/FCC, é atenuada pelo índice de referência encontrado e seus coeficientes de variabilidade. Este valor é plotado, em função da distância e comparado com os níveis de sinal medido.

Essa comparação só ocorre se estas medidas estiverem cadastradas na tabela de dados. O algoritmo do Modelo Longley-Rice (LRM) foi desenvolvido para ser executado no software MatLab e possui os arquivos descritos na Tabela 3.2 a seguir:

Arquivo	Descrição
Longley.m	Calcula a geometria do caminho e plota a predição
Atenua.m	Executa os cálculos das faixas de atenuação
Delta.m	Executa o cálculo da irregularidade do terreno
Scat.m	Executa o cálculo da atenuação da faixa de espalhamento
Fdn.m	Arquivo auxiliar para o cálculo da faixa de espalhamento

Tabela 3.2: Arquivos do aplicativo LRM [11]

## 3.2 Ensaios de Validação

Os ensaios de validação foram realizados com aproximações numéricas conforme proposição de Hufford [12] e valores tabelados no modelo original. Tais aproximações não comprometem a precisão do aplicativo [22], que foi exaustivamente testado com medições de campo da TASO/FCC dos Estados Unidos para sua aferição. Além disso, os arquivos do aplicativo desenvolvido neste trabalho foram editados de maneira que cada linha de comando esteja referenciada no corpo do texto da linguagem computacional, proporcionando agilidade para auditoria, revisão e/ou manutenção.

Neste sentido, a Figura 3.2, a seguir, apresenta um exemplo desses ensaios de validação. Para tanto, a linha na cor azul apresenta valores medidos pelo TASO/FCC, em 1960, na cidade de Baltimore, nos Estados Unidos, na faixa de 200 MHz. A linha na cor vermelha apresenta os valores do sinal previsto para o mesmo caminho utilizando o aplicativo desenvolvido neste trabalho.

O modelo de perfil topográfico também foi observado no caminho entre a estação base e a estação de teste no ensaio realizado pelo TASO/FCC. Nesta modelagem foi utilizado o parâmetro de irregularidade do terreno  $\Delta_h$  com valor de 150 m, que corresponde a variação da altimetria do terreno ao longo do caminho avaliado (Figura 3.3).

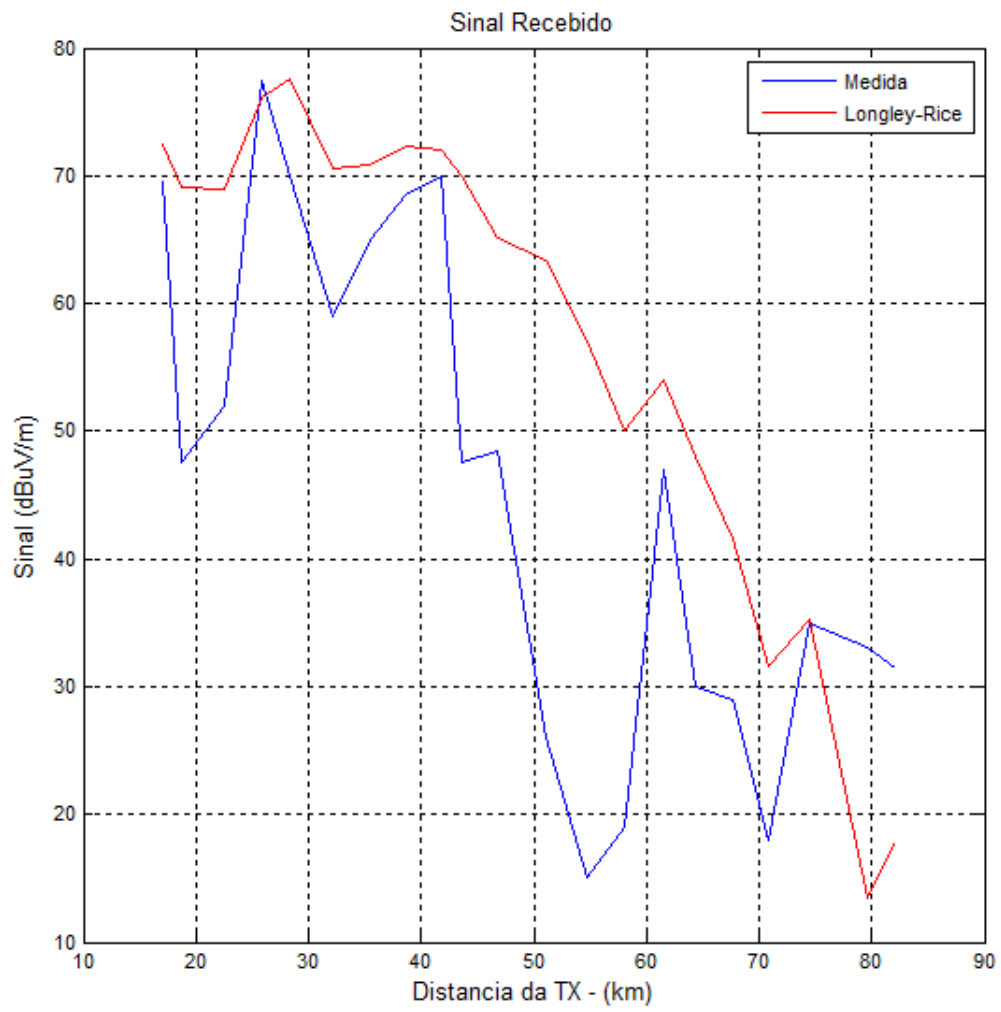


Figura 3.2: Validação com dados de Baltimore/EUA (200 MHz) -  $\Delta_h=150$  [4]

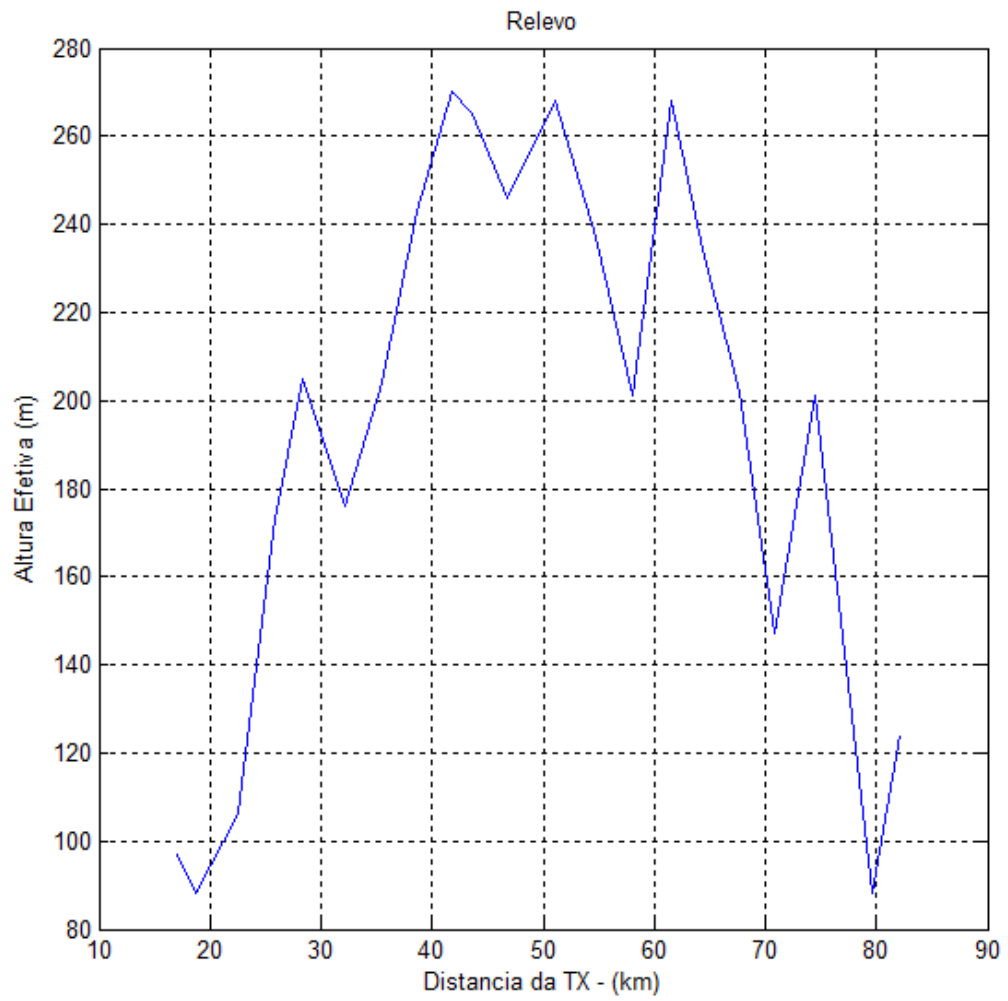


Figura 3.3: Perfil Topográfico de Baltimore/EUA [4]

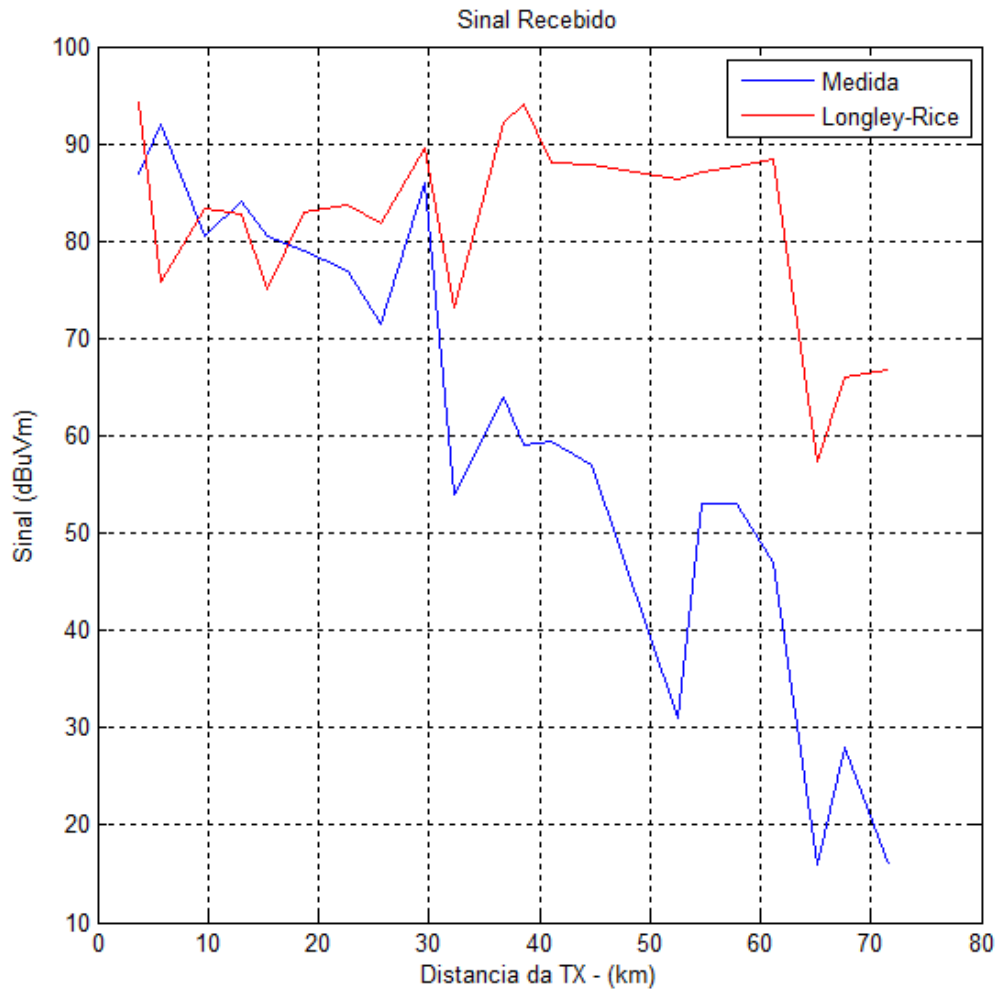


Figura 3.4: Validação com dados de Springfield/EUA (90 MHz) -  $\Delta h=50$  [4]

A Figura 3.4 apresenta a modelagem para a cidade Springfield, nos Estados Unidos, para a faixa de 90 MHz. Estes dados também foram disponibilizados pelo TASSO/FCC e apresentam grandes obstáculos no terreno avaliados para predição no modelo Longley-Rice. Para corrigir este problema, o valor da irregularidade do terreno foi alterado manualmente de  $\Delta h=50$  para  $\Delta h=250$  (Figura 3.5). A implementação de um valor de  $\Delta h$  variável automaticamente para cada perfil exige maior complexidade computacional, e por isso, não foi utilizado neste trabalho [19].

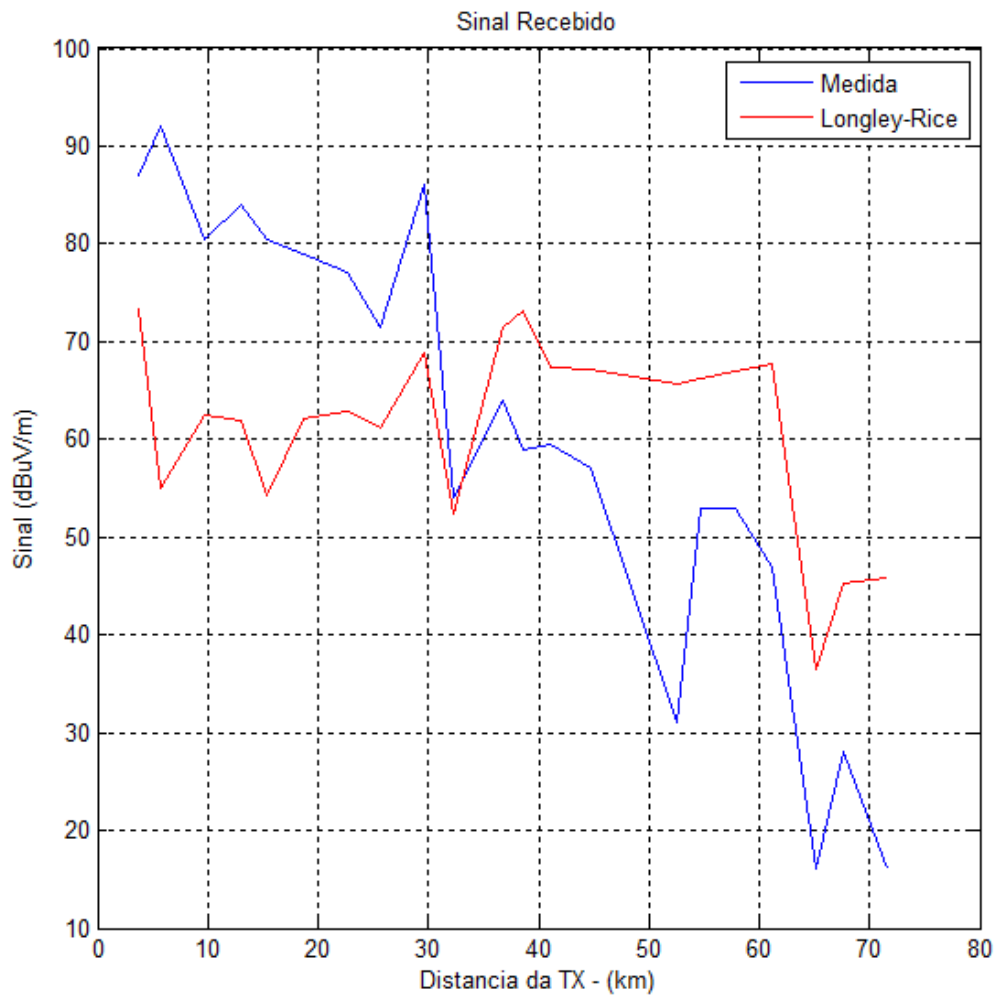


Figura 3.5: Validação com dados de Springfield/EUA (90 MHz) -  $\Delta h=250$  [4]



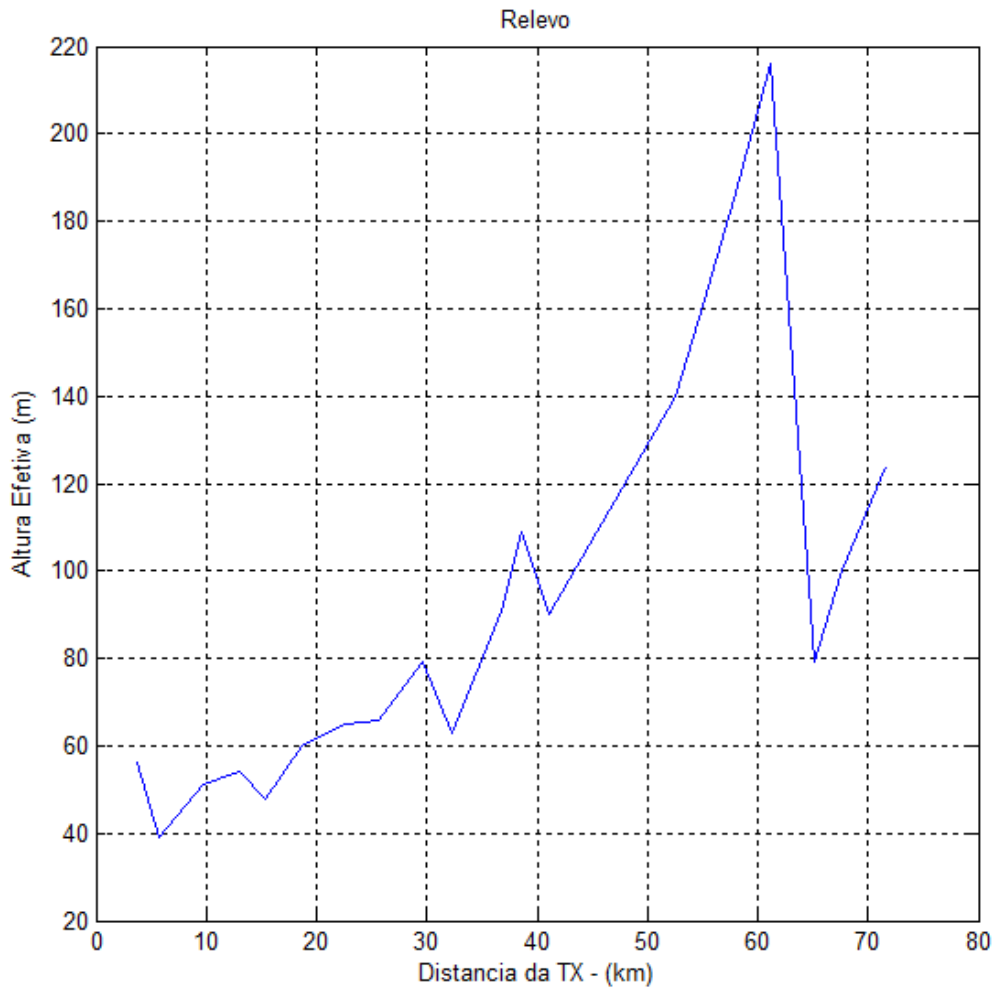


Figura 3.6: Perfil Topográfico de Springfield [4]

Conforme observado na Figura 3.6, em torno de 60 km de distância da estação base, o perfil topográfico apresenta um obstáculo muito elevado em relação aos demais obstáculos ao longo do caminho entre a estação base e a estação de teste. Nesta modelagem foi utilizado o parâmetro de rugosidade do terreno ( $\Delta h$ ) com valor de 50 m, que corresponde a variação da altimetria do terreno ao longo do caminho avaliado na faixa de linha de visada. Entretanto, na medida que o terreno é modificado e surge um obstáculo muito expressivo, a predição apresenta um desvio muito grande em relação ao sinal medido. Nesse caso, é necessário alterar o parâmetro de rugosidade do terreno ( $\Delta h$ ) para um valor mais significativo. Considerando um valor de 250 metros, observa-se maior precisão do aplicativo.

Cabe ressaltar que os ensaios realizados pelo aplicativo desenvolvido neste trabalho consideram os valores sugeridos por Hufford [11] para execução no modo ponto-a-ponto. Entretanto, algumas particularidades dos ensaios realizados pelo TASO/FCC não foram consideradas, tais como índice de refatividade diferente de 301 N-unidades, condutividade do terreno, entre outros parâmetros que não foram disponibilizados por aquele órgão e que podem contribuir para o erro de predição. Por isso, neste teste, foram utilizados valores tabelados do modelo que referem-se ao pior caso para cada cenário.

A Figura 3.7 apresenta os resultados do ensaio de validação para a cidade de Philadelphia, nos Estados Unidos. Neste caso, de acordo com o TASO/FCC, e testes realizados 1958, a emissora base irradiava um sinal piloto na faixa de 90 MHz. O perfil topográfico do caminho também apresenta irregularidades relevantes, entretanto, as variações do perfil não ocorrem de maneira acentuada tal como ocorreu no percurso do ensaio realizado em Springfield/EUA. Dessa maneira, é possível observar maior precisão no modelo Longley-Rice.

Outro aspecto relevante do modelo Longley-Rice está relacionado com a contribuição de grandes obstáculos em ambientes urbanos (Figura 3.8). A Figura 3.9, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de calibração para a cidade de Nova Iorque, nos Estados Unidos. Trata-se de um ambiente urbano e, conforme previsto no capítulo anterior, o comportamento do sinal modelado apresentou erro de predição maior que nos casos anteriores. Para comparação nesta figura, também foi incluído o modelo de predição Hata, o qual possui fácil implementação computacional e pode servir de referência para comparação neste cenário urbano [3].

De acordo com o TASO/FCC, a emissora base irradiava o sinal piloto na faixa de 600 MHz, com altura efetiva de 415 metros. A altura efetiva, isto é, a altura da estrutura considerando a elevação do terreno para a estação de teste era de até 50 metros para a distância de até 50 km da estação base. O perfil topográfico do caminho também apresenta irregularidades relevantes, entretanto, as variações do sinal previsto em até 40 km de distância da estação base estão relacionadas com o efeito do ambiente urbano para a faixa de 600 MHz.

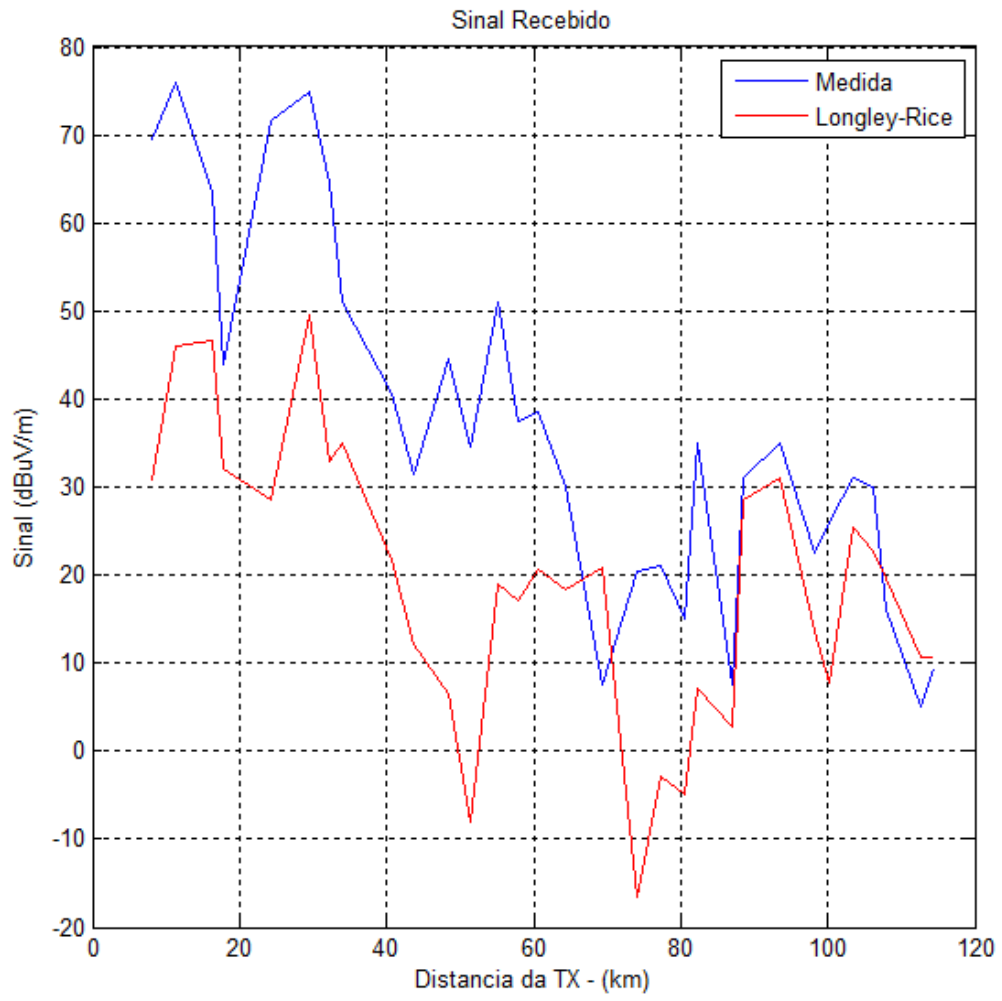


Figura 3.7: Validação com dados de Philadelphia/EUA (90 MHz) -  $\Delta_h=250$  [4]

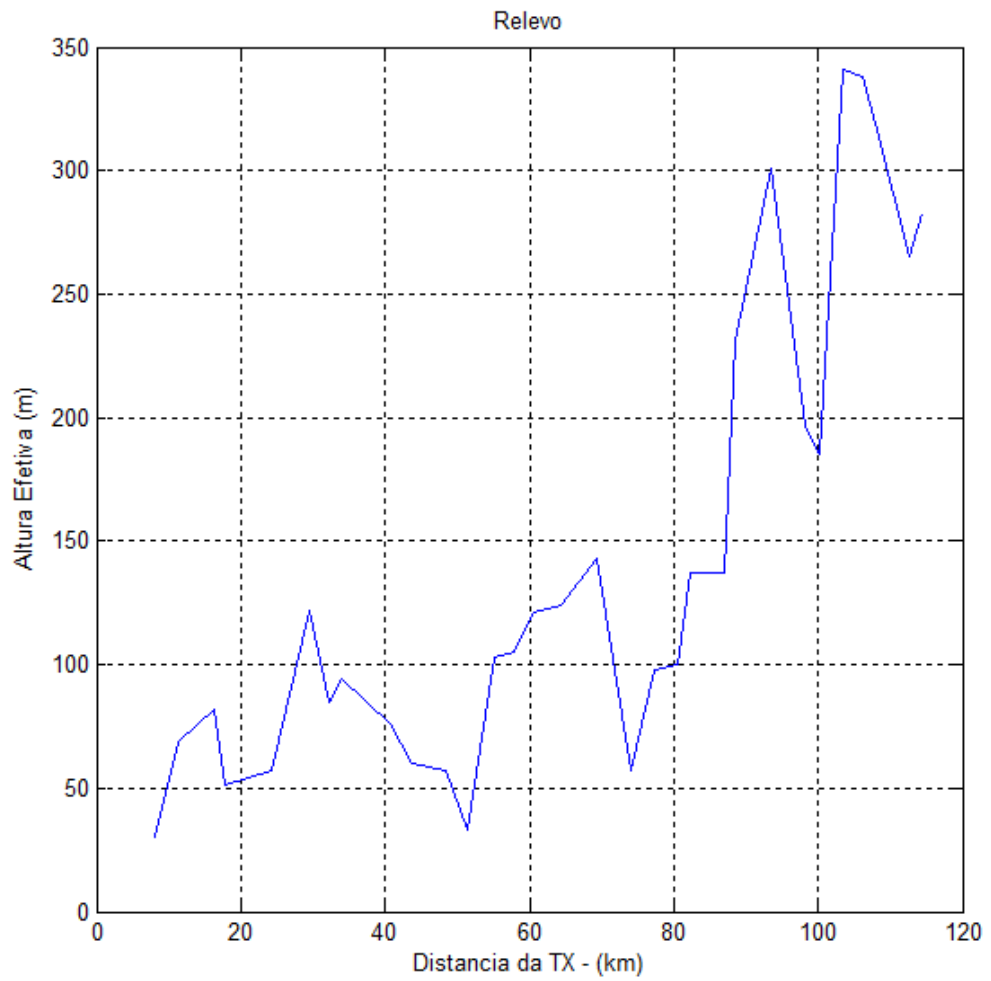


Figura 3.8: Perfil Topográfico Philadelphia [4]

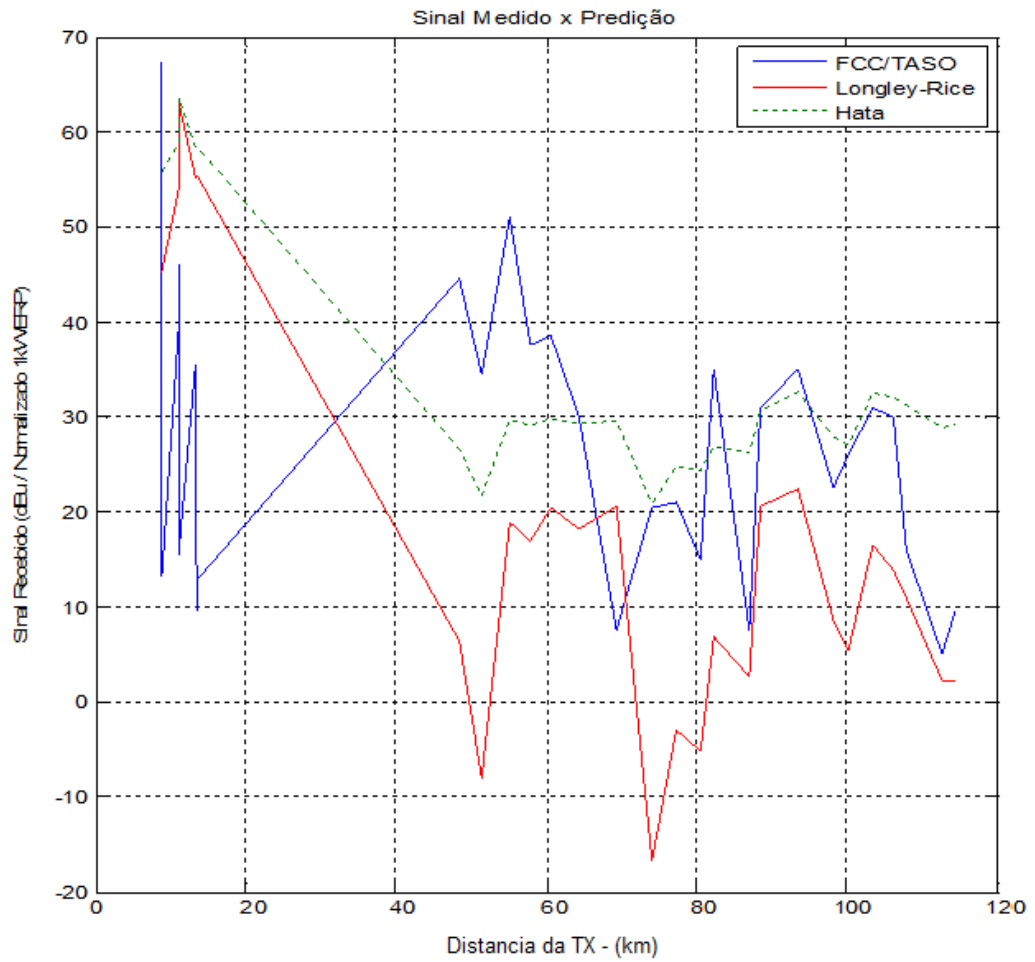


Figura 3.9: Validação com dados de Nova Iorque/EUA (600 MHz) -  $\Delta h=50$  [4]

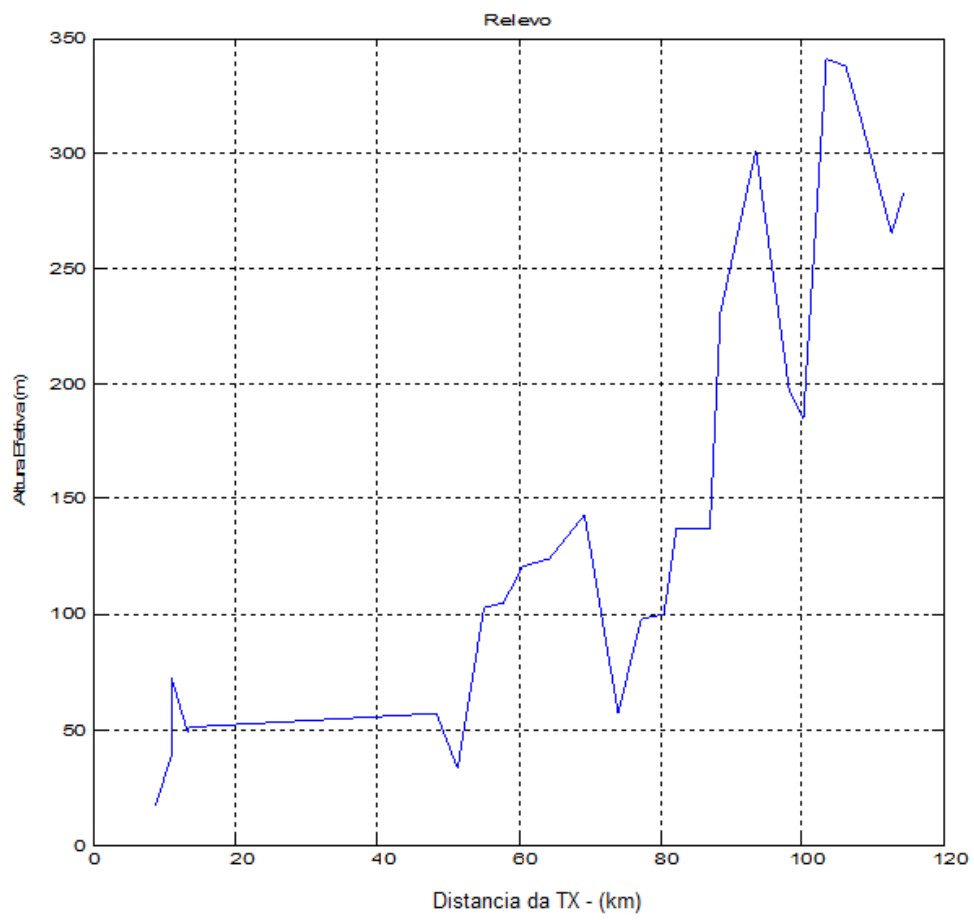


Figura 3.10: Perfil Topográfico de Nova Iorque [4]

Verifica-se ainda que a obstrução total do caminho por edificações muda as características do canal, deixando de ser um canal de rádio com características de distribuição Rice e assumindo características de um canal de rádio com distribuição Rayleigh. Essa mudança de característica estatística do canal contribui com o erro de predição do sinal modelado, não sendo possível considerá-lo no modelo original que adota a distribuição Rice.

Além disso, no caso do ensaio realizado para a cidade de Nova Iorque, as estações de teste operavam na faixa de 600 MHz, acentuando o efeito de multi-encaminhamento e reflexão do sinal no ambiente urbano. Nessa análise, para predição em áreas urbanas, Longley [6] sugere a inserção de um fator urbano (UF - sigla em inglês) definido como:

$$UF = 16,5 + 15 \log \frac{f}{100} - 0,12d \quad (3.1)$$

O fator urbano é um coeficiente de atenuação dado em dB, o qual tem relação direta com a frequência (f - MHz) e a distância (d - km). No aplicativo desenvolvido neste trabalho ele foi considerado para os ensaios de calibração. Ainda assim, ressalta-se que nas medições realizadas em Nova Iorque pelo TASO/FCC, a antena transmissora apresentava inclinação de 20° (vertical), característica que não foi considerada na modelagem do aplicativo desenvolvido para este trabalho devido a sua complexidade de implementação no modelo Longley-Rice (modo ponto-a-ponto), mas que tem relevante significância para o ensaio de predição. Além deste parâmetro, outras características do ensaio não foram disponibilizadas para avaliação, dentre essas, a condutividade e permissividade elétrica do meio, temperatura e umidade relativa, entre outros fatores que podem influenciar na predição no modelo Longley-Rice. Por isso, para os testes realizados, foram utilizados os valores tabelados no modelo original.

Por fim, para validação final do modelo, foi reproduzido o ensaio realizado por Ertük, em 2005, em um perfil de Cinarkoy, Turquia [23]. No trabalho de Ertük é possível obter informações detalhadas sobre uma campanha de medidas radioelétricas para a faixa de 200 MHz, utilizando um transmissor de 10 Watts em um terreno conhecido na Turquia. Os dados originais deste ensaio foram enviados por Ertük para validação do aplicativo desenvolvido neste trabalho. Para tanto, também foram utilizados dados tabelados no modelo Longley-Rice para a realização destes testes (Figuras 3.11 e 3.12)

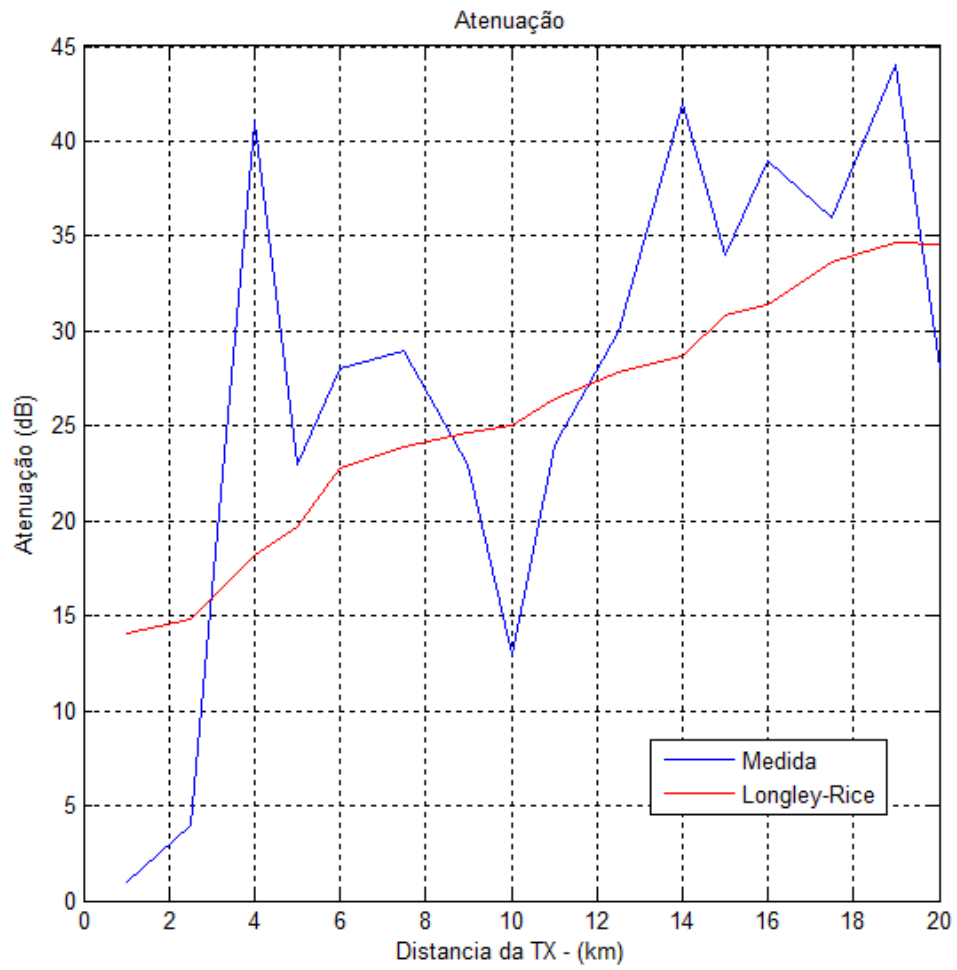


Figura 3.11: Validação com dados de Cinarkoy/Turquia (200 MHz) -  $\Delta h=50$  [23]



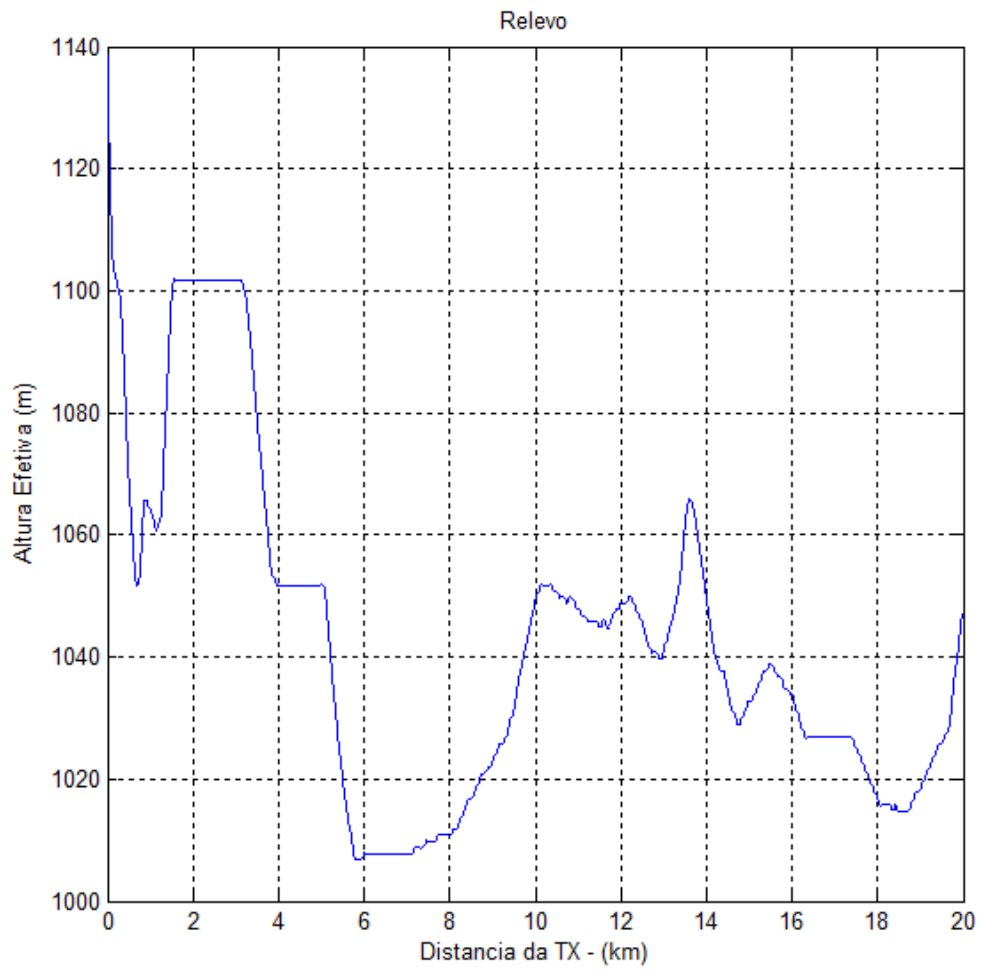


Figura 3.12: Perfil Topográfico Cinarkoy/Turquia [23]

O erro de predição com maior desvio foi observado para uma distância curta, de até 3 km do transmissor, não sendo significativa em termos de radiodifusão e televisão, que almeja grandes áreas de cobertura para comunicação unidirecional. Ademais, os resultados apresentaram-se satisfatórios para a predição da atenuação em distâncias mais longas. A discussão acerca desta limitação também foi sugerida por Longley & Rice [5], entretanto, não é de interesse neste trabalho, uma vez que se trata de um modelo para previsão de cobertura de radiodifusão e televisão em médias e longas distâncias.

### 3.3 Ensaios de Predição em Áreas de Clima Tropical

#### 3.3.1 Ensaio em Belo Horizonte

Para os ensaios de predição em áreas de clima tropical foram utilizados dados de medidas radioelétricas da campanha de testes de rádio digital realizada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e apoio do Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética (GAPTEM) em 2010 [26]. Estes dados foram utilizados para a análise do sinal de rádio digital da Rádio Educativa UFMG (104,5 MHz).

A Rádio UFMG é uma emissora de caráter educativo da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com equipamentos de transmissão localizados no município de Contagem, na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Para estes testes, a emissora operou com transmissores digitais e potência de 42,42 EIRP (W) na frequência de 104,5 MHz. A localização geográfica e altitude dos pontos de transmissão e medição também foram coletados e armazenados digitalmente. Os testes ocorreram com equipamentos *Digital Radio Mondiale* (DRM), de 29 de janeiro de 2010 à 05 de fevereiro de 2010. A descrição detalhada destes testes pode ser obtida em relatório técnico publicado pelo INMETRO [26]. As Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 apresentam o sistema de busca dos dados atmosféricos para inserção no aplicativo com o Modelo Longley-Rice (LRM): temperatura (24°C) e umidade relativa do ar (75%).

Antena de transmissão utilizada foi do tipo Anel-FM, 1 elemento, com ganho de -1,3 dBi instalada em uma torre de 19 metros no sítio de Contagem. Para recepção, foi utilizada antena omnidirecional, com ganho de 0 dB, com altura de 1,5 metro. Estes dados foram consolidados pelo GAPTEM em relatório e posteriormente encaminhado à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). As Figuras 3.16 e 3.17 apresentam o percurso de medidas e perfil topográfico respectivamente.

**BRASIL**

**INMET** 100 anos de meteorologia no Brasil  
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA

Home Prev. do Tempo Observações Agrometeorologia Prev. Climática Clima Rede de Estações Prod. Especiais

**CLIMA**

**CLIMATOLOGIA**

- Normais Climatológicas
- Gráficos Climatológicos
- Mapas de Condições Registradas
- Distribuições de Probabilidade
- Faixa Normal da Precipitação Trimestral

**MONITORAMENTO CLIMÁTICO**

- Quantis
- Desvio de Chuva (Mensal)
- Desvio de Chuva (Trimestral)
- SPI (Índice Padronizado)

**Mapas de Condições Registradas** Sobre o Produto

**Data:** 16/04/2012

**Hora (UTC):** 00

Mostrar Mapas Sinóticos

Limpa

**Parâmetros Meteorológicos**

- Mostrar todos os Mapas
- Temperatura do Ar (°C) (bulbo seco)
- Temperatura Máxima (°C)\*
- Temperatura Mínima (°C)\*\*
- Umidade Relativa do Ar (%)
- Chuva Acumulada (mm) nas últimas 24h\*\*

OBS: Os Mapas de Condições Registradas estão disponíveis a partir de 06 de Agosto de 2003.  
\* Disponível somente para as 00 UTC.  
\*\* Disponível somente para as 12 UTC.

Figura 3.13: Busca de dados atmosféricos em Belo Horizonte no período de medição (01/02/2010) [27]

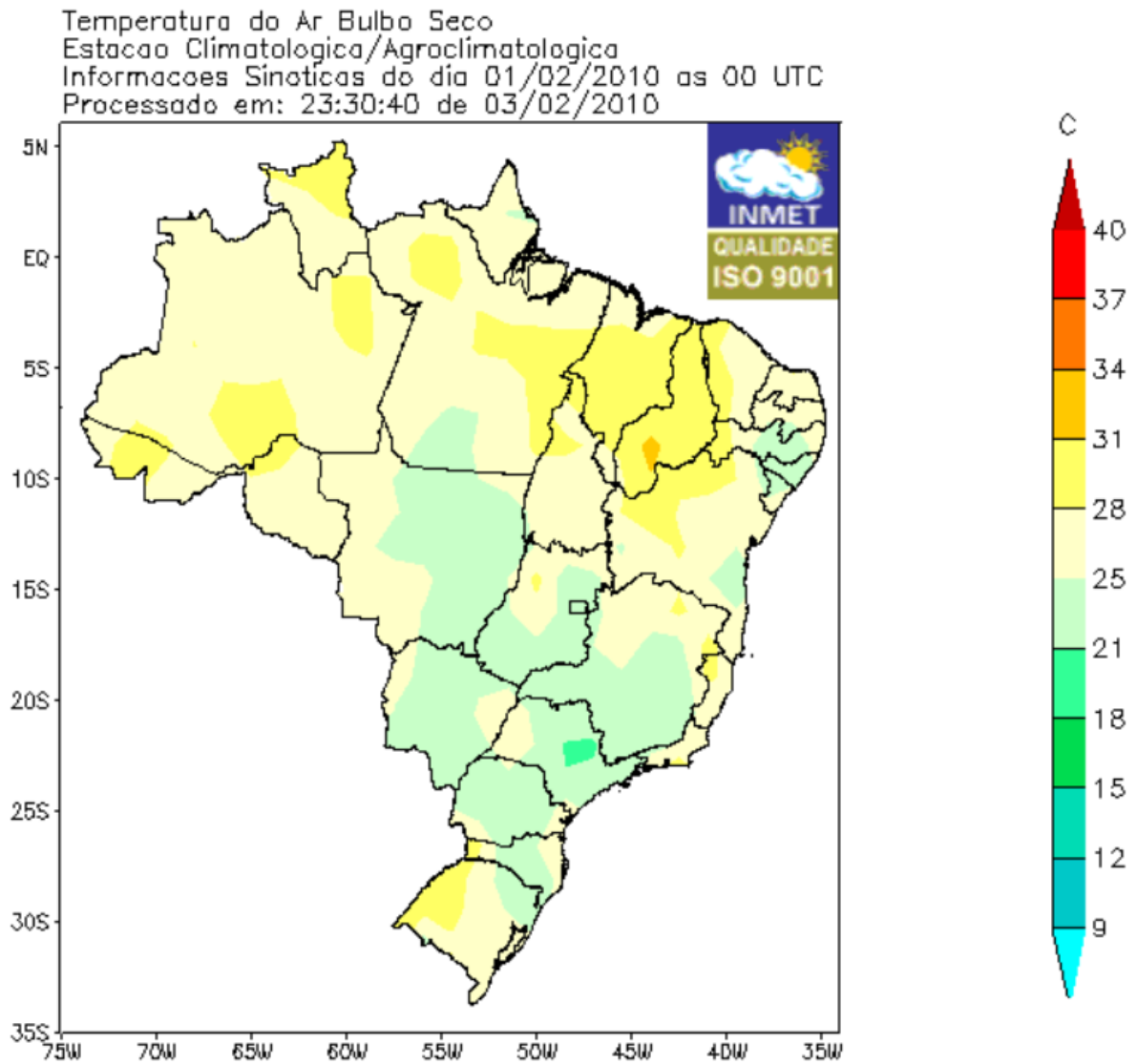


Figura 3.14: Características da Temperatura em Belo Horizonte no período de medição (01/02/2010) [27]

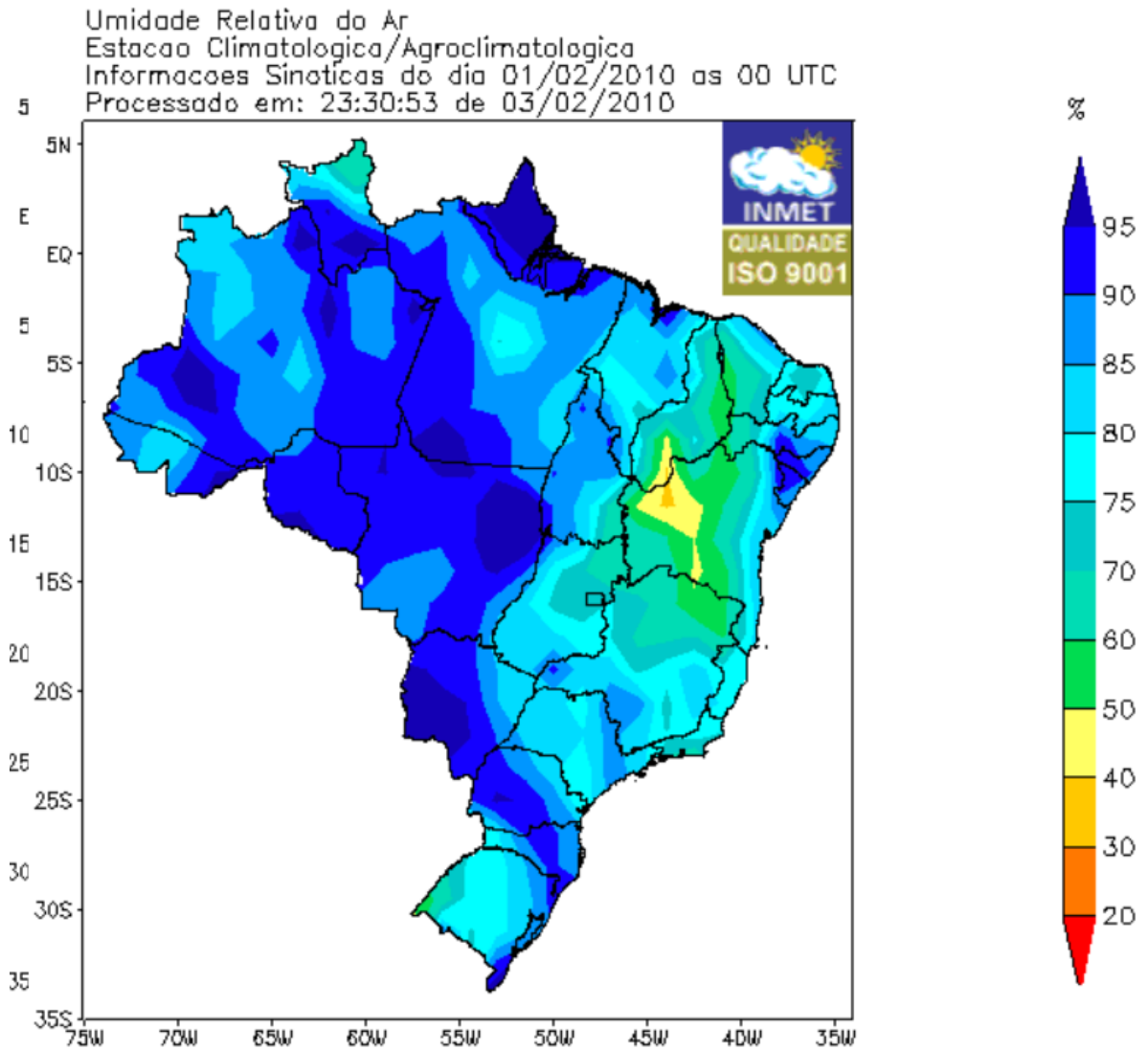


Figura 3.15: Características da Umidade Relativa em Belo Horizonte no período de medição (01/02/2010)[27]

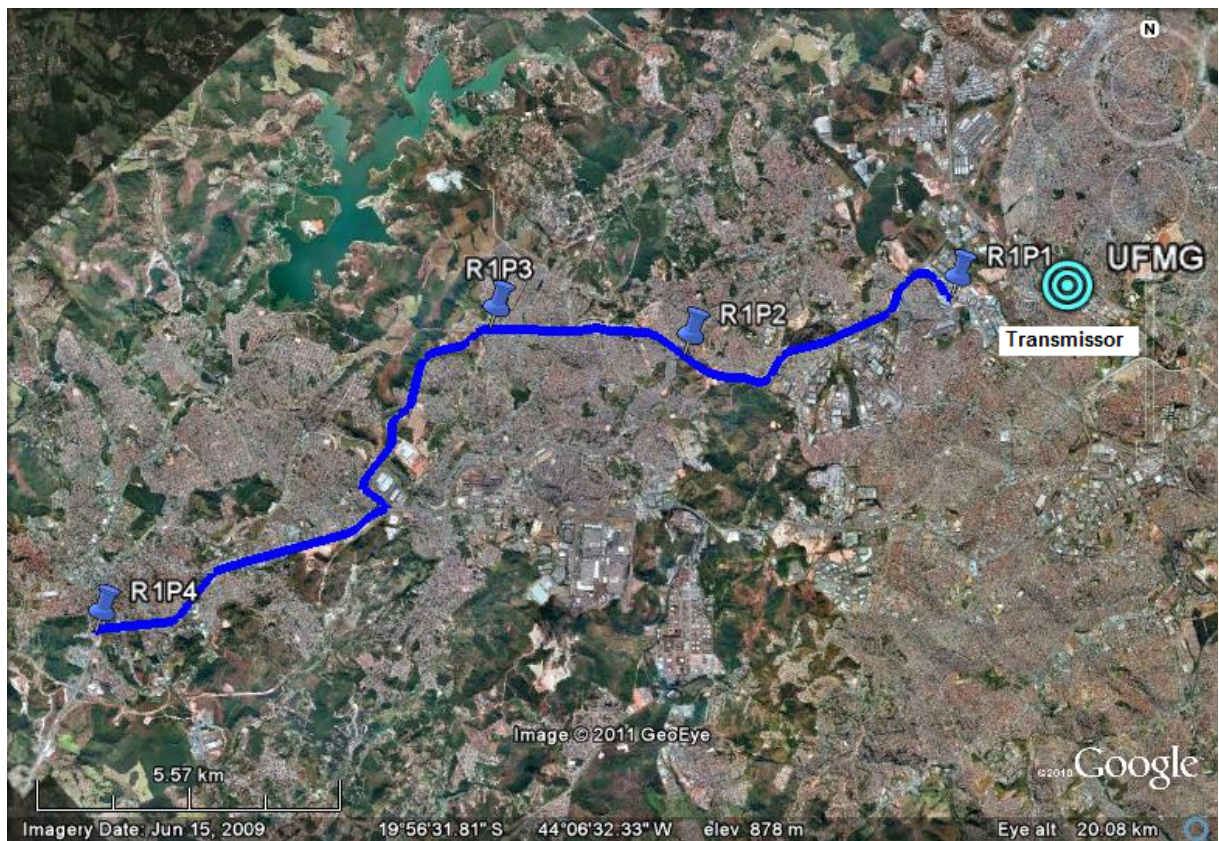


Figura 3.16: Percurso de medidas radioelétricas em Belo Horizonte [24]

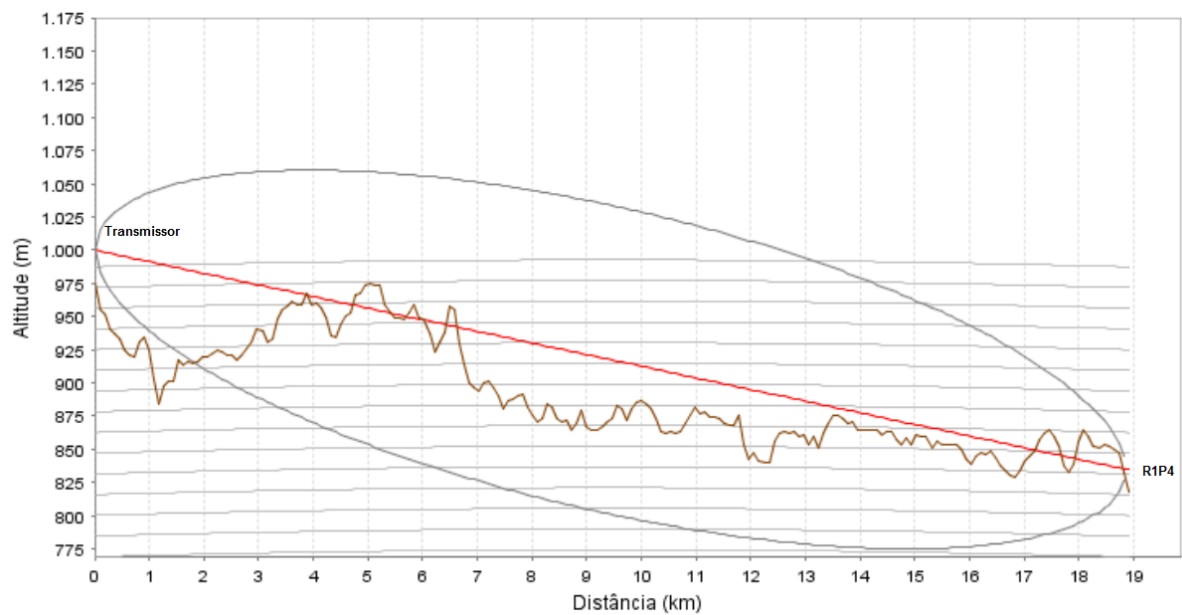


Figura 3.17: Relevo do percurso de medidas radioelétricas em Belo Horizonte [24]

Coordenadas	Distância (km)	Sinal Recebido ( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ )
19°55'16.59"S 44° 2'58.94"W	2,07	61
19°55'51.02"S 44° 5'47.52"W	7,09	27
19°55'34.54"S 44° 7'49.87"W	10,55	22
19°58'35.15"S 44°11'59.52"W	18,55	16

Tabela 3.3: Resultados das medidas radioelétricas da Rádio UFMG em Belo Horizonte (104,5 MHz) [26]

Comparando as medidas radioelétricas realizadas para determinação da área de cobertura da Rádio Educativa (104,5 MHz) e o sinal previsto pelo LRM é possível observar o maior desvio na atenuação do sinal para a distância de 2 km. Trata-se de um erro esperado, uma vez que o modelo Longley-Rice não é recomendado para distâncias com essa dimensão. Entretanto, a comparação entre os pontos distantes 7,09, 10,55 e 18,55 km apresentaram resultados bastante satisfatórios, devido ao pequeno desvio na atenuação medida e calculada pelo aplicativo desenvolvido (Figura 3.18).

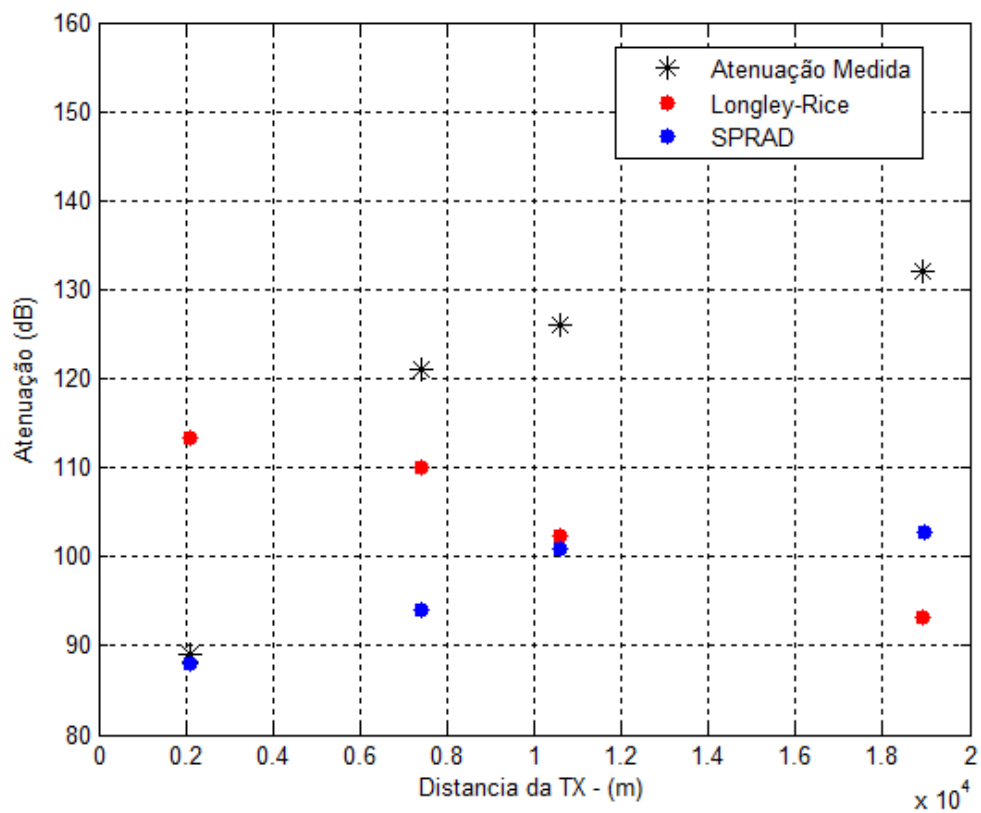


Figura 3.18: Comparativo dos resultados LRM ( $\Delta_h=150$ ) e SPRad [24]

Estes resultados também foram comparados ao modelo de propagação ITU-1546 [16] disponibilizado pelo aplicativo SPRad desenvolvido pelo GAPTEM/UFMG [25]. Neste aplicativo também foram inseridos os dados do relevo e do sistema de RF analisados. Os resultados obtidos podem ser avaliados a seguir. Estes dados apresentam a relação entre os valores de atenuação medidos e calculados pelo SPRad e LRM. É possível observar proximidade entre os dados medidos e calculados para a atenuação (Figura 3.19):

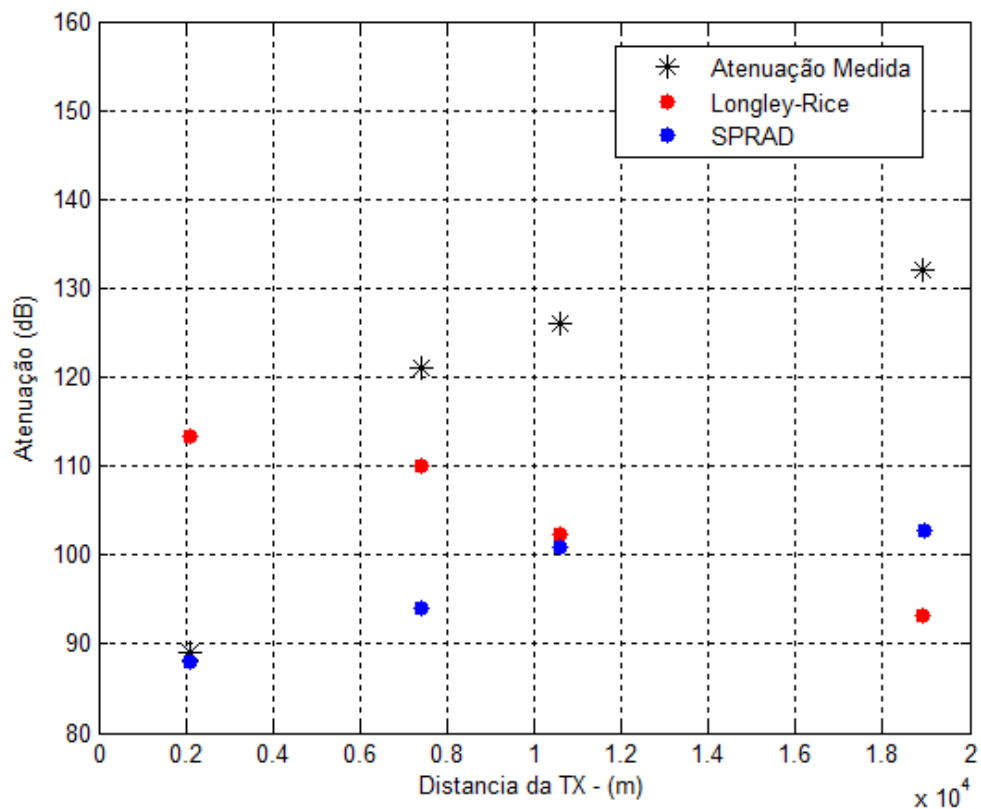


Figura 3.19: Comparativo dos resultados LRM e SPRad [24]

### 3.3.2 Ensaio em Brasília

Neste estudo também foi realizada predição para cobertura de sinais radioelétricos na cidade de Brasília. Para tanto, foram utilizados dados de medidas realizadas por Marco A. S. Mayrink [29]. As Figuras 3.20 e 3.21 apresentam os dados atmosféricos para inserção no aplicativo com o Modelo Longley-Rice (LRM): temperatura (25°C) e umidade relativa do ar (80%).



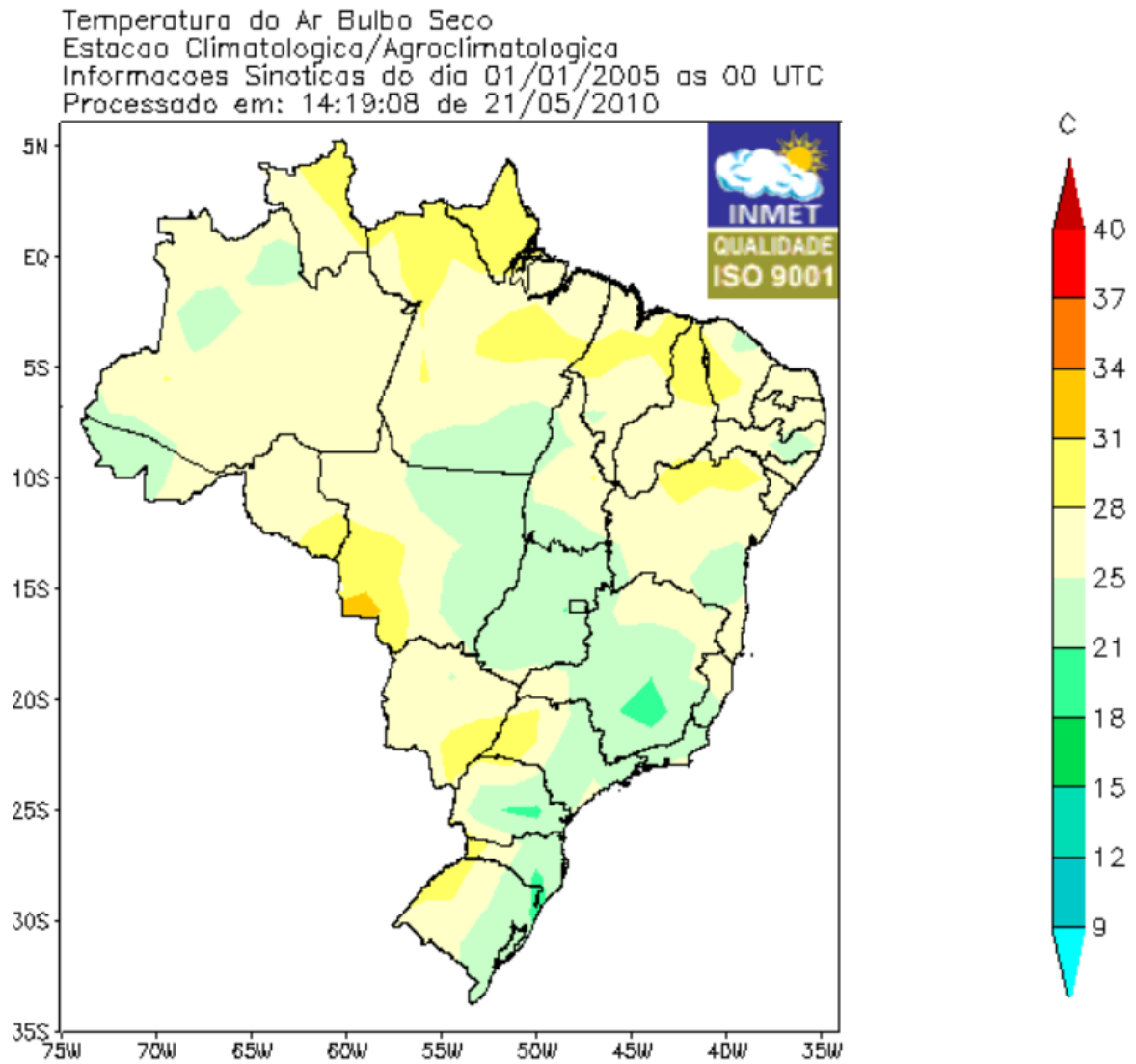


Figura 3.20: Características da Temperatura em Brasília no período de medição (01/01/2005)[27]

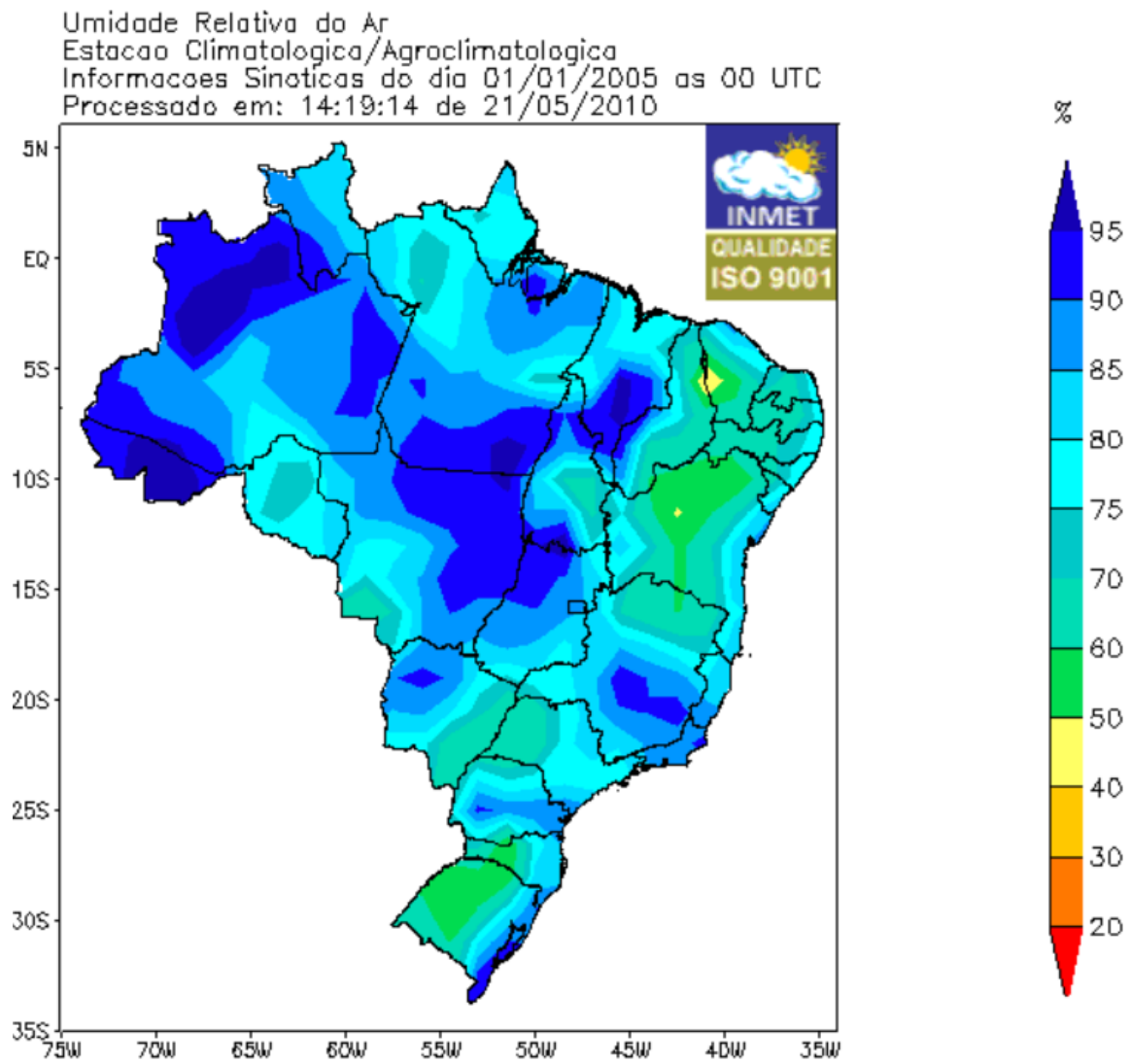


Figura 3.21: Características da Umidade Relativa em Brasília no período de medição (01/01/2005)[27]

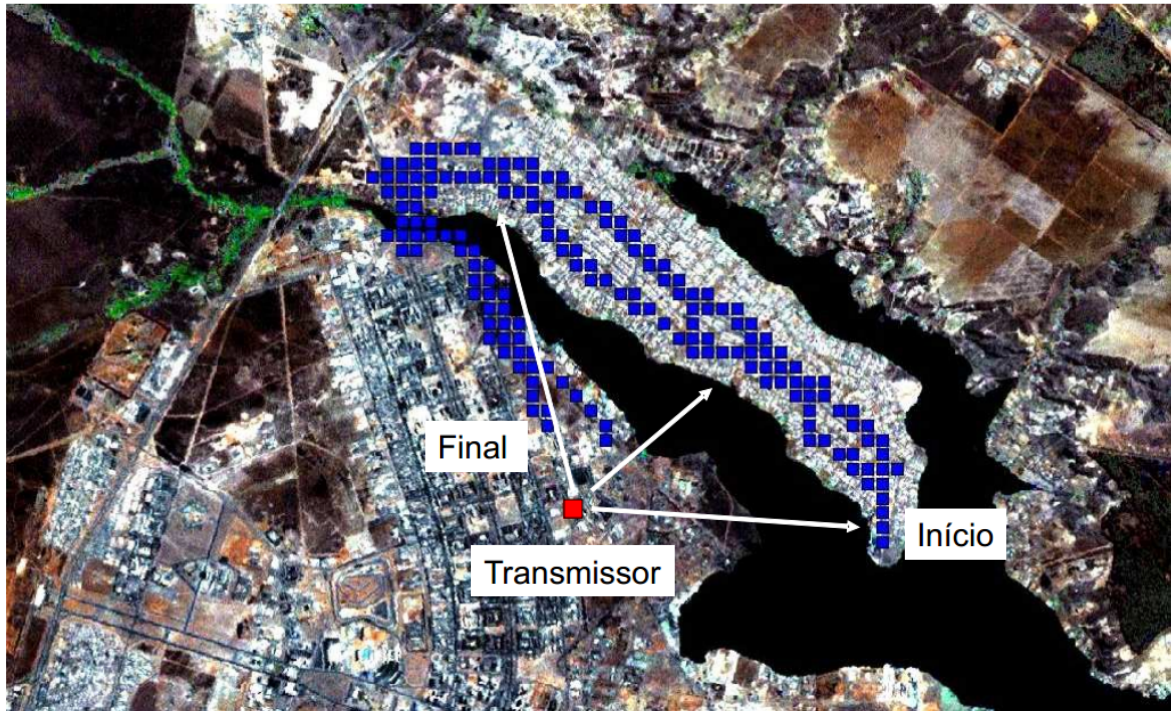


Figura 3.22: Percurso de medidas radioelétricas em Brasília (pontos de medida na cor azul) [29]

Os ensaios de Mayrink [29] foram realizados a partir da emissão de ondas contínuas (CW), com potência de 100 W, irradiados por uma antena omnidirecional, com ganho de 3 dB na faixa de 856 MHz na cidade Brasília. A antena transmissora estava localizada a uma altura de 30 metros e a antena receptora 1,5 metros do solo. Este percurso pode ser avaliado na Figura 3.22 e detalhado o relevo nas Figuras 3.23 e 3.24.

A localização geográfica e altitude dos pontos de transmissão e medição também foram coletados e armazenados digitalmente. A descrição dos testes e sua respectiva metodologia também foram publicados detalhadamente pelo GAPTEM [24].

Neste ensaio também foi possível observar que os resultados obtidos para um  $\Delta_h=50$  com o aplicativo LRM para cobertura de sinais radioelétricos na cidade de Brasília são satisfatórios, uma vez que os resultados da predição encontram-se muito próximos aos resultados das medidas da atenuação obtidos. Esta análise pode ser avaliada na Figura 3.25, que apresenta uma atenuação média de 136 dB.

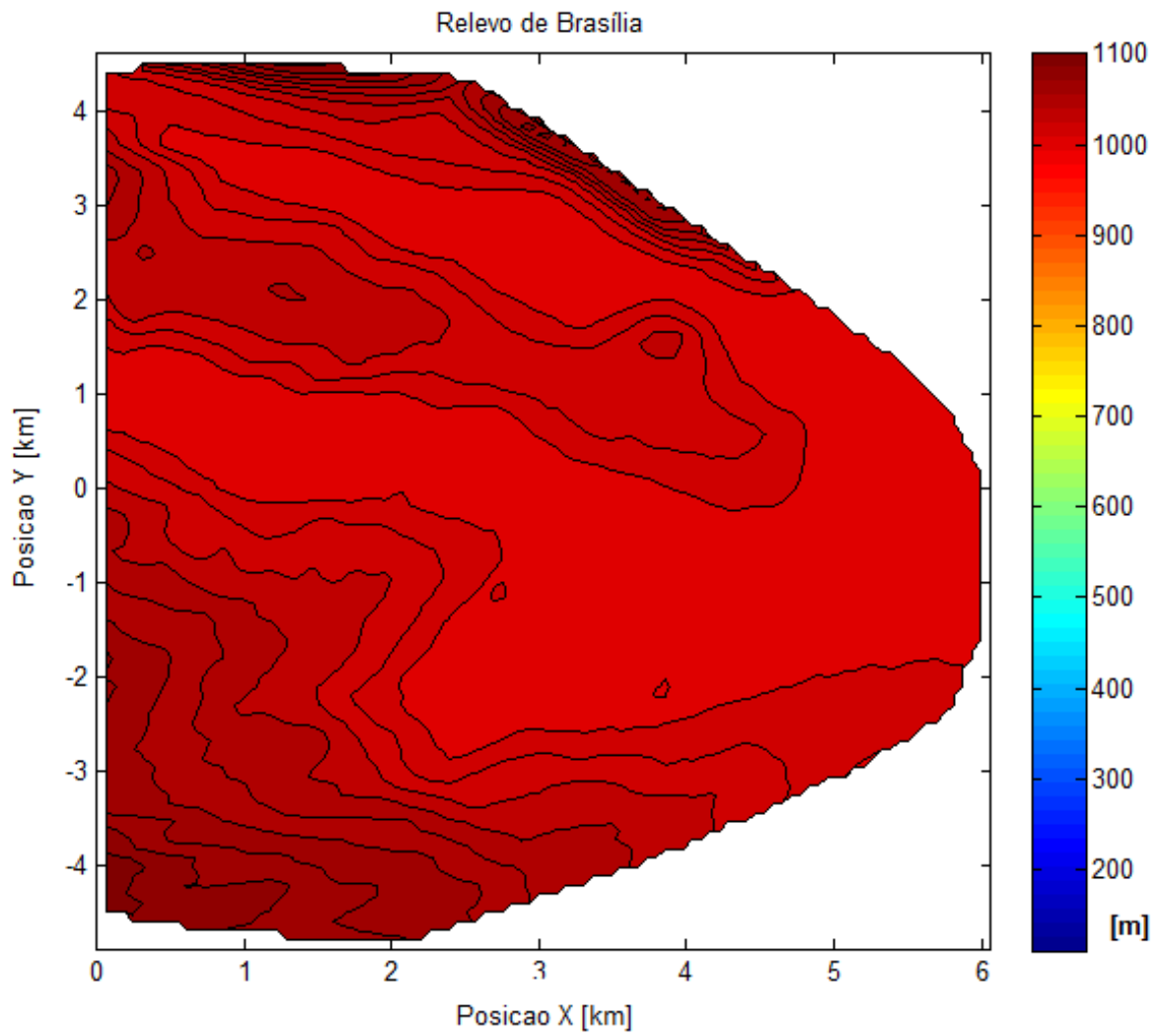


Figura 3.23: Relevo do percurso de medidas radioelétricas em Brasília [29]

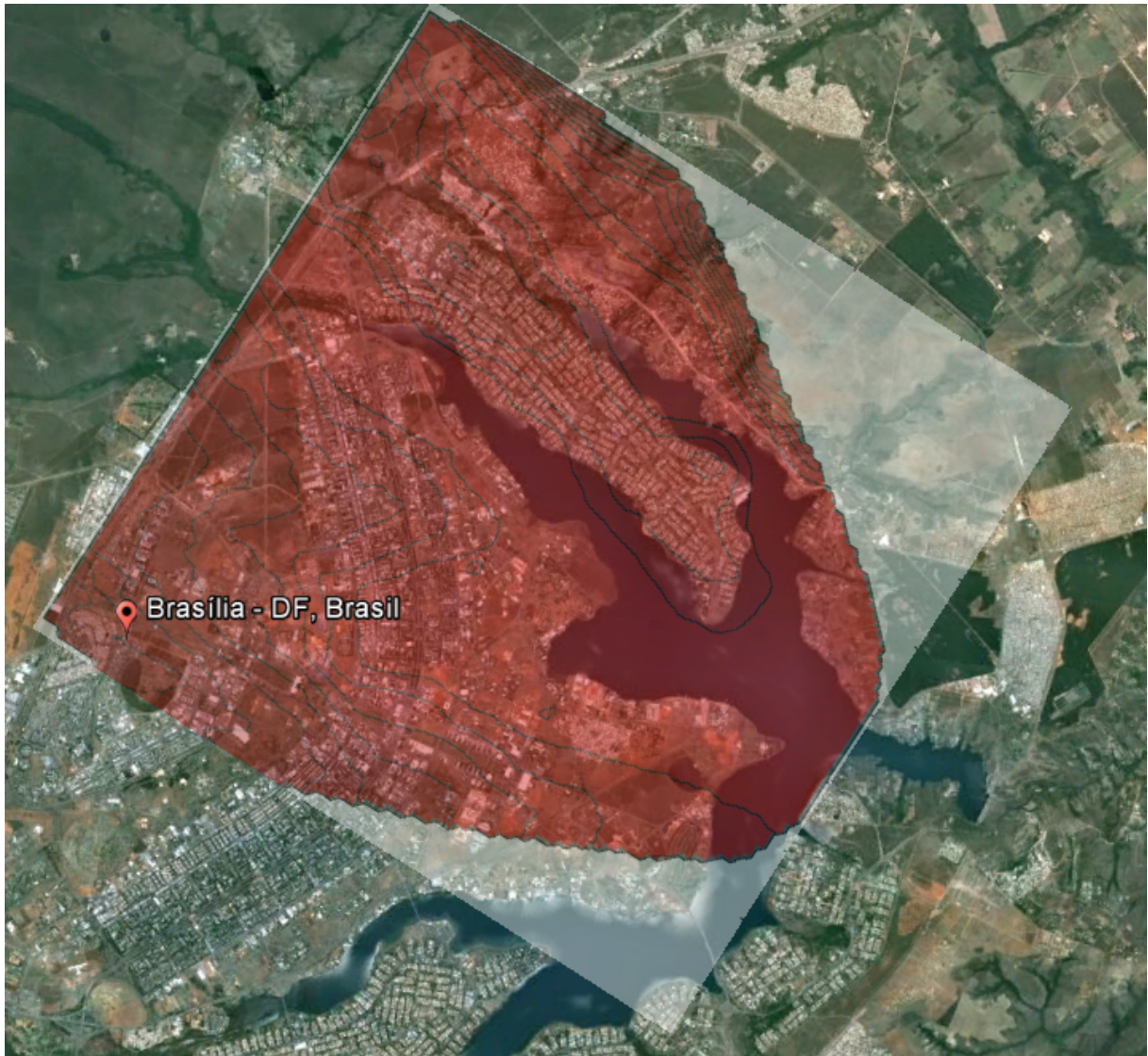


Figura 3.24: Mapa altimétrico do percurso de medidas radioelétricas em Brasília [29]

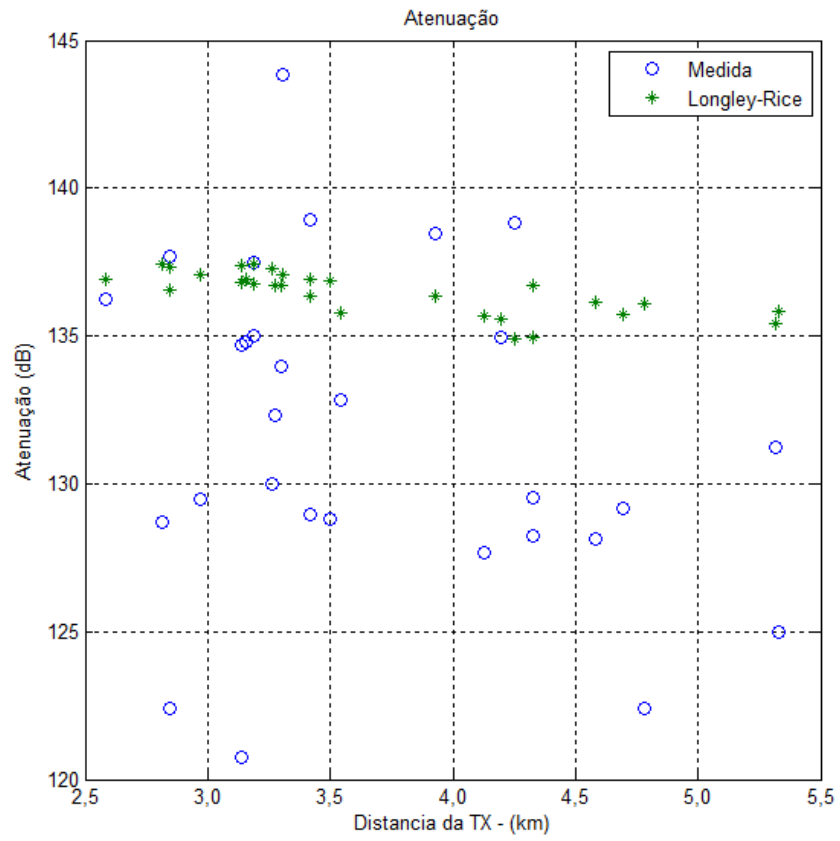


Figura 3.25: Comparativo entre medidas radioelétricas e predição em Brasília (856 MHz) -  $\Delta_h=50$  [29]

Para comparação entre os resultados com dados atmosféricos e valores tabelados para a cidade de Brasília foi utilizado o índice de refração de 320 N-unidades [6]. Quando são utilizados valores tabelados, isto é, os valores propostos originalmente pelo modelo Longley-Rice para os dados atmosféricos este erro aumenta significativamente [30]. Esta comparação pode ser avaliada na Figura 3.26, a qual apresenta um desvio mais significativo entre o valor medido e o calculado pelo LRM com valores tabelados (média de 115 dB).

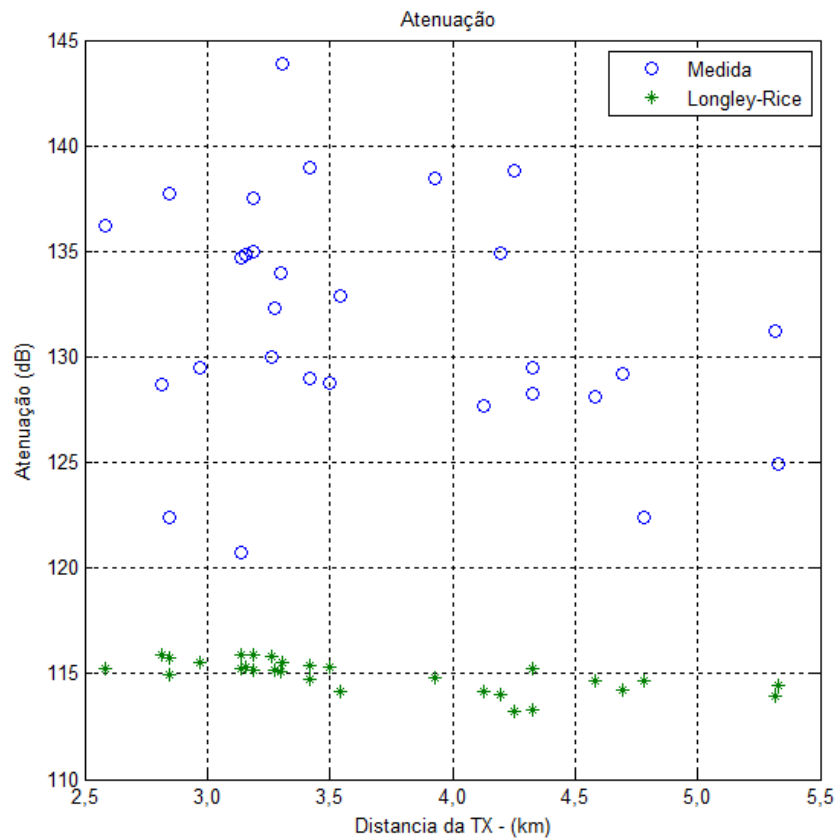


Figura 3.26: Ensaio de predição em Brasília (856 MHz) com refração tabelada -  $\Delta_h=50$ [29]

No último ensaio para LRM, em modo área, é possível avaliar sua eficiência quando comparado com um aplicativo comercial. Neste exemplo, são comparados ensaios com o software Radio Mobile nas figuras a seguir. Para tanto, são apresentados o gráfico de cobertura ( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ) e o mapa de cobertura para a cidade de Brasília gerado pelo LRM e o Radio Mobile utilizando a mesma base topográfica. É possível observar a semelhança entre os valores obtidos nos dois aplicativos (Figuras 3.27, 3.28 e 3.29).

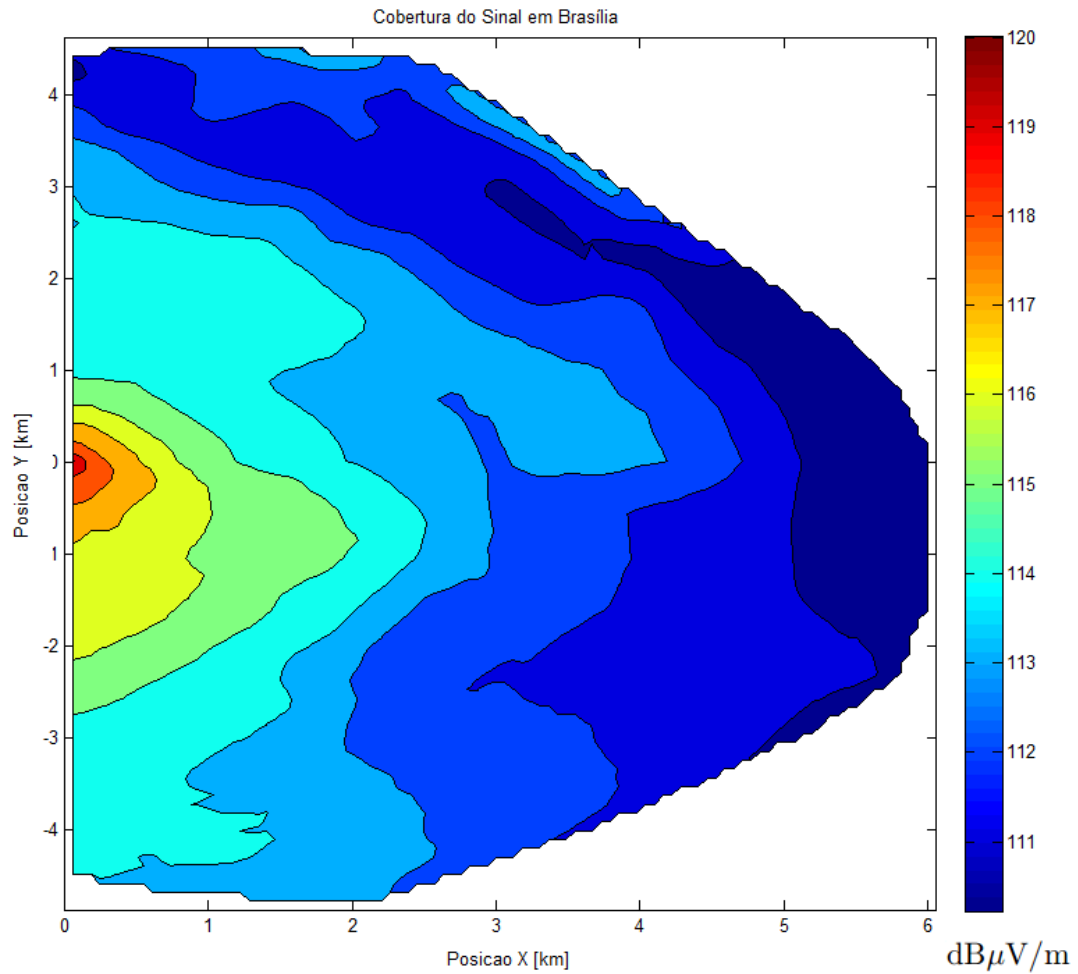


Figura 3.27: Cobertura com LRM em *modo área* para a cidade de Brasília (856 MHz -  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ) [29]



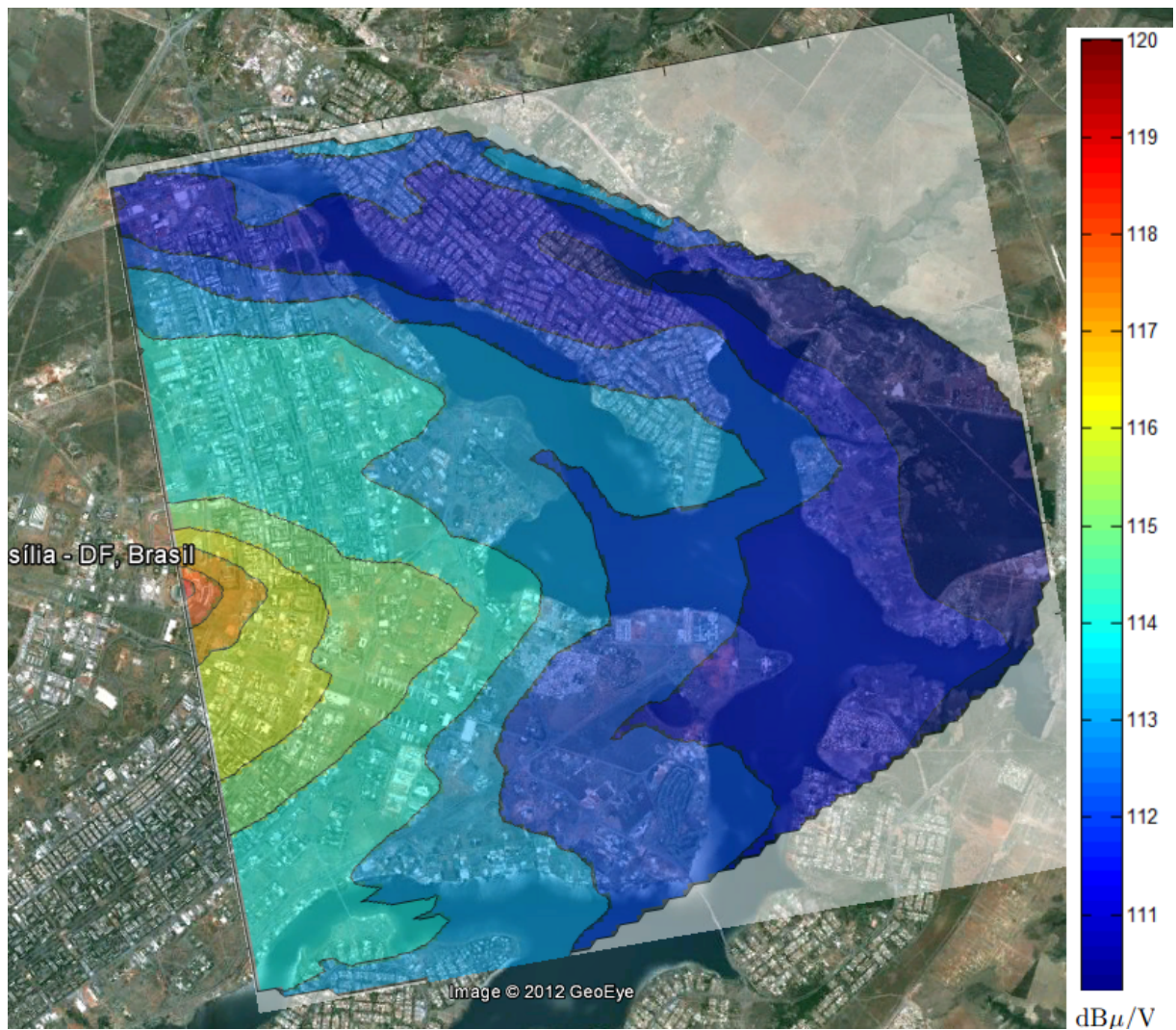


Figura 3.28: Cobertura LRM em modo área para a cidade de Brasília (856 MHz - dB $\mu$ V/m) [29]

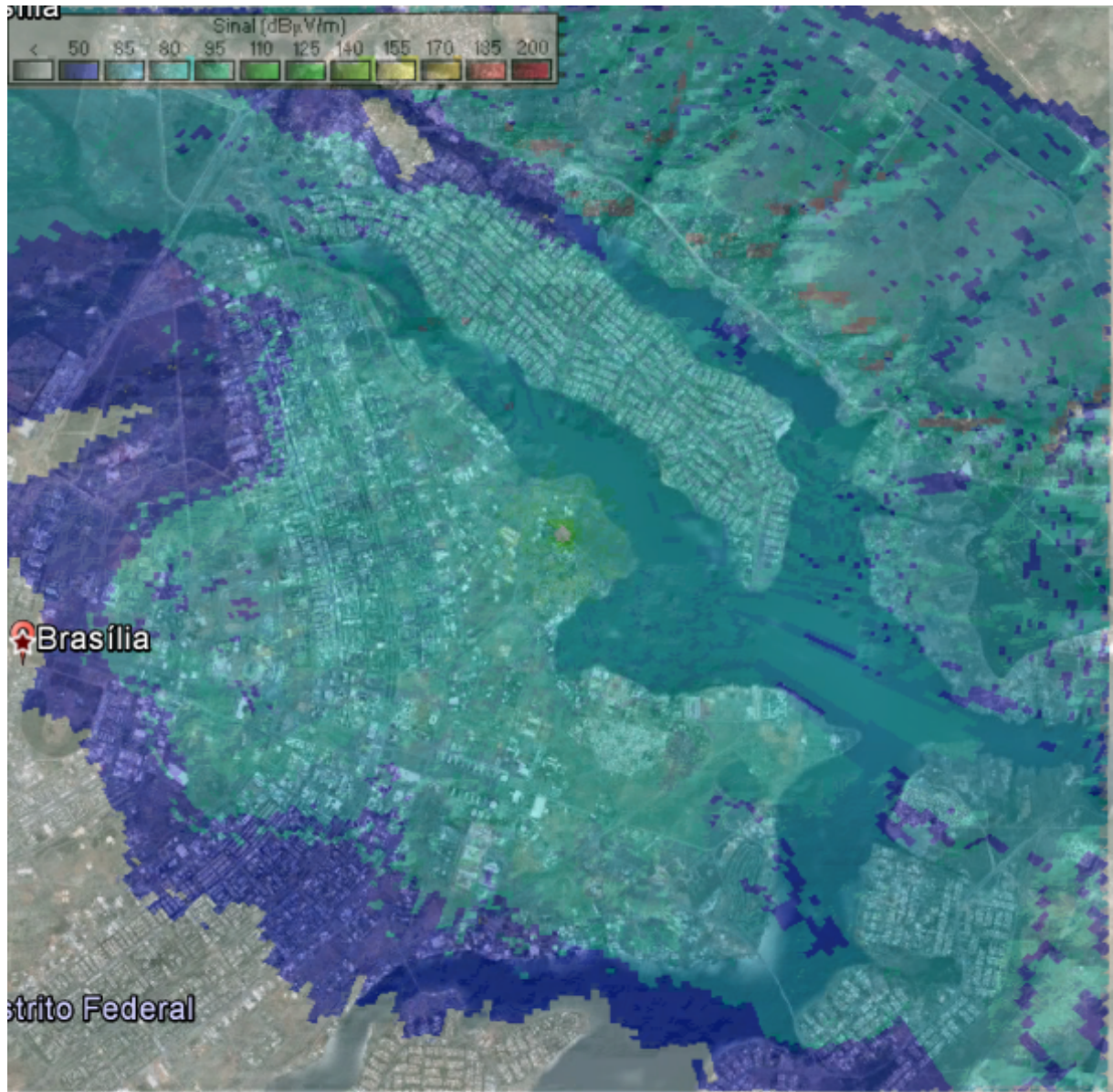


Figura 3.29: Cobertura em modo área para a cidade de Brasília com o software Radio Mobile [31]

## Capítulo 4

# Considerações Finais

Neste trabalho foi possível observar que o modelo de predição Longley-Rice apresenta-se como recurso importante para a previsão de cobertura de sinais de emissoras de rádio e televisão no Brasil e no mundo. Conforme descrição no Capítulo 1, além da predição em ambientes urbanos localizados em regiões de clima tropical, este modelo também pode ser utilizado para a predição de sinais radioelétricos de sondas espaciais. O grande diferencial deste modelo de predição está no baixo custo computacional para a execução das rotinas de cálculo do somatório dos coeficientes de atenuação das faixas de linha de visada, difração e espalhamento.

Em seguida, a revisão bibliográfica disposta no Capítulo 2 apresentou uma visão geral do modelo Longley-Rice, suas particularidades em ambientes urbanos, bem como da recomendação do uso de um fator urbano de atenuação. Entretanto, conforme observado, este fator de atenuação por si só não é suficiente para proporcionar uma previsão de cobertura de maneira eficiente, sendo necessário, no caso dos locais em região de clima tropical, considerar as mudanças das características da atmosfera para determinar a geometria do sistema. Estas mudanças influenciam diretamente no cálculo dos coeficientes de atenuação, de maneira que podem interferir nos resultados de predição, uma vez que alteram a superfície refrativa da atmosfera.

Nesse sentido, a inserção das características de temperatura, pressão e vapor d'água podem proporcionar melhores resultados na predição dos sinais de rádio nas áreas de clima tropical. Para tanto, o Capítulo 3 descreveu detalhadamente o processo de construção do algoritmo com o Modelo Longley-Rice (LRM) neste trabalho (Anexo). Neste aplicativo é possível inserir manualmente as informações sobre

a temperatura, pressão e umidade relativa do ar na atmosfera, sem trabalhar com valores tabelados e aumentando a precisão para o modo de predição *ponto-a-ponto* ou *área*.

Por fim, o Capítulo 4 apresentou os resultados dos ensaios realizados neste trabalho. Para tanto, destacam-se os resultados obtidos para os dados de medições realizadas em Belo Horizonte e Brasília. Em ambos os resultados foi possível constatar que o modelo Longley-Rice pode ser utilizado de maneira satisfatória para predição dos sinais radioelétricos em ambientes urbanos localizados em área de clima tropical.

Para estudos futuros sugere-se o desenvolvimento de interface gráfica amigável que integre o modelo Longley-Rice para o modo *área* a outros aplicativos de mapas, tal como o *Google Maps* e outros modelos de propagação. Essa integração permitirá a utilização mais eficiente do modelo, avaliando os resultados do LRM e comparando-os com os resultados de outros modelos de propagação.

# Referências Bibliográficas

- [1] O. BARRADAS *Sistemas de Radiovisibilidade*. Rio de Janeiro: Embratel, 1978.
- [2] O. BARRADAS *Você e as telecomunicações*. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.
- [3] T. S. RAPPAPORT *Wireless Communications, Principles and Practice*, 2nd ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- [4] TASSO - Television Allocation Study Organization *Point to Point FM Model* Disponível em <http://transition.fcc.gov/oet/fm/ptp/> Acesso em 22 de novembro de 2012.
- [5] A. G. LONGLEY & P. L. RICE & A. P. BARSIS *Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain a computer method. Report ERL65- ITS67*. Washington: NTIA, 1968.
- [6] A. G. LONGLEY *Radio propagation in urban areas*. Washington: NTIA, 1978.
- [7] P. L. RICE *Transmission Loss in Tropospheric Communication Circuits*. Colorado: NBS, 1967.
- [8] S. O. RICE *Statistical Properties of a sine wave plus random noise*. Nova Iorque: BSTJ, 1948.
- [9] P. D. VISHWANTAH *Radio frequency channel modeling for proximity networks on the Martian*. Londres: Prentice Hall, 2004.
- [10] A. AKOGLU & Y. SONG *Parallel Implementation of the Irregular Terrain Model (ITM) for Radio Transmission Loss Prediction Using GPU and Cell BE Processors* - IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems Vol. 22, N° 8, August 2011 IEEE, 2011.
- [11] A. G. HUFFORD *A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. Washington: NTIA, 1982.

- [12] A. G. HUFFORD *The ITS Irregular Terrain Model - The Algorithm version 1.2.2.* Washington: NTIA, 1985.
- [13] J. S. SEYBOLD *Introduction to RF Propagation.* New York: Wiley, 2005.
- [14] L. FOORE *Path Loss Prediction Over the Lunar Surface Utilizing a Modified Longley-Rice Irregular Terrain Model.* Huston: NASA, 2007.
- [15] ITU-R P.453-8 *The radio refractive index: its formula and refractivity data.* Genebra: ITU, 2001.
- [16] ITU-R 1546 *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz* Genebra: ITU, 2009.
- [17] D. C. MONTGOMERY *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros 3ª Ed.* Nova Iorque: John Wiley Sons, 2003.
- [18] F. P. FÓNTAN & P. M. ESPÍNEIRA *Modeling the Wireless Propagation Channel.* Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2008.
- [19] H. L. BERTONI *Radio Propagation for Modern Wireless Systems.* Pequim: Prentice Hall, 2002.
- [20] A. P. BARRIS & J. MILES *Distribuição Acumulativa da Intensidade de Campo em Terrenos Irregulares com Antenas Baixas - Relatório 889.* Colorado: NBS, 1965.
- [21] J. D. PARSONS *The Mobile Radio Propagation Channel.* Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2000.
- [22] C. PHILIPS *A Estabilidade do Modelo de Terreno Irregular Longley-Rice para Problemas Típicos.* Colorado: Universidade do Colorado, 2011.
- [23] V. ERTÜK & C. A. TUNC & A. ALTINTAS *Examination of Existent Propagation Models Over Large Inhomogeneous Terrain Profiles Using Fast Integral Equation Solution.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol.53 n.º 9. Setembro/2005. IEEE, 2005.
- [24] C.G. REGO & F. J. S MOREIRA *Relatório de Atividades do GAPTEM Biênio 2010-2012* Belo Horizonte: GAPTEM/PPGEE/UFMG, 2012.
- [25] C. G. BATISTA & C. G. REGO and D. M OKAMOTO - *Sistema de Predição de Cobertura Radiométrica MOMAG 2010 - 14o. Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 9o. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.* Vila Velha: MOMAG, 2010.

- [26] INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia *Nota Técnica: Ditel/07/2012 - Medições de Campo do Sistema DRM+(Digital Radio Mondiale) na Faixa de FM em Belo Horizonte com a Rádio UFMG Educativa*. Duque de Caxias: INMETRO, 2012.
- [27] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia *Histórico das Condições Atmosféricas* Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/mapasCondicoesRegistradas> Acesso em 22 de novembro de 2012.
- [28] J. O. AYOADE. *Introdução à Climatologia para os Trópicos* Rio de Janeiro: Bertrant, 1991.
- [29] M. A. S. MARINKY *Uma nova abordagem da recomendação ITU-R P.1546 para predição em enlaces curtos sobre terrenos mistos* Dissertação de mestrado apresentada ao PPGEE/UFMG. Belo Horizonte: PPGEE/UFMG, 2005.
- [30] C. T. AMARAL & C. G. REGO *Analysis of Longley-Rice Model in Urban Scenarios. Located in Area with Tropical Climate*. 15º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 8o. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.(MOMAG). João Pessoa: MOMAG, 2012.
- [31] RADIO MOBILE *Radio Mobile Freeware* Disponível em <http://www.ve2dbe.com/english1.html> Acesso em 22 de novembro de 2012.

# Apêndice A

## Programa Longley-Rice

@@

@ MODELO DE TERRENO IRREGULAR (ITM)

@ LONGLEY-RICE MODIFICADO

@ MODO PONTO A PONTO

@

@

@ AUTOR: CRISTIANO TORRES DO AMARAL

@ ORIENTADOR: PROF. DR. CASSIO GONÇALVES DO REGO

@ INFORMAÇÃO: <http://www.cpdee.ufmg.br/gaptem/>

@ COMENTÁRIOS APÓS O CARACTER @

@ REFERÊNCIAS

@

@ AKOGLU, A. SONG, Y. Parallel Implementation of the Irregular Terrain

@ Model (ITM) for Radio Transmission Loss Prediction Using GPU and Cell

@ BE Processors. IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED

@ SYSTEMS, VOL. 22, NO. 8, AUGUST 2011

@

@ FOORE, L. Path Loss Prediction Over the Lunar Surface Utilizing a Modified

@ Longley-Rice Irregular Terrain Model. 2011



@ gltrs.grc.nasa.gov/reports/2007/TM-2007-214825.pdf

@

@ LONGLEY. A. G. Radio Propagation in Urban Areas. 1978 -

@ http://www.its.blrdoc.gov/pub/ot/ot-78-144/

@

@ LONGLEY. A. G. RICE. Transmission Loss Predictions for Tropospheric

@ Communication Circuits Volumes I and II. 1968

@ http://www.its.blrdoc.gov/pub/ntia-rpt/tn101/TN101-volume<sub>IC</sub>chapter01.pdf

@

@ HUFFORD. G. A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the

@ area prediction mode. 1982

@ http://flattop.its.blrdoc.gov/itm/itm<sub>alg</sub>.pdf

@

@ SEYBOLD, J. S. Introduction to RF Propagation. Nova Iorque: Wiley, 2005.

@

@

@ RAPPAPORT, T. Comunicações sem fio. São Paulo: Pearson, 2008.

@

@@

clc

close all

clear all

@@

@ 1. Dados de Entrada Geral para calculos (Hufford, 1982)

@@

[distancia]=csvread('Fig4a<sub>X</sub>axis.txt');

[relevo]=csvread('Fig4a<sub>Y</sub>axis.txt');

[medicao]=csvread('Fig4b<sub>FBSA<sub>Y</sub></sub>axis.txt'); @Leituradoarquivodedados

P= 50; @ Power do TX (watts)



```

Abs=.5; @ Atenuação por absorção da água TN 101 I-30

Er=25; @ Valor tabelado Longley Tabela 3

C=0.020; @ Valor tabelado Longley Tabela 3

Zo=376.62;

ER=(Er+sqrt(-1)*Zo*C/k); @ Hufford (1.5)

@ Zg=sqrt(ER-1)/ER @ POLARIZAÇÃO VERTICAL Hufford (1.4)

@ Zg=sqrt(ER-1); @ POLARIZAÇÃO HORIZONTAL Hufford (1.4)

Zg=25+20*sqrt(-1); @ Dados Erturk da impedancia da superficie refrativa

n=length(distancia);

for j=1:n

he1(j)=1130+20; @ Altura efetiva TX / metros

end

i=1;

for j=1:n

he2(j)=relevo(i)+1.8; @ Altura efetiva RX / metros

i=i+1;

end

for j=1:n

hg1(j)=20; @ Altura estrutua TX / metros

end

for j=1:n

hg2(j)=1.8; @ Altura estrutura RX / metros

end

for j=1:n

d(j)=distancia(j); @ Distância entre as estações / metros

end

for j=1:n

sinal(j)=medicao(j); @ Sinal Medido - dBu / 1kW ERP

end

```





$V1 = 1.2915 * Oe(j) * \sqrt{(F * dl1 * (s - dl)) / ((s - dl + dl2))} * 1e-3$ ; @ Hufford (4.13)

$V2 = 1.2915 * Oe(j) * \sqrt{(F * dl2 * (s - dl)) / ((s - dl + dl1))} * 1e-3$ ; @ Hufford (4.13)

$V = V1$ ;

$A1 = \text{atenua}(V)$ ; @ TN 101 I-8

$V = V2$ ;

$A2 = \text{atenua}(V)$ ; @ TN 101 I-8

$Ak = A1 + A2$ ; @ TN 101 I-1

$Ar = 1$ ;

$AREF(j) = (1 - w) * Ak + w * Ar + Abs$ ; @ TN 101 I-2

end

end

@@

@ Atenuação Faixa de Espalhamento

@@

$d5 = 200e3 + DLs$ ; @ Hufford (4.52)

$d6 = d5 + 200e3$ ; @ Hufford (4.53)

$s = d5$ ;

$A5 = \text{scat}(s, Oe, Ye, Oe1, Oe2, he1, he2, k, DL1, DL2, d, Ns, F)$ ; @ Hufford (4.54)

$s = d6$ ;

$A6 = \text{scat}(s, Oe, Ye, Oe1, Oe2, he1, he2, k, DL1, DL2, d, Ns, F)$ ; @ Hufford (4.55)

$ms = (A6 - A5) / (d6 - d5)$ ; @ Akoglu Song 2011 - (8)

$Aes = A5 - ms * d5$ ; @ Akoglu Song 2011 - (9)

for  $j = 1:n$

if  $d(j) > DLs(j)$

$AREF(j) = Aes(j) + ms(j) * d(j)$ ; @ Akoglu Song 2011 - (10)

end

end

@@

@ Variabilidade de Tempo

```

@
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
ZT=0.5; @ Hufford (5) Variabilidade de 50@

YT=1;

VMED=6; @ TN 101 Figura 10.13 - CLIMA TROPICAL 2 A 6 dB PARA FAIXA DE 100 A 300MHz
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@ Variabilidade de Localização

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
ZL=0; @ Modo ponto-a-ponto Hufford (5.1)

YL=0; @ Modo ponto-a-ponto Hufford (5.1)

@ s=d;

@ [dH]=delta(s, deltah); @ Modo área

@ VL=(10*k*dH)./(k*dH+13); @ Modo área

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
@ Variabilidade de Situação

@

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
Zs=0.5; @ Probabilidade 50@

D1=1266e3; @ Hufford (5.3)

a1=9e6; @ Hufford (5.3)

dex=sqrt(2*a1.*he1)+sqrt(2*a1.*he2)+a1*(k*D1)^( - 1/3);@Hufford(5.3)

D0=130e3; @ Hufford (5.4)

for j=1:n

if d(j)<dex(j) @ Hufford (5.4)

de(j)=D0*d(j)/dex(j);

else

D0+d(j)-dex(j);

end

end

```

VS=5+3\*exp(-de/100e3); @ Hufford (5.10)

YS=((VS.^2 + ((YT.^2)/(7.8 + Zs.^2)) + ((YL.^2)/(24 + Zs.^2))).^(1/2)) \* Zs; @Hufford(5.11)

@@

@ FATOR URBANO

@

@@

UF=16.5+15\*log10(F/100)-0.12.\*d\*1e-3; @ Longley (1)

@@

@ Predição do sinal

@@

PRED= 94-((AREF-YL-YT-YS-VMED)+UF); @ Turquia 50W = 94 dBu

@@

@ Comparativo com Hata (Rappaport, 2008)

@@

if F>300

a=3.2\*((log10(11.75\*he2)).^2) - 4.97;

L=69.55+26.16\*log10(F)-13.82\*log10(he1)-a+(44.9-6.55\*log10(he1)).\*log10(d\*1e-3);

else

a=8.29\*((log10(1.54\*he2)).^2) - 1.1);

L=69.55+26.16\*log10(F)-13.82\*log10(he1)-a+(44.9-6.55\*log10(he1)).\*log10(d\*1e-3);

end

PREDHATA= 94-L;

@@

@ Plota o Gráfico da Predição de Sinal Recebido

@@

figure(1)

subplot(1,2,1)

plot(d, sinal, 'blue', d, PRED, 'red', d, PREDHATA, 'm')

title(['Sinal Recebido'])



