

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CRISTIANE RUIZ GOMES

MODELO DE RÁDIO PROPAGAÇÃO EM UHF PARA AMBIENTES NÃO  
HOMOGÊNEOS E CLIMAS DISTINTOS UTILIZANDO TÉCNICA DE  
APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

TD 10/2015

UFPA / ITEC / PPGE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CRISTIANE RUIZ GOMES

MODELO DE RÁDIO PROPAGAÇÃO EM UHF PARA AMBIENTES NÃO  
HOMOGÊNEOS E CLIMAS DISTINTOS UTILIZANDO TÉCNICA DE  
APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Tese submetida à Banca Examinadora do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica da UFPA para  
obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Elétrica na área de  
Telecomunicações

UFPA / ITEC / PPGE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE RÁDIO PROPAGAÇÃO EM UHF PARA AMBIENTES NÃO  
HOMOGÊNEOS E CLIMAS DISTINTOS UTILIZANDO TÉCNICA DE  
APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

AUTOR: CRISTIANE RUIZ GOMES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA  
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA  
ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES

APROVADA EM 20/08/2015

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante  
(ORIENTADOR – UFPA)

---

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Adaildo Gomes d'Assunção  
(MEMBRO EXTERNO – UFRN)

---

Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira  
(MEMBRO EXTERNO – PUC-RJ)

VISTO:

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(COORDENADOR DO PPGEE/CT/UFPA)

UFPA / ITEC / PPGEE

Às minhas princesas Isadora, Sofia e Vivian que enchem minha vida de felicidade.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, criador de todas as coisas, pela vida e pela oportunidade de concluir mais esta etapa de minha vida.

Aos meus pais Hermínio e Marta que sempre me ensinaram, me valorizaram e incentivaram. Estes que contribuíram grandemente com este trabalho, cada um à sua forma, meu pai com as incontáveis horas de estudo e programação e minha mãe com sua inabalável fé.

Ao meu querido esposo Everaldo, pelo constante incentivo e compreensão.

Em especial ao Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela sua sábia orientação, compreensão e amizade.

Aos professores e colegas do LCT, que foram companheiros em árduas medições, que ajudaram na confecção das figuras, que ensinaram, leram e opinaram, contribuindo com esta tese. Aqueles que simplesmente trouxeram alegria ao LCT.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de usufruir espaços, livros, equipamentos, em suma, por toda a estrutura a mim proporcionada.

À Universidade Federal do Pará, pelo suporte desde minha graduação.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XIII
LISTA DE ACRÔNIMOS .....	XIV
RESUMO .....	XVI
ABSTRACT .....	XVII
1. Introdução.....	18
1.1. Contextualização.....	18
1.2. Objetivos.....	19
1.2.1. Objetivo Geral: .....	19
1.2.2. Objetivos Específicos: .....	19
1.3. Metodologia.....	19
1.4. Organização da Tese .....	20
2. Modelos e Recomendações de Propagação de Ondas de Rádio.....	21
2.1. Modelos de Rádio Propagação .....	21
2.1.1. Modelos Determinísticos.....	22
2.1.2. Modelos Empíricos.....	23
2.2. A União Internacional de Telecomunicação.....	25
2.3. O Setor de Radiocomunicação.....	26
2.4. As Recomendações ITU-R P. ....	27
2.4.1. ITU-R P.527-3 Electrical Characteristics of the Surface of the Earth (1992)....	27
2.4.2. ITU-R P.1546-4 Method for Point-to-area Prediction for Terrestrial Service in Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. (10/2009).....	28
2.4.3. ITU-R P.833-7 Attenuation in Vegetation (02/2012).....	32
2.4.4. ITU-R P.837 Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling. (02/2012) .....	34
2.4.5. ITU-R P.840 Attenuation due to clouds and fog (02/2012) .....	34
2.5. Considerações Finais .....	35
3. Elementos de Aprendizado de Máquina.....	36
3.1. Aprendizado de Máquina (AM).....	36
3.2. Categorias de AM .....	36
3.3. Aprendizagem supervisionada.....	37
3.3.1. Classificação.....	37

3.3.2.	Regressão.....	37
3.4.	Aprendizagem não supervisionada .....	37
3.4.1.	Clustering .....	37
3.4.2.	Fatores Latentes .....	37
3.4.3.	Estrutura de Grafos .....	38
3.4.4.	Completamento Matricial .....	38
3.5.	Agentes Baseados em Conhecimento (BC) .....	38
3.6.	Classificador K-Nearest Neighbors .....	39
3.7.	Clustering.....	40
3.8.	Considerações Finais .....	41
4.	Trabalhos Correlatos.....	42
4.1.	Terrenos Mistos .....	42
4.1.1.	Terrenos Mistos do Tipo Terra-Mar .....	42
4.1.2.	Terrenos Mistos do Tipo Terra-Água Doce .....	43
4.1.3.	Terrenos Mistos - Critérios de Urbanização.....	45
4.2.	Modelos de propagação que envolvem vegetação.....	46
4.3.	Umidade e Chuvas .....	47
4.4.	Aplicações de técnicas de aprendizagem de máquina .....	49
4.4.1.	Aplicações em classificação de imagem .....	49
4.4.2.	Aplicações em detecção de doenças .....	50
4.4.3.	Aplicações em análise de consumo .....	50
4.4.4.	Comparações entre técnicas .....	50
4.5.	Considerações Finais .....	51
5.	Metodologia de Aquisição e Tratamento de Dados.....	52
5.1.	Descrição das características climatológicas da Amazônia .....	52
5.2.	Seleção dos pontos de medição .....	52
5.3.	Campanhas de medições .....	55
5.3.1.	Equipamentos e Setup de medições .....	55
5.3.2.	Realização das medições .....	56
5.4.	Tratamento de dados .....	56
5.5.	Intervalos de Confiança para os Dados Medidos.....	57
5.6.	Cálculo do Campo Elétrico dada a Potência.....	59
5.7.	Considerações Finais .....	61
6.	Modelo de Rádio Propagação para Diferentes Condições Climáticas Baseado em Função de Green Diádica .....	62
6.1.	Breve histórico da utilização da Função de Green Diádica (FGD) .....	62

6.2.	Conceito de Função Diádica de Green.....	63
6.3.	Formulação analítica da FGD .....	63
6.4.	Modelo de três camadas para diferentes condições climáticas .....	65
6.5.	Resultados do Modelo de FGD.....	68
6.6.	Considerações finais .....	72
7.	Modelo de Rádio Propagação em UHF para Ambientes Não Homogêneos e Climas Distintos Utilizando Técnica de Aprendizagem de Máquina.....	73
7.1.	Organização e Classificação dos Dados de Entrada .....	73
7.2.	Técnicas Utilizadas no Modelo Proposto .....	75
7.3.	Análise dos tipos de terrenos .....	76
7.3.1.	Edificação .....	76
7.3.2.	Vegetação .....	77
7.3.3.	Trechos com água doce .....	78
7.4.	Modelo proposto .....	80
7.5.	Considerações Finais .....	81
8.	Resultados.....	82
8.1.	A superfície de potências estimadas .....	82
8.2.	Perfil da perda com a distância .....	85
8.3.	Resultados apresentados em radiais.....	86
8.4.	Resultados apresentados segundo morfologia do terreno.....	95
8.5.	Resultados para diferentes condições climáticas .....	101
8.6.	Comparação com outros modelos.....	103
9.	Conclusões.....	108
	Referências .....	111

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig.4.1. Comparação: dados experimentais e modelo proposto pelos autores.....	43
Fig. 4.2. Perfil de perda com a distância evidenciando o efeito de recuperação nas fronteiras. .....	45
Fig. 4.3. Cenário onde foram realizadas as medições. ....	48
Fig. 5.1. Disposição dos pontos e radiais na RMB.....	54
Fig. 5.2 <i>Site Master S332E</i> .....	55
Fig. 5.3. Antena dipolo Anritsu MPP651A .....	55
Fig. 5.4. Tripé e antena instalados no teto do veículo de passeio utilizado nas campanhas de medições .....	56
Fig. 5.5. Medição sendo realizada nas proximidades do lago Bolonha.....	56
Fig. 5.6. Exemplo de arquivo spa das medições realizadas.....	57
Fig. 5.7. Intervalos de confiança para dados medidos de 1 a 10 km. ....	58
Fig. 5.8. Intervalos de confiança para dados medidos de 10 a 22 km. ....	58
Fig. 5.9. Intervalos de confiança para dados medidos de 22 a 45km. ....	59
Fig. 6.1. Configuração geométrica de uma estrutura de n camadas. ....	64
Fig. 6.2. Representação gráfica da situação.....	66
Fig.6.3. Comparação entre os dados medidos e o modelo de FGD para os solos úmido e seco para Tx1.....	70
Fig.6.4. Comparação entre os dados medidos e o modelo de FGD para os solos úmido e seco para Tx2.....	70
Fig. 6.5. Comparação entre a tendência logarítmica dos dados medidos e o modelo FGD para Tx1.....	71
Fig.6.6. Comparação entre a tendência logarítmica dos dados medidos e o modelo FGD para Tx1.....	71
Fig. 6.1. Morfologia do terreno considerando critérios de edificação.....	77
Fig. 5.2. Morfologia do terreno considerando critérios de vegetação. ....	78

Fig. 8.1. Superfície de potências estimadas pelo modelo proposto.....	83
Fig. 8.2. Vista frontal da superfície de potências estimadas.....	84
Fig. 8.3. Planificação da superfície de potências.....	85
Fig.8.4. Comparação dos dados medidos com o modelo proposto para Tx1 .....	86
Fig. 8.5. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 1.....	88
Fig. 8.6 Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 2.....	89
Fig.8.7. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 3.....	89
Fig. 8.8. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 4.....	90
Fig. 8.9. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 5.....	90
Fig. 8.10. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 6.....	91
Fig. 8.11. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 7.....	91
Fig. 8.12. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 8.....	92
Fig. 8.13 Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 9.....	92
Fig. 8.14. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 10.....	93
Fig. 8.15. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 11.....	93
Fig. 8.16. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 12.....	94
Fig. 8.17. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 13.....	94
Fig. 8.18. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 14.....	95
Fig. 8.19. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área densamente urbana – Nota 5.....	96
Fig. 8.20. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área urbana – Nota 4.....	96
Fig. 8.21 Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área suburbana – Nota 3 .....	97
Fig. 8.22. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área suburbana – Nota 2 .....	97
Fig. 8.23. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em espaço livre – Nota 1 .....	98

Fig. 8.24. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em floresta – Nota 4 .....	99
Fig. 8.25. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em áreas com muitas árvores – Nota 3.....	99
Fig. 8.26. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área com poucas árvores – Nota 2.....	100
Fig. 8.27. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área sem arborização – Nota1.....	100
Fig. 8.28. Comparação entre dados medidos no inverno e saída do modelo proposto considerando diferenças climáticas .....	101
Fig. 8.29. Comparação entre dados medidos no verão e saída do modelo proposto considerando diferenças climáticas .....	102
Fig. 8.30. Comparação entre as tendências lineares dos dados apresentados na Fig.8.28. ....	102
Fig. 8.31. Comparação entre as tendências lineares dos dados apresentados na Fig.8.29. ....	103
Fig. 8.32. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com espaço livre.....	104
Fig. 8.33. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com pequenas casas.....	104
Fig. 8.34. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com muitas casas.....	105
Fig. 8.35. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com pequenos edifícios. ....	105
Fig. 8.36. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com grandes edifícios. ....	106
Fig. 8.37. Perfil de perda com a distância para o modelo proposto, o modelo para terrenos mistos e o modelo de EP. ....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Algoritmos e tipos de aprendizado de máquina.....	37
Tabela 5.1. Dados Climatológicos de Belém .....	52
Tabela 5.2. Informações das antenas transmissoras .....	53
Tabela 5.3 Disposição dos pontos de medição ao longo das radiais .....	55
Tabela 6.1. Constantes elétricas para as duas estações do ano.....	65
Tabela 6.2. Constantes elétricas para o meio 2.....	66
Tabela 6.3. Erros e Diferença média entre as curvas.....	69
Tabela 6.1. Descrição dos atributos e notas associadas.....	75
Tabela 6.2. Notas atribuídas aos pontos medidos.....	79
Tabela 8.1. Erros RMS para cada radial.....	95
Tabela 8.2. Comparação do erro RMS para cada nota de edificação.....	98
Tabela 8.3. Comparação do erro RMS para cada critério de vegetação.....	100
Tabela 8.4. Comparação dos erros RMS entre o modelo proposto e o modelo de Hata para as diferentes notas do atributo edificação.....	107
Tabela 8.5. Comparação dos erros RMS entre os três modelos aplicados .....	107

## LISTA DE ACRÔNIMOS

AD	Árvore de Decisão
AM	Aprendizado de Máquina
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
BC	Baseado em Conhecimento
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EP	Equações Parabólicas
ERP	Effective Radiated Power
FDTD	Finite Difference Time Domain
GPS	Global Position System
ITS	Institute for Telecommunication Science
ITU	International Telecommunication Union
KNN	K-Nearest Neighbors
MCNEE	Máquina para Cálculo Numérico de Espalhamento Eletromagnético
MHM	Modelos Hidden Markov
MWFDTD	Moving Window Finite Difference Time Domain
RMB	Região Metropolitana de Belém
RMS	Root Mean Square
RNA	Redes Neurais Artificiais
SVM	Support Vector Machines
TVD	Televisão Digital
UM	Unidade Móvel
UHF	Ultra High Frequency

VHF	Very High Frequency
VL	Variabilidade Local
VT	Variabilidade Temporal
WLAN	Wireless Local Área Network

## RESUMO

As transmissões de TV digital têm crescido muito no mundo todo nos últimos anos, e em especial no Brasil. A implantação e o melhoramento de tais sistemas de transmissão dependem de modelos que levem em consideração, entre outros fatores, as características geográficas da região, pois estas contribuem para a degradação do sinal. No caso do Brasil, há uma grande heterogeneidade de cenários e climas. Há anos são estudados diversos modelos de perda de propagação para diversas faixas de frequências e tipos de trajetos. Esta tese propõe um modelo empírico de rádio propagação *outdoor* na faixa de UHF, que é utilizada na TV digital. O modelo proposto estima valores de potência recebida podendo ser aplicado a trajetos não homogêneos e a climas distintos. Este último aspecto apresenta caráter inovador para faixa de UHF. Diferentes técnicas de inteligência artificial foram escolhidas para embasamento teórico e computacional por apresentarem a capacidade de introduzir, organizar e descrever dados quantitativos e qualitativos de maneira rápida e eficiente, possibilitando a determinação da potência recebida em uma diversidade de cenários e climas. O modelo proposto foi aplicado a uma cidade da região amazônica que apresenta trajetos heterogêneos como áreas urbanas densamente arborizadas, frações sobre água doce entre outros. Campanhas de medições foram realizadas para obtenção dados de sinais de duas emissoras de televisão digital na região metropolitana da cidade de Belém-Pará para modelar, comparar e validar o modelo proposto. Os resultados obtidos são consistentes. O modelo retrata uma nítida diferença entre as duas estações climáticas do ano estudadas e erros RMS pequenos para todos os casos estudados. Comparação com modelos empíricos e determinísticos amplamente utilizados corroboram a validade do modelo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelos de Rádio Propagação Empíricos; Modelos Baseados em Conhecimento; Aprendizado de Máquina; TV Digital; Inteligência Artificial; Terrenos Mistos.

## ABSTRACT

The digital TV broadcasts have greatly increased worldwide in recent years, especially in Brazil. The establishment and improvement of these transmission systems rely on models that take into account, among other factors, the geographical characteristics of the region, as these contribute to signal degradation. In Brazil, there is a great diversity of scenery and climates. For years several propagation models have been studied many for several frequency bands and types of paths. This thesis proposes an outdoor empirical radio propagation model for UHF band, which is used in digital TV. The proposed model estimates received power values can be applied to non-homogeneous paths and different climates, this latter presents innovative character for the UHF band. Different artificial intelligence techniques were chosen for theoretical and computational basis for having the ability to introduce, organize and describe quantitative and qualitative data quickly and efficiently, making it possible to determine the received power in a variety of settings and climates. The proposed model was applied to a city in the Amazon region with heterogeneous paths and wooded urban areas, fractions of freshwater among others. Measurement campaigns were conducted to obtain data signals from two digital TV stations in the metropolitan area of the city of Belém-Pará to model, compare and validate the model. The results are consistent. The model depicts a distinct difference between the two seasons of the studied year and small RMS errors for all cases studied. The validation of the model was based on the comparison with empirical and deterministic models.

**KEYWORDS:** Empirical Radio Propagation Model; Digital Television; Artificial Intelligence; Mixed Paths.

# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

O planejamento de canais de TV Digital (TVD) é feito seguindo critérios que garantam a qualidade do sinal como, por exemplo, a intensidade de campo mínima para recepção com antena interna (CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES, 2003). Porém, não é suficiente definir os parâmetros que mantêm a boa qualidade do sinal da TVD, são necessários estudos que analisem o sinal desde sua transmissão até a recepção. Nesse percurso, dependendo da posição do receptor, o sinal pode sofrer degradação devido a diversos fatores. Afim de que seja incluída a perda de propagação no planejamento de canais de TVD, é importante que seja feita predição e estudo do sinal eletromagnético entre transmissor e receptor.

Há mais de 40 anos são apresentados, discutidos e corrigidos diversos modelos de perda de propagação para diversas faixas de frequências, tipos de trajetos, correções para perfis do terreno, alturas das antenas transmissora e receptora entre outros.

Um modelo bastante utilizado atualmente por sua facilidade de aplicação, grande abrangência, e diversas contribuições é o modelo proposto pela Recomendação da União Internacional de Telecomunicações ITU (do inglês *International Telecommunication Union*) P.1546. No Brasil a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), sob o decreto federal 5.820 de 29 de julho de 2006 e resolução interna nº 398, adota as normas desta recomendação para predição do sinal eletromagnético. Nesta recomendação estão os procedimentos adotados para a previsão de intensidade de campo para radiodifusão, móvel terrestre, móvel marítimo e certos serviços fixos na faixa de frequência de 30 a 3000 MHz e para distâncias entre 1 km e 1000 km.

A recomendação ITU-R P. 1546-4 traz considerações relevantes para predição de intensidade de campo elétrico em vários tipos de terrenos, porém, apesar da grande variedade, apresenta limitações na predição para cidades bastante heterogêneas como as encontradas na região amazônica. Estas cidades apresentam peculiaridades que fogem dos padrões das medições que serviram para suporte dos principais modelos de propagação, inclusive a P.1546-4. Em sua maioria consideram dados europeus e

japoneses que apresentam clima, vegetação e edificação consideravelmente diferente, além de porções de água doce significativamente menores.

As cidades amazônicas, tomando o exemplo a cidade de Belém, apresentam região urbana densamente arborizada, muitas regiões de floresta em seu interior, rios de dimensão expressiva circundando-as e/ou cruzando-as além de condições climáticas únicas. Apresentam apenas duas estações no ano com temperaturas que variam pouco: o período de chuvas e o período de seca. A diferença marcante entre as duas estações é a umidade.

Em virtude destas diferenças os modelos clássicos e o atual P.1546-4 apresentam uma subestimativa do campo elétrico, como foi verificado em (GOMES et al., 2012b; NASCIMENTO et al., 2012).

## **1.2. Objetivos**

### *1.2.1. Objetivo Geral:*

Propor um modelo empírico de rádio propagação *outdoor* para TVD aplicável à diferentes tipos de terrenos e climas utilizando diferentes técnicas de Inteligência Artificial.

### *1.2.2. Objetivos Específicos:*

- Desenvolver um modelo empírico de rádio propagação *outdoor* que apresente melhor desempenho em terrenos amazônicos, considerando a sua heterogeneidade.
- Estudar e quantificar as diferenças dos parâmetros elétricos nas duas estações amazônicas: verão (quente e seco) e inverno (quente e chuvoso).
- Utilizar a Inteligência Artificial para embasamento teórico e computacional do modelo proposto.
- Gerar um banco de dados de parâmetros elétricos para a região metropolitana de Belém, com possíveis extensões para outras cidades.

## **1.3. Metodologia**

A elaboração do modelo proposto exigiu estudos e pesquisas em diferentes âmbitos. Primeiramente foi feita uma pesquisa bibliográfica para alicerçar o referencial teórico utilizado, abrangendo o estudo de modelos de propagação, recomendações

internacionais, matemática aplicada e técnicas computacionais. Em seguida, foram realizadas campanhas de medição para aquisição de dados de sinais de TVD.

A metodologia aplicada nesta tese inclui técnicas de aprendizado de máquina como embasamento computacional do modelo proposto e a aplicação de função de Green diádica para confirmar uma das hipóteses levantadas na qualificação, corroborando com as informações obtidas pelas campanhas de medição.

#### **1.4. Organização da Tese**

A tese está dividida em nove capítulos.

O capítulo 2 versa sobre alguns modelos e recomendações da ITU-R que fazem considerações sobre propagação de sinais de radiocomunicação.

O capítulo 3 discute elementos de duas grandes áreas da inteligência artificial: o aprendizado de máquina e agentes baseados em conhecimento.

O capítulo 4 apresenta alguns trabalhos correlatos, descrevendo modelos que envolvem discussões, correções, modificações para diferentes tipos de terrenos, além disso são abordados trabalhos que apresentam aplicações de aprendizado de máquina.

O capítulo 5 apresenta a metodologia de aquisição de dados, descrevendo a localização e disposição dos pontos, setup de medições e caracterização dos terrenos e dos climas.

O capítulo 6 apresenta dados de medições em duas estações do ano diferentes, assim como um modelo determinístico que corrobora com a distinção entre os dados apresentados.

O capítulo 7 descreve o modelo proposto assim como aspectos teóricos e considerações feitas na elaboração deste.

O capítulo 8 apresenta os resultados obtidos pelo modelo, análise de erros e comparações com modelos clássicos que reforçam a validação do modelo proposto.

Por fim, no capítulo 9 são apresentadas as conclusões da Tese.

## 2. Modelos e Recomendações de Propagação de Ondas de Rádio.

O desempenho adequado de um sistema de comunicação sem fio está vinculado à predição da potência/campo elétrico numa determinada área. Os modelos de propagação apresentam-se como uma importante ferramenta no cálculo das variáveis que descrevem o processo. Tais modelos visam disponibilizar aos projetistas informações como potência mínima necessária no processo transmissão/recepção e/ou perda por propagação no ambiente considerado.

O presente capítulo está dividido em duas partes; a primeira comenta os modelos de rádio propagação *outdoor* mais utilizados nas faixas de VHF e UHF; A segunda parte apresenta algumas recomendações da União Internacional de Telecomunicações para propagação de ondas de rádio para o caso transmissora-usuário final. As recomendações foram organizadas, apresentadas e brevemente comentadas segundo assuntos abordados nestas e não em ordem cronológica ou numérica.

### 2.1. Modelos de Rádio Propagação

Os modelos de propagação são geralmente divididos em dois grandes grupos, os modelos determinísticos e os modelos empíricos.

Os modelos determinísticos, também conhecidos como teóricos ou local específicos (*site-specific*), apresentam-se como formulações teóricas baseadas nas leis físicas que descrevem o fenômeno, ou ainda reflexão (refração), difração e espalhamento (SAUNDERS, 1999, p.33). Estes modelos apresentam resultados bem precisos, mas necessitam de uma base de dados detalhada das características do meio considerado, isto acarreta em grandes esforços computacionais e numa validade para cenários bem específicos. Em função disto, estes modelos são geralmente aplicados a ambientes *indoor*.

Os modelos empíricos apresentam ou não formulação baseada numa grande quantidade de medições realizadas em diferentes tipos de terrenos. Este tipo de modelo, em geral aplicado à ambiente *outdoor*, depende de alguns parâmetros como características do local, frequência de operação, alturas efetivas das antenas, topografia

do terreno e etc.. Suas principais vantagens são a fácil aplicabilidade e o baixo custo computacional.

Os modelos diferem na sua aplicabilidade de acordo com os diferentes tipos de terrenos, com critérios diferentes para edificação, vegetação, condições ambientais, entre outros. Todos os modelos visam prever a intensidade de sinal ou num ponto particular ou numa área específica (RAPPAPORT, 2002), portanto não existe um modelo que satisfaça concomitantemente todas as situações.

### 2.1.1. Modelos Determinísticos

Dentre os modelos determinísticos, destacam-se o modelo de diferenças finitas no tempo (FDTD) o modelo de traçado de raios e o modelo utilizando equações parabólicas.

#### 2.1.1.1. Modelo de Traçado de Raios (Ray-Tracing)

O modelo de traçado de raios utiliza o princípio da óptica geométrica, onde os raios diretos são considerados ao longo do percurso de propagação do transmissor ao receptor calculando todos os possíveis percursos do sinal do transmissor até o receptor. Este tipo de modelo é comumente usado em ambientes *indoor*, sendo que alguns algoritmos mais complexos incluem o mecanismo de difração, espalhamento em parede difusa e transmissão através de vários materiais.

Atualmente o modelo de traçado de raios é considerado o modelo de predição de intensidade de campo mais confiável. Entretanto este modelo requer um *layout* detalhado da área a ser analisada. A precisão do modelo depende da precisão e da complexidade do banco de dados do *layout* da área. Porém como desvantagem este modelo precisa de uma grande capacidade de processamento computacional. O tempo computacional depende exponencialmente dos detalhes incluídos no *layout* da área. Os algoritmos de traçado de raios também podem ser usados para predição de ambientes *outdoor*, porém com áreas relativamente menores.

#### 2.1.1.2. Modelo de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

As características de propagação de rádio podem ser observadas através da solução das equações de Maxwell para a propagação de ondas eletromagnéticas. O método FDTD é o mais conhecido método numérico de solução das equações de Maxwell. Neste método, as equações de Maxwell são aproximadas através de um

conjunto de equações de diferenças finitas. Primeiramente para a realização dos cálculos é necessário definir um *grid* específico (regular ou irregular) sobre a área de interesse (NESKOVIC et al., 2000). Após a definição destas condições iniciais, o algoritmo FDTD utiliza diferenças centrais para aproximar ambas as derivadas temporal e espacial. Nos nós do *grid*, as soluções são determinadas iterativamente. Deste modo, as equações de Maxwell são resolvidas diretamente.

O modelo FDTD assemelha-se ao modelo de traçado de raios na precisão e no tempo de processamento, pois depende da precisão do banco de dados do *layout* da área.

#### 2.1.1.3. Modelo usando Equações Parabólicas

Devido a maioria dos métodos determinísticos encontrados na literatura apresentarem dificuldade analítica e/ou grande tempo computacional o modelo de equações parabólicas (EP) tem sido bastante aplicado. Este consiste na aplicação de equações diferenciais parciais parabólicas para estimar a potência recebida em ambiente. Este modelo apresenta reduzido tempo computacional quando comparado aos dois métodos citados anteriormente. A aproximação para ângulos na direção paraxial de propagação até 90° tem se mostrado adequada para esses ambientes (MAGNO et al., 2007). Em (OLIVEIRA et al., 2013) vê-se uma aplicação do modelo de EP em ambientes outdoor.

#### 2.1.2. Modelos Empíricos

Segundo Sakar (2003) os modelos empíricos mais tradicionais para ambientes *outdoor* são: o modelo de Okumura et al, de Hata et al, COST 231, e o *Dual-Slope*.

##### 2.1.2.1. O modelo de Okumura et al (1968).

Possivelmente o modelo mais utilizado para ambiente urbanos, o modelo de Okumura aplica-se a frequências de 150MHz a 1920MHz, distâncias de 1km a 100 km e alturas de antena transmissora variando de 30m a 1000m.

O modelo foi desenvolvido através de um grande número de medições realizadas no Japão com antenas vertical omnidirecional para transmissora e receptora. Este consiste num conjunto de curvas de atenuação média para espaço livre ( $A_{mu}$ ) em área urbana com terreno quase suave e pode ser expresso por:

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (2.1)$$

Sendo:

$L_{50}(dB)$ : valor médio da perda de propagação;

$L_F$ : perda de propagação no espaço livre;

$A_{mu}$ : atenuação média relativa ao espaço livre na frequência  $f$ ;

$G(h_{te})$ : fator de ganho da antena transmissora;

$G(h_{re})$ : fator de ganho da antena receptora;

$G_{AREA}$ : ganho gerado pelo ambiente.

Segundo Rappaport (2002) este modelo é considerado o mais simples e melhor em termos de precisão, porém relata a lenta resposta deste para variações no terreno. Fazendo com que seja bem aplicado em área urbana, mas não em área rural.

#### 2.1.2.2. O modelo de Hata (1980)

O modelo de Hata é uma formulação empírica das curvas descritas por Okumura. Este é válido para frequências entre 150MHz e 1500MHz. A formulação para perda de propagação para ambientes urbanos é dada por:

$$L_{50}(\text{urbano})(dB) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d \quad (2.2)$$

Sendo:

$f_c$ : frequência em MHz;

$h_{te}$ : altura efetiva da antena transmissora;

$h_{re}$ : altura efetiva da antena receptora;

$d$ : distância em quilômetros entre antenas transmissora e receptora;

$a(h_{re})$ : fator de correção para altura efetiva da antena receptora a qual é função do tamanho da área coberta. Exemplificando, para uma cidade de médio porte este fator é dado por:

$$a(h_{re}) = (1,1 \log f_c - 0,7) h_{re} - (1,56 \log f_c - 0,8) dB$$

### 2.1.2.3. COST231-Hata

A Cooperativa Europeia para Pesquisa Científica e Técnica (EURO-COST) apresentou uma extensão do modelo de Hata para frequências até 2GHz COST-231 (1991).

$$L_{50}(\text{urbano})(dB) = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d + C_M \quad (2.3)$$

Sendo as mesmas variáveis anteriormente definidas e  $C_M$  dado por:

0 dB para cidades de médio porte e áreas suburbanas;

3 dB para grandes cidades.

### 2.1.2.4. Dual-Slope

Este modelo foi baseado em dois trabalhos Rappaport e Milstein (1992) e Xia et al. (1993) apud Sakar (2003). Este é comumente usado quando a antena transmissora encontra-se além de vários comprimentos de onda do plano terra horizontal. A perda de propagação  $L(d)$  é dada por:

$$L(d) = L_b + \begin{cases} 10 n_1 \log d + P_1, & 1 < d < d_{brk} \\ 10(n_1 - n_2) \log d_{brk} + 10n_2 \log d + P_1, & d \geq d_{brk} \end{cases} \quad (2.4)$$

Sendo:

$P_1$  perda de propagação em dB no ponto localizado a uma distância de referência  $d_0$ ;

$d_{brk}$  distância ao *breakpoint* ou ponto de Fresnel ou de descontinuidade;

$L_b$  parâmetro básico de perda o qual depende da frequência, das alturas das antenas e de  $n_1, n_2$ ;

$n_1, n_2$  declives das linhas de ajustes antes e depois do ponto de descontinuidade.

## 2.2. A União Internacional de Telecomunicação

A União Internacional de Telecomunicações (ITU do inglês *International Telecommunication Union*) é a agência das Nações Unidas especializada em tecnologias de informação e comunicação. Possui uma política de parceria entre entidades públicas e privadas. Esta foi fundada em 1865 em Paris sob o nome *International Telegraph*

*Union*. Recebeu seu nome atual em 1934 e em 1947 tornou-se agência especializada. Atualmente é sediada em Genebra na Suíça e possui 193 países associados e mais de 700 entidades públicas, privadas e acadêmicas.

A ITU é dividida em três grandes setores:

- Radiocommunication Sector (ITU-R)
- Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)
- Telecommunication Development Sector (ITU-D)

O ITU-R coordena os serviços de radiocomunicação, gerencia o espectro de radiofrequência e órbitas de satélites. O ITU-T é responsável pelas recomendações de acesso à Internet, protocolos de transporte, compressão de vídeo e voz dentre outros. O ITU-D apresenta propostas de desenvolvimento em tecnologias de informação e comunicação para diversas entidades além de promover eventos para divulgação, discussão e criação de novas recomendações. Enfim, a ITU visa nortear os serviços e as tecnologias de comunicação em geral.

### **2.3. O Setor de Radiocomunicação**

As recomendações ITU-R constituem um conjunto de normas técnicas internacionais desenvolvidas pelo setor de radiocomunicação. Estas estão subdivididas em 16 áreas de interesse:

BO Satellite delivery

BR Recording for production, archival and play-out; film for television

BS Broadcasting service (sound)

BT Broadcasting service (television)

F Fixed service

M Mobile, radio determination, amateur and related satellite services

P Radiowave propagation

RA Radio Astronomy

RS Remote sensing systems

S Fixed-satellite service

SA Space application and meteorology

SF Frequency sharing and coordination between fixed-satellite and fixed service systems

SM Spectrum management

SNG Satellite news gathering

TF Time signals and frequency standards emission

V Vocabulary and related subjects

#### **2.4. As Recomendações ITU-R P.**

As recomendações ITU-R P. abordam fundamentalmente normas técnicas para propagação de ondas de rádio entre emissoras e o usuário final.

As recomendações aqui abordadas foram utilizadas direta ou indiretamente no modelo proposto. Algumas recomendações serviram como guia para considerações e hipóteses, por não contemplarem algumas especificações do modelo proposto, como faixa de frequência de operação, tipos de trajetos e ambientes. Outras como a P.1546 são mais amplamente discutidas e utilizadas por adequarem-se ao caso sob estudo. Foram destacados pontos não contemplados pelas recomendações que são necessários para uma predição mais precisa do campo eletromagnético. São apresentadas as recomendações com seus nomes originais em inglês.

##### *2.4.1. ITU-R P.527-3 Electrical Characteristics of the Surface of the Earth (1992)*

Esta recomendação discute as características elétricas da superfície terrestre e como os fatores físicos são alterados nas diferentes superfícies. Fornece valores de condutividade e permissividade para diversos tipos de solo em função da frequência.

Apesar da não homogeneidade de um solo real, que possui camadas, a recomendação admite valores efetivos para os parâmetros considerando modificações suaves no interior deste.

São considerados cinco fatores essenciais para a determinação das características elétricas do solo. São estas: natureza do solo; umidade presente; temperatura; variação sazonal; e absorção de energia devido à superfície de objetos.

A umidade presente no solo foi um dos fatores evidenciados através do exemplo do barro úmido que possui condutividade na ordem de  $10^{-2}$  S/m e este mesmo seco possui condutividade na ordem de  $10^{-4}$  S/m.

#### 2.4.2. *ITU-R P.1546-4 Method for Point-to-area Prediction for Terrestrial Service in Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. (10/2009)*

Trata-se de um modelo de predição de propagação ponto-área para serviços terrestres na faixa de frequências de 30 MHz a 3000 MHz, abrangendo distâncias entre 1 km e 1000 km. É aplicado às percentagens de tempo entre 1% e 50%, apresentando curvas de 10 m até 1200 m de altura efetiva da antena transmissora, correção do campo baseada no ângulo de visada do terreno, correção para terrenos mistos, dentre outras características.

A recomendação propõe a utilização de curvas de propagação apresentadas na forma tabular, obtidas a partir de medidas realizadas em regiões temperadas dos EUA e da Europa. As curvas de propagação representam os valores de intensidade de campo para uma potência irradiada efetiva de 1 kW (E.R.P) nas frequências nominais de 100, 600 e 2000 MHz. A E.R.P (*Effective Radiated Power*) é definida como o produto da potência fornecida à antena pelo seu ganho relativo a um dipolo de meia-onda, numa dada direção. Comumente utiliza-se E.I.R.P (*Effective Isotropic Radiated Power*), que é definida como o produto da potência fornecida à antena pelo seu ganho, mas este relativo a uma antena isotrópica. Como o dipolo de meia-onda possui uma diretividade de 1,633 (em relação a antena isotrópica), uma E.R.P de 1 kW equivale a uma E.I.R.P de 1,633 kW.

Esta recomendação admite percursos sobre terrenos mistos prevendo situações sobre a qual a propagação da onda transpassa regiões sobre a terra e sobre mar. Sua última versão admite três tipos de terrenos sobre águas: mar morno, mar frio e regiões costeiras, não há nenhuma consideração de terrenos sobre água doce (rios e lagos). Internacionalmente admite-se a aproximação de um percurso misto sobre água doce por um percurso totalmente terrestre (MAYRINK, 2006), tal consideração é aceitável se forem consideradas apenas pequenos trechos de água doce, consideração esta que não caracteriza a região amazônica que possui rios de dimensão expressiva.

Outro importante parâmetro utilizado para o cálculo do campo elétrico é a altura da antena transmissora ( $h_1$ ). As curvas de intensidade de campo versus distância, nos Anexos 2, 3 e 4, e as tabulações associadas são fornecidas para os valores dados de  $h_1$

de 10; 20; 37,5; 75; 150; 300; 600 e 1200 m. Para qualquer valor de  $h_1$ , no intervalo de 10 m a 3000 m, deve-se usar interpolação ou extrapolação a partir das duas curvas apropriadas, como descrito no Anexo 5, § 4.1.

O modelo ITU-R P.1546 considera a Variabilidade Local (VL) que se refere ao comportamento da intensidade do campo elétrico dentro de uma determinada área de cobertura de dimensões definidas, ao invés de um determinado ponto. Para o caso de frequências nas faixas de VHF e UHF, são usadas áreas quadradas com 500 m de lado. Diversos fatores podem explicar tal variação da intensidade do campo elétrico com a posição como, por exemplo, multi-percursos, variações do nível de arborização (vegetação), construções (prédios, casas, etc.), variações de relevo (morros, montanhas e penhascos) e a própria movimentação dos terminais de comunicação. Quando as medidas que compõem a base tabular são computadas para 50% de VL, por exemplo, isto significa que 50% da área, provavelmente, é coberta por uma intensidade de campo maior do que o valor tabulado. Ou seja, um valor de sinal predito de  $-60$  dBm com VL de 50% significa que em 50% da área, a potência provavelmente será superior a  $-60$  dBm. O modelo considera também a Variabilidade Temporal (VT). São aplicadas percentagens de tempo entre 1% e 50%. As curvas de propagação representam os valores de intensidade de campo excedidos em 50%, 10% e 1% do tempo. Um método para interpolar entre estes valores é apresentado no Anexo 5, § 7 desta recomendação. A recomendação ITU-R P.1546 não é válida para intensidades de campo excedidas em percentagens de tempo fora do intervalo de 1% a 50%.

#### 2.4.2.1. Interpolações e Extrapolações da Recomendação ITU-R P.1546-4 para Predição da Intensidade do Campo Elétrico

Para determinar a intensidade de campo elétrico, utilizando o modelo ITU-R, é necessária a análise das curvas de propagação nos anexos 2, 3 e 4. Os valores da intensidade de campo elétrico tabelados dependem da distância. Dadas as principais características ou parâmetros reais do caso em análise buscam-se, primeiramente, através das variáveis de entrada, as curvas de medidas que mais se aproximam do caso real a ser analisado. Nenhuma interpolação ou extrapolação é necessária se as intensidades de campo forem lidas diretamente destes gráficos. Para valores de distância não tabulados deve-se proceder com a interpolação ou extrapolação logarítmica admitindo quatro parâmetros diferentes: altura da antena transmissora, distância entre antenas transmissora e receptora, frequência e porcentagem do tempo.

#### 2.4.2.2. Interpolação e extrapolação de intensidade de campo elétrico em função da altura da antena transmissora.

Se o valor de  $h_1$  (altura efetiva da antena transmissora) coincidir com uma das oito alturas (10, 20, 37,5, 75, 150, 300, 600 ou 1200 m) para os quais as curvas são fornecidas nominalmente, a intensidade de campo elétrico,  $E$  [dB( $\mu$ V/m)], pode ser obtida diretamente das curvas ou de suas tabulações associadas. Caso contrário, faz-se necessária uma interpolação ou extrapolação dos dados de duas curvas:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \left[ \frac{\log_{10} \left( \frac{h_1}{h_{inf}} \right)}{\log_{10} \left( \frac{h_{sup}}{h_{inf}} \right)} \right] \quad (2.5)$$

Sendo:

$h_1$ : altura efetiva da antena transmissora (m);

$h_{inf}$ : altura efetiva nominal imediatamente inferior a  $h_1$ ;

$h_{sup}$ : altura efetiva nominal imediatamente superior a  $h_1$ ;

$E_{inf}$ : valor de intensidade de campo para  $h_{inf}$ , numa determinada distância;

$E_{sup}$ : valor de intensidade de campo para  $h_{sup}$ , numa determinada distância;

#### 2.4.2.3. Interpolação e extrapolação de intensidade de campo elétrico em função da frequência

Os valores de intensidade de campo para uma dada frequência podem ser obtidos através da interpolação de valores de frequências nominais 100, 600 e 1200 MHz, usando (2.2). Para frequências inferiores a 100 MHz ou superiores a 2000 MHz faz-se uma extrapolação.

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \left[ \frac{\log_{10} \left( \frac{f}{f_{inf}} \right)}{\log_{10} \left( \frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right)} \right] \quad (2.6)$$

sendo:

$f$ : a frequência para a qual a previsão é desejada (MHz);

$f_{inf}$ : frequência nominal inferior (100 MHz se  $f < 600$  MHz, 600 MHz caso contrário);

$f_{sup}$ : distância de tabulação imediatamente superior a  $d$ ;

$E_{inf}$ : valor de intensidade de campo para  $f_{inf}$ , numa determinada distância;

$E_{sup}$ : valor de intensidade de campo para  $f_{sup}$ , numa determinada distância;

Para percursos sobre o mar é necessária uma adequação na interpolação.

#### 2.4.2.4. Interpolação de intensidade de campo elétrico em função da distância.

Para este caso, a menos que  $d$  coincida com uma das distâncias tabuladas, a intensidade de campo,  $E$  [dB( $\mu$ V/m)] deve ser linearmente interpolada para o logaritmo da distância usando-se:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \left[ \frac{\log_{10} \left( \frac{d}{d_{inf}} \right)}{\log_{10} \left( \frac{d_{sup}}{d_{inf}} \right)} \right] \quad (2.7)$$

Sendo:

$d$ : distância para a qual a previsão é desejada;

$d_{inf}$ : distância de tabulação imediatamente inferior a  $d$ ;

$d_{sup}$ : distância de tabulação imediatamente superior a  $d$ ;

$E_{inf}$ : valor de intensidade de campo para  $d_{inf}$ ;

$E_{sup}$ : valor de intensidade de campo para  $d_{sup}$ ;

Esta recomendação não é válida para valores de  $d$  menores que 1 km ou maiores que 1000 km.

#### 2.4.2.5. Interpolação de intensidade de campo elétrico em função da percentagem de tempo

Os valores de intensidade de campo para uma dada percentagem de tempo entre 1% e 50% do tempo devem ser calculados pela interpolação entre os valores nominais de 1%, 10% e 50% do tempo.

$$E = E_{sup} \frac{(Q_{inf} - Q_t)}{(Q_{inf} - Q_{sup})} + E_{inf} \frac{(Q_t - Q_{sup})}{(Q_{inf} - Q_{sup})} \quad (2.8)$$

Sendo

$t$ : percentagem de tempo para a qual a previsão é desejada;

$t_{inf}$ : porcentagem de tempo nominal inferior;

$t_{sup}$ : porcentagem de tempo nominal superior;

$$Q_t = Q_i(t/100)$$

$$Q_{inf} = Q_i(t_{inf}/100)$$

$$Q_{sup} = Q_i(t_{sup}/100)$$

$E_{inf}$ : valor de intensidade de campo para porcentagem de tempo  $t_{inf}$ ;

$E_{sup}$ : valor de intensidade de campo para porcentagem de tempo  $t_{sup}$ ;

$Q_i(x) = 1 - \Phi(x)$ : função complementar inversa da distribuição normal cumulativa (cauda superior).

#### 2.4.3. ITU-R P.833-7 Attenuation in Vegetation (02/2012)

Esta recomendação apresenta diversos modelos de propagação, na faixa de 30 MHz a 60 GHz considerando os efeitos da vegetação. Os modelos apresentados contemplam diversos tipos de vegetação (tipo de folha, copa e altura).

Os modelos apresentados consideram casos de obstrução por bosque ou por única árvore, efeitos dinâmicos de despolarização, atraso e espalhamento devido à vegetação.

##### 2.4.3.1. Modelos de obstrução por bosque são divididos em:

- Trajeto terrestre com um terminal no bosque;

Para trajeto terrestre com um terminal no bosque são considerados dois parâmetros: i) taxa de atenuação específica devido ao espalhamento de energia (dB/m); ii) máxima atenuação adicional devido à vegetação (dB).

A atenuação excessiva  $A_{ev}$  admitindo vegetação é dada por:

$$A_{ev} = A_m \left[ 1 - \exp\left(-d \frac{\gamma}{A_m}\right) \right] \quad (2.9)$$

Sendo:

$d$ : o comprimento do trajeto no interior da floresta (m);

$\gamma$ : atenuação específica para trajeto curto devido à vegetação (dB/m);

$A_m$ : máxima atenuação para um terminal dentro de um tipo específico de vegetação (dB).

$A_{ev}$  é definida como atenuação excessiva para todos os tipos de mecanismos e não apenas para o espaço livre ou a vegetação.

A recomendação elucida que características distintas como: diversidade das espécies na floresta, irregularidades da densidade da floresta, umidade da floresta, e movimento da folhagem devido ao vento, influenciam a atenuação específica  $\gamma$  devido à vegetação, porém não descreve como nem em que proporções isto acontece.

A recomendação relata informações de medições realizadas no Rio de Janeiro (Brasil), em Melhouse (França) e São Petersburgo (Rússia).

- Trajeto via satélite.

Neste caso o transmissor (satélite) e receptor estão fora da floresta, porém esta encontra-se no trajeto destes. A perda por atenuação  $L$  devido à vegetação é dada por:

$$L(dB) = A f^B d^C (\theta + E)^G \quad (2.10)$$

Sendo:

$f$ : frequência em MHz;

$d$ : profundidade da vegetação (m);

$\theta$ : elevação (graus);

$A, B, C, D, E$  e  $G$  parâmetros empíricos.

2.4.3.2. Modelos de obstrução por única árvore são divididos segundo a frequência:

- Até 1 GHz

Para VHF e UHF a obstrução pode ser modelada em termos da atenuação específica e da perda total excessiva.

$$A_{et} = d \gamma \quad (2.11)$$

$d$ : Comprimento do trajeto até a copa da árvore (m);

$\gamma$ : atenuação específica devido à vegetação para trajetos muito curtos (dB/m).

- Acima de 1 GHz

Neste caso o campo total estimado é a combinação das componentes difratadas, refletidas pelo solo e espalhadas pela vegetação.

A árvore é modelada como um cilindro com um prisma no topo representando respectivamente o caule e a copa da árvore.

#### 2.4.3.3. Despolarização

Efeitos de despolarização foram identificados em 38 GHz. Porém, para vegetação muito densa o efeito de despolarização é desconsiderado pois ambos os componentes do campo são completamente atenuados.

#### 2.4.3.4. Efeitos Dinâmicos

Os efeitos da movimentação da folhagem das árvores devido ao vento são evidenciados para frequências acima de 38 GHz. Para tais frequências observa-se uma grande variabilidade do sinal, podendo haver uma redução em até 20dB em 10ms por árvore atravessada.

#### 2.4.3.5. Delay-spread

O sinal propagado em trajeto arborizado sofre um atraso devido, principalmente, multipercurso ocasionado pelo espalhamento deste na copa das árvores. Medições na Coreia em 3,5 GHz evidenciam esse atraso para cinco tipos diferentes de árvores.

#### 2.4.4. *ITU-R P.837 Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling. (02/2012)*

Esta recomendação contém mapas de parâmetros meteorológicos obtidos usando o *European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)*.

Esta base de dados é recomendada para predição de taxas de chuvas com tempo de integração 1 mim, dados estes necessários para cálculo de atenuação para enlaces terrestres e via satélite.

A recomendação fornece, em seu Anexo 1, um modelo para calcular a taxa de chuvas excedida para uma dada probabilidade da média anual e para uma dada localização.

Em suma esta recomendação pode ser utilizada quando não estão disponíveis dados locais sobre a taxa de chuvas ou quando estão disponíveis em outro intervalo de integração.

#### 2.4.5. *ITU-R P.840 Attenuation due to clouds and fog (02/2012)*

Esta recomendação fornece um método de predição de atenuação devido a nuvens e neblina para trajetos Terra-espaço para frequências acima de 10 GHz. Ela apresenta formulações para o cálculo do coeficiente específico de atenuação para chuvas e neblina e mapas de coluna de água no interior da nuvem.

## 2.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou alguns dos modelos de rádio propagação mais amplamente utilizados, evidenciando sua utilização em diferentes tipos de terrenos.

Foram apresentadas recomendações da ITU que fazem considerações sobre tipo de terreno (P.527), condições climáticas (P.837, P.840), outras, apresentam modelos de rádio propagação como P.1546, P833.

Observou-se que os dados utilizados na elaboração destes modelos ou recomendações, em sua maioria, são de regiões bem diferentes das encontradas em florestas tropicais ou equatoriais.

Na recomendação P.1546, a mais amplamente aceita e utilizada, os trajetos sobre terrenos mistos contendo porções de água doce são tratados com pouca atenção, e nenhuma consideração é feita com relação as condições climáticas. Estes dois fatores são relevantes em cenários com florestas e rios de dimensão expressiva como os encontrados na Amazônia. Isto evidencia a necessidade de considerações, correções, ou propostas de outros modelos que se adequem aos aspectos não abordados.

### 3. Elementos de Aprendizado de Máquina

Este capítulo faz um breve apanhado sobre uma subárea da Inteligência Artificial (IA): o Aprendizado de Máquina (AM). Devido à imensa quantidade de informações e referências, optou-se por explicar apenas os tipos de aprendizado que foram utilizados neste trabalho ou que de alguma forma o influenciaram.

Na IA existem dois tipos de raciocínio o indutivo e o dedutivo. O método indutivo extrai regras e padrões de conjuntos de dados. O método dedutivo é composto por regras de inferência da lógica.

#### 3.1. Aprendizado de Máquina (AM)

O AM é uma subárea da IA dedicada ao desenvolvimento de algoritmos ou métodos que permitam ao computador aprender, ou ainda encontrar padrões em um conjunto de dados.

#### 3.2. Categorias de AM

Segundo Kirk (2014) existem três tipos de aprendizagem: a supervisionada, não supervisionada e a por reforço. Segundo Alpaydin (2014) o aprendizado de máquina é dividido em: Associações de aprendizagem ou agentes baseados em conhecimento (BC) (utilizam o método dedutivo); Classificação; Regressão; Aprendizagem não supervisionada e aprendizagem por reforço.

A aprendizagem supervisionada visa determinar um mapeamento inteligente de entradas  $x$  e saídas  $y$ , dado um conjunto de pares  $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$  chamado de conjunto de treinamento e  $N$  o número de elementos deste conjunto. Cada componente do vetor  $x_i$   $p$ -dimensional é chamado atributo. Quando a saída  $y_i$  é composta por informações qualitativas o problema é conhecido como classificação ou reconhecimento de padrões, se  $y_i$  é composto por números reais o problema é conhecido como regressão.

A aprendizagem não supervisionada tem por objetivo determinar padrões que sejam de interesse dispondo apenas de dados de entrada  $D = \{x_i\}_{i=1}^N$ . Este tipo de problema é muito menos bem-definido uma vez que não se sabe que padrões buscar e não há uma métrica óbvia para o cálculo de erro (MURPHY, 2012).

A aprendizagem por reforço é utilizada em casos com recompensas ou punições para uma dada ação.

A Tabela 3.1 apresenta alguns algoritmos e seus tipos de aprendizagem.

Tabela 3.1. Algoritmos e tipos de aprendizado de máquina

ALGORITMO	TIPO DE APRENDIZADO	CLASSE	APLICAÇÕES
<b>K-Nearest Neighbor</b>	Supervisionado	Baseado em exemplos	Problemas de distância
<b>Naive Bayesian</b>	Supervisionado	Probabilístico	Probabilidade é maior que zero para cada classe
<b>Hidden Markov Models</b>	Supervisionado ou não supervisionado	Markoviano	Séries temporais e dados sem memória
<b>Neural Networks</b>	Supervisionado	Aproximação funcional não linear	Entradas binárias
<b>Clustering</b>	Não supervisionado	Clustering	Agrupamento de informações
<b>(Kernel) Ridge Regression</b>	Supervisionado	Regressão	Variáveis contínuas
<b>Filtragem</b>	Não supervisionado	Feature transformation	Dados com muitas variáveis

Fonte: (KIRK, 2015)

### 3.3. Aprendizagem supervisionada

#### 3.3.1. Classificação

O objetivo é aprender o mapeamento das entradas  $x$  para as saídas  $y$ , sendo  $y$  pertencente ao conjunto de classes  $C$ . Se  $\#C = 2$  a classificação é dita binária, se  $\#C > 2$  a classificação é dita multiclasse e se as classes não forem mutuamente exclusivas a classificação é dita multirotulada.

#### 3.3.2. Regressão

O raciocínio é análogo à classificação com a distinção de que entradas e saídas são vetores  $x, y \in \mathbb{R}^n$ .

### 3.4. Aprendizagem não supervisionada

#### 3.4.1. Clustering

O objetivo desta técnica de aprendizagem é organizar um conjunto de dados em grupamentos eficientes de modo que elementos de um mesmo grupamento se pareçam e distem dos elementos dos demais grupamentos.

#### 3.4.2. Fatores Latentes

Este tipo de aprendizagem é geralmente utilizado na redução de dimensionalidade através da projeção de dados de um conjunto num subconjunto de dimensão menor, de modo a evidenciar a essência dos dados.

Um dos motivadores deste tipo de aprendizagem é que apesar de muitos dados aparecerem numa dimensão muito grande, muitas vezes apenas um pequeno subconjunto destes é mais significativo, ou ainda, um pequeno grau de variabilidade é suficiente para descrever o conjunto de dados, este subconjunto é chamado de fatores latentes. Exemplos disto são as projeções, a Análise de Componentes Principais (PCA) ou ainda a Transformada de Fourier.

### 3.4.3. *Estrutura de Grafos*

Para um dado conjunto de variáveis correlacionadas o objetivo desta aprendizagem é descobrir quais são as variáveis mais correlacionadas com outras. Num dado grafo  $G$  os nós são as variáveis e as arestas representam a dependência direta entre as variáveis. O aprendizado é feito a partir de  $\hat{G} = \text{argmax } p(G|D)$ .

### 3.4.4. *Completamento Matricial*

O objetivo desta aprendizagem é inserir dados plausíveis numa matriz de entrada incompleta. Como parte dos dados da matriz é desconhecida, a técnica procura preencher os espaços vazios da matriz com dados coerentes

Alguns exemplos deste são o completamento de uma imagem em que parte foi destruída, a filtragem colaborativa e de um modo geral qualquer sinal que teve parte removida e se deseja recuperar.

## 3.5. **Agentes Baseados em Conhecimento (BC)**

Os agentes baseados em conhecimento utilizam o método dedutivo da lógica, ou ainda, são modelos matemáticos baseados em Fatos e Regras. Segundo Russel e Norvig (1995) “um agente baseado em conhecimento é composto por uma Base de Conhecimento e por um Mecanismo de Inferência”.

Fatos são conhecimentos *a priori* obtidos pela observação de um fenômeno. Estes podem ser registrados de modo qualitativo (empírico) por um especialista ou de modo quantitativo por um equipamento, compondo assim uma Base de Conhecimentos.

Regras são associações lógicas sobre os fatos. Estas apresentam-se comumente no formato SE-ENTÃO, sendo a primeira parte conhecida como antecessor (ou premissa) e a segunda parte como conseqüente (ou conclusão). Pode-se ainda colocar múltiplos antecedentes unidos por conjunção ou disjunção (e/ou) (NEGNEVITSKY, 2005).

As regras podem ser fortes ou fracas. Uma regra forte associa os fatos com um nível de certeza alto, caso contrário, a regra é dita fraca. A força de cada regra é dada comumente por um número real pertencente ao intervalo  $[0, 1]$  chamado de peso. As regras são associadas de modo que a somatória dos pesos de todas as regras seja igual a 1 para um dado fato. Novas regras podem ser obtidas no processo através da associação das regras e fatos iniciais, este processo é chamado de inferência.

A robustez de um modelo de conhecimento está vinculada ao número de fatos observados e a qualidade das regras elaboradas. Ou ainda, quanto mais fatos mais regras com melhor descrição do fenômeno podem ser elaboradas.

### 3.6. Classificador K-Nearest Neighbors

O K-Nearest Neighbors (KNN) (K-vizinhos mais próximos) é um classificador onde o aprendizado é baseado na analogia. O conjunto de treinamento é formado por vetores  $n$ -dimensionais e cada elemento deste conjunto representa um ponto no espaço  $n$ -dimensional.

Para determinar a classe de um elemento que não pertença ao conjunto de treinamento, o classificador KNN procura os  $K$  elementos do conjunto de treinamento que estejam mais próximos do elemento desconhecido, ou seja que tenham a menor “distância”. Verifica-se quais as classes desses  $K$  elementos é a classe mais frequente. Esta classe é atribuída ao elemento desconhecido.

As métricas mais comuns para determinação da distância entre dois pontos  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  do  $\mathbb{R}^n$  são:

Distância Euclidiana

$$d(X, Y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}$$

Distância Manhattan

$$d(X, Y) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| + \dots + |x_n - y_n|$$

Distância Minkowski

$$d(X, Y) = (|x_1 - y_1|^p + |x_2 - y_2|^p + \dots + |x_n - y_n|^p)^{1/p}, p \in \mathbb{N}$$

Esta distância é a generalização das duas anteriores sendo a distância M para  $q = 1$ , a E para  $q = 2$  e quando  $q = \infty$  a distância máximo dos módulos.

No caso de informações mais relevantes que outras é possível inserir ponderação:

$$d(X, Y) = \sqrt{\omega_1(x_1 - y_1)^2 + \omega_2(x_2 - y_2)^2 + \dots + \omega_n(x_n - y_n)^2}$$

Pesos também podem ser inseridos nas duas outras métricas.

O KNN é um algoritmo que pode ser utilizado para classificação ou para regressão. É utilizado na classificação em casos no qual o atributo é qualitativo; é utilizado na regressão quando o atributo é numérico.

O KNN é um classificador que possui apenas um parâmetro livre por estágio, o valor de K. O estágio é a classificação de um item no vetor n-dimensional de atributos. O valor de K é controlado pelo usuário com o objetivo de obter uma melhor classificação.

A determinação do valor de K é geralmente feita utilizando um dos três métodos:

Adivinhação: Caso se conheça bem o problema pode-se ter uma sugestão;

Usando uma heurística: Evitando K par (casos de empate), escolhendo K maior do que o número de classes mais um e K suficientemente pequeno para evitar ruídos;

Usando um algoritmo de otimização: Muitos algoritmos como algoritmos genéticos ou de força bruta podem ser utilizados, porém deve-se ter o cuidado de não aumentar muito o valor de K, pois acarreta num aumento da complexidade da classificação tornando o algoritmo mais lento.

Para K=1 o KNN gera o conhecido mapa de Voronoi (MURPHY, 2012).

Um aspecto negativo do KNN é a chamada Maldição da Dimensionalidade onde o classificador não apresenta resultados muito bons para dados muito esparsos e de grande dimensão.

### 3.7. Clustering

O Clustering ou análise de grupamento é um algoritmo de aprendizado não supervisionado que tem por objetivo agrupar n dados em k grupos. O Clustering difere da classificação por não apresentar classes bem definidas, ou ainda, não possui rótulos a priori dos dados.

Existe um número muito grande de técnicas de clusterização de modo que todos utilizam métodos numéricos para agrupar automaticamente os dados dispondo unicamente das entradas. As diferenças entre estes são as métricas escolhidas, i.e. a idéia de distância ou similaridade escolhida para a divisão dos casos distintos.

A clusterização possibilita agrupar dados similares de modo a descrevê-los com eficiência. A organização de dados em grupamentos pode classificar novos dados, descobrir correlações e atributos que não seriam detectados nos dados brutos.

Segundo Hruschk e Ebecken (2000) Clustering pode ser definido como: Dado um conjunto de  $n$  objetos  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  onde cada  $X_i \in \mathbb{R}^p$  é um vetor  $p$ -dimensional cujos elementos são características, estes objetos devem ser agrupados em  $K$  grupos disjuntos  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$  sendo que:

$$C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_K = Y$$

$$C_i \neq \emptyset, \forall i, 1 \leq i \leq K$$

$$C_i \cap C_j = \emptyset, \forall i \neq j, 1 \leq i, j \leq K$$

A maior limitação do clustering é a determinação do melhor grupamento que é um problema NP-completo, uma vez que o número de partições distintas em que pode-se dividir  $n$  objetos em  $K$  clusters aumenta aproximadamente com  $K^n/n!$ .

### 3.8. Considerações Finais

Este capítulo apresentou algumas técnicas de aprendizagem de máquina dando ênfase nas técnicas que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

O modelo proposto neste trabalho é um algoritmo híbrido das técnicas BC e KNN. Estas foram escolhidas para embasamento teórico e computacional por apresentarem a capacidade de introduzir, organizar e descrever dados quantitativos e qualitativos de maneira rápida e eficiente, possibilitando a determinação da potência recebida em uma diversidade muito grande de cenários e climas. Maiores explicações sobre a escolha da técnica utilizada podem ser vistas no capítulo 7.

## 4. Trabalhos Correlatos

Este capítulo apresenta e discute alguns modelos de rádio propagação que consideram critérios diferenciados para terrenos distintos como terrenos mistos, vegetação, edificação e condições ambientais. Além disto, são apresentados alguns trabalhos que utilizam técnicas de aprendizado de máquina para resolução de problemas em diversas áreas do conhecimento.

### 4.1. Terrenos Mistos

Este item visa apresentar e discutir alguns trabalhos presentes na literatura sobre modelos de propagação que consideram abordagens sobre terrenos mistos, critérios/correções para edificações, vegetação e condições ambientais.

Primeiramente serão discutidos trabalhos que fazem considerações sobre terrenos mistos em casos do tipo terra-mar para faixa de UHF. Em seguida serão apresentados trabalhos que consideram uma peculiaridade brasileira, que são os terrenos mistos terra-água doce com modelos empíricos e determinísticos. Por fim, serão discutidos trabalhos que tratam de terrenos mistos considerando diferenças de urbanização que não possuem trechos sobre água.

#### 4.1.1. Terrenos Mistos do Tipo Terra-Mar

Witvliet et al. (2011) avaliam e propõem modificações na recomendação ITU-R P. 1546-4 a partir de uma grande quantidade de dados medidos. Os dados foram medidos entre a Holanda e o Reino Unido, tomando três cidades distintas na Holanda como transmissores e três no Reino Unido como receptores, totalizando 7 trajetos sobre terrenos mistos terra-mar com porcentagens diferentes de trajetos sobre mar. Foram coletados dados de 8 frequências distintas entre 500 e 700 MHz. Os autores coletaram a imensa quantidade de 21 milhões de dados em 500 dias.

Os autores descrevem o processo de tratamento de dados no intuito de disponibilizar uma metodologia para outras campanhas de medições. Por fim, os dados medidos são comparados com os dados previstos pelo modelo ITU-R P.1546-4. Na maioria dos casos observa-se uma subestimativa do modelo, chegando a diferenças de até 20dB. O modelo da recomendação anterior ITU-R P.370-7 apresentou resultados substancialmente melhores, fato que segundo os autores deve-se principalmente ao fator

de correção TCA no receptor e à introdução de  $\Delta h$  (tratamento de pequenas diferenças de alturas) para terrenos com rugosidade de até 50m.

Kawano, Goto e Ishihara (2008) propõem um modelo de propagação de onda terrestre baseado no método de análise assintótica para HF em trajetos sobre terrenos mistos (terra-mar). O modelo é comparado com dados simulados e medidos. Em ambos os casos apresenta bom desempenho, comprovando o efeito de recuperação nas fronteiras de transição de terreno. A Fig. 4.1 ilustra a comparação entre a solução assintótica (bolas), dados experimentais (cruzes), solução de referência obtida numericamente (linha contínua) e teoria de terrenos mistos (linha tracejada).

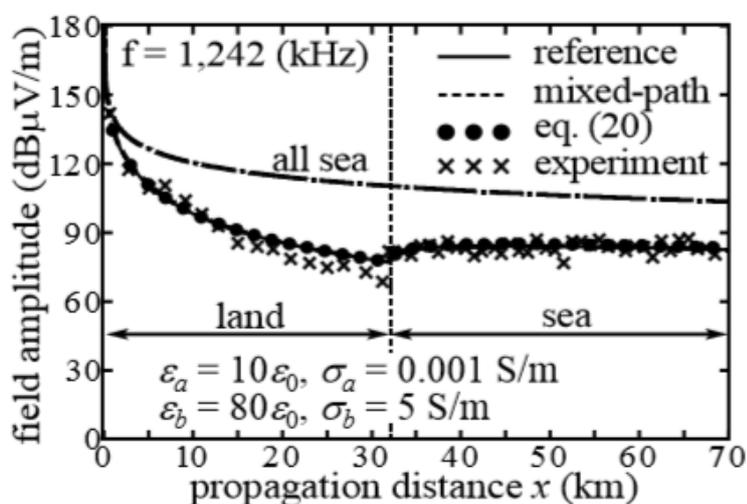


Fig.4.1. Comparação: dados experimentais e modelo proposto pelos autores.

Fonte: Kawano, Goto e Ishihara (2008)

#### 4.1.2. Terrenos Mistos do Tipo Terra-Água Doce

Mayrink et al. (2006) propõem uma estimativa da intensidade de campo nas faixas de VHF e UHF para percursos curtos (até 10 km) parcialmente sobre água doce. O método proposto baseia-se na interseção do 1º elipsoide de Fresnel com o perfil do terreno. O terreno deve ser aproximado pelo seu equivalente plano, o elipsoide é definido de modo que a antena transmissora esteja localizada em um dos focos elipsoide e que a imagem da receptora esteja no outro foco. A principal diferença do modelo proposto para o modelo ITU-R1546-2 é a consideração da percentagem de água contida na interseção do elipsoide com seu equivalente plano e não sua porção total. A percentagem de água contida na interseção é dada por:

$$p_w = \frac{d_w}{d_f} \quad (4.1)$$

Sendo  $d_f$  o comprimento da zona de Fresnel na região do ponto especular, e  $d_w$  é a porção de  $d_f$  sobre a água. Por fim, os autores calculam a intensidade em consonância com o Anexo 5 da recomendação:

$$E = (1 - p_w)E_{land} + p_w E_{sea} \quad (4.2)$$

Dois estudos de caso são mostrados com bons resultados utilizando a metodologia proposta. Primeiramente o caso da Lagoa da Pampulha em Belo Horizonte – MG e em seguida o caso do Lago Paranoá em Brasília – DF. Em ambos os casos estudados o modelo modificado proposto obteve melhor resultado apresentando RMS menor que os outros modelos implementados.

Gomes et al. (2012b) apresentam uma metodologia de predição de campo elétrico para terrenos mistos terra-água doce baseado na recomendação ITU-R P.1546. Os autores apresentam um estudo de caso com medições na região metropolitana de Belém- PA, cidade que apresenta morfologias variadas, desde perímetros densamente urbanos até áreas de floresta e rios. Para o terreno estudado a recomendação P.1546 apresenta-se insuficiente na análise de percursos envolvendo terra e água doce, tanto na aproximação destes com o terreno totalmente sobre terra como na utilização da correção para terrenos mistos.

A metodologia proposta pelos autores consiste em dividir o problema original (terrenos mistos) em  $n$  problemas menores, sendo  $n$  o número de terrenos distintos atravessados. Os  $n$  problemas resultantes são tratados em concordância com a recomendação ITU-R P.1546-4. As informações dos terrenos anteriores são mantidas no cálculo relativo aos terrenos presentes, no entanto é desconsiderada a informação dos terrenos posteriores. Isto é diferente do proposto na recomendação que considera todas as informações de todos os terrenos uns sobre os outros.

A metodologia proposta apresenta ganhos significativos na modelagem para terrenos mistos do tipo terra-água doce, com uma diminuição do RMS de 8,2 para 2,9.

Uma abordagem teórica pode ser vista em Batista e Rego (2007). Neste os autores apresentam um modelo de propagação determinístico cuja formulação matemática é baseada em equações integrais. O modelo admite terrenos suavemente irregulares e não homogêneos e polarização vertical. Suas principais aproximações são: invariância vertical do terreno; incidência rasante; condições de contorno de Leontovich; não consideração de retroespalhamento evitando assim matriz cheia.

Os autores apresentam um software denominado Máquina para cálculo numérico de espalhamento eletromagnético (MCNEE) este permite entrar com informações sobre o sistema utilizado, frequência, tipo de antenas e localização destas.

Resultados apresentados evidenciam bons resultados para o caso idealizado (cunha de Luebbers) e no caso das medições no Lago Paranoá- DF, já apresentado em Mayrink et al. (2006).

#### 4.1.3. Terrenos Mistos - Critérios de Urbanização

Dias et al. (2011) apresentam um modelo de propagação para as faixas VHF/UHF considerando transições entre ambientes distintos (morfologias) numa cidade. Os autores tomam como base o modelo COST231, fazem correções para terrenos mistos utilizando o método de Millington e correções para difração usando o método de Deygout. Os autores propõem considerações relevantes sobre a transição de morfologia observando que nas proximidades das fronteiras há um aumento da potência recebida, Fig. 4.2.

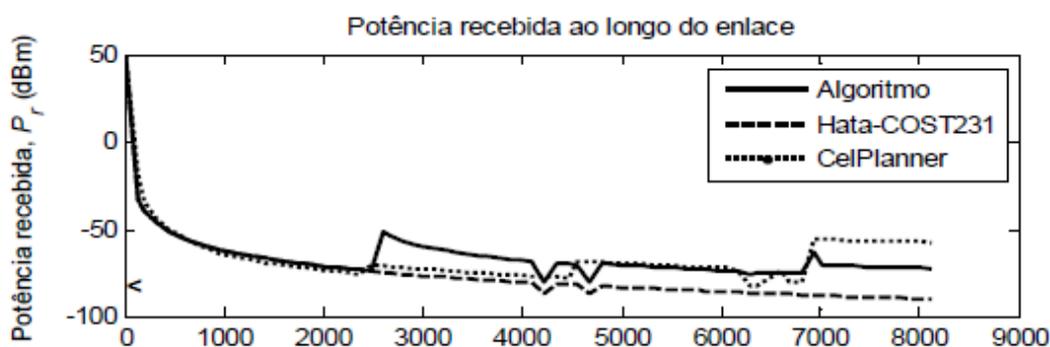


Fig. 4.2. Perfil de perda com a distância evidenciando o efeito de recuperação nas fronteiras.

Fonte: (DIAS et al., 2011)

Os dados do modelo proposto são comparados com dados simulados produzidos pelo programa CelPlanner. No artigo publicado não foram apresentados dados reais de medição, em função disso não há comparação entre erros.

O modelo proposto apresenta informações mais próximas das simuladas do que as apresentadas pelo COST231.

#### 4.2. Modelos de propagação que envolvem vegetação

Modelos de propagação analíticos que modelam árvores ou florestas são discutidos na literatura desde a década de 60 (TAMIR, 1967). Trabalhos posteriores já consideravam terrenos mistos envolvendo trajetos sobre floresta e área descampada (TAMIR, 1977), modelos com três camadas incluindo uma camada de floresta (CAVALCANTE, 1982) e terrenos mistos apresentando trechos de florestas e cidades (CAVALCANTE; ROGERS; GIAROLA, 1982; CAVALCANTE; GIAROLA, 1983; SILVA et al., 2014); outros, ainda, admitem quatro camadas: espaço livre, a copa das árvores, o tronco e o solo de uma floresta (CAVALCANTE; ROGERS; GIAROLA, 1983; LI; JIAO, 1986).

Tamir (1977) apresenta resultados analíticos para trajetos envolvendo áreas de floresta para frequências de 2 a 200MHz. Neste trabalho são abordados trajetos com um dos terminais fora da região de floresta. Quatro situações são abordadas: i) um dos terminais dentro da camada de vegetação; ii) um dos terminais acima da camada de vegetação; iii) um dos terminais acima da área descampada; iv) um dos terminais próximo ao solo na área descampada. Outros casos podem ser analisados como uma composição das geometrias canônicas apresentadas.

Wu et al. (2004) propõem uma nova metodologia para modelar ondas de rádio orientadas. A metodologia apresentada é chamada de *Moving Window Finite Difference Time Domain* (MWFDTD), esta recebe este nome por apresentar uma melhoria no FDTD clássico por considerar que uma onda de rádio pulsada existe somente numa pequena parte ao longo do trajeto de propagação num dado instante de tempo. Isto permite a utilização de uma malha FDTD relativamente pequena, de modo que exista somente na porção da região sobre o qual o pulso se desloca.

Os autores fazem considerações acerca de efeitos atmosféricos para frequências na faixa de VHF e UHF. Neste, os autores simulam uma alteração atmosférica substituindo a permissividade do espaço livre na equação de Maxwell.

As considerações feitas sobre vegetação admitem modelos simples de árvores, ou ainda, é considerada uma única árvore ou árvores espalhadas no cenário considerado. Neste trabalho não é considerado o caso de floresta. A árvore foi modelada como uma barra dielétrica com permissividade efetiva complexa que depende da altura, orientação, densidade e parâmetros constitutivos de galhos e folhas.

Os resultados obtidos pelo método foram comparados com dados experimentais obtidos pelo *Institute for Telecommunication Sciences* (ITS) nas frequências de 230, 410 e 910MHz. Em todos os casos os resultados foram considerados bons pelos autores. Não há comparação de erros.

Chee, Torrico e Kuner (2011) modelam a atenuação devido a folhagem em áreas rurais da Alemanha para 3,5 Ghz. Neste são apresentados vários modelos para árvores dentre esses um que admite cilindros para troncos e galhos, e discos para folhas.

Os resultados são comparados com dados medidos em três estações do ano: inverno, primavera e verão. Nestes os autores encontram diferenças de 0,2 dB/m no coeficiente efetivo de folhagem entre dados da primavera e do verão. Além disso, a atenuação na primavera é cerca de 3,15 dB enquanto que no verão é de 4,68 dB. Essas diferenças mostram a importância de se estudar, pelo menos de forma indireta, as condições ambientais do trajeto sob estudo.

### **4.3. Umidade e Chuvas**

Contribuições em modelos de propagação que considerem informações sobre taxas pluviométricas são muitas na literatura, porém a maioria estão destinadas a faixas de frequência muito altas como as bandas Ku e Ka para satélites. Nestas faixas de frequência é evidente a necessidade de modelos que prevejam a atenuação devido às chuvas, uma vez que o tamanho da gotícula de água da chuva torna-se considerável em relação ao comprimento de onda.

Os trabalhos de Yeo, Lee e Ong (2009) e Mandeep et al. (2011) apresentam modelos de correção das recomendações ITU-R P.618-9, P.839-3 e P.837-5 para taxas pluviométricas em países tropicais, Singapura e Malásia respectivamente.

Os trabalhos de Meng, Lee e Ng (2008, 2009a, 2009b) fazem estudos sobre a influência de chuvas e vento na propagação de ondas na faixa de UHF e VHF em áreas de floresta. Nos três trabalhos os autores utilizam dados de campanha de medições ocorridas numa plantação de palmeiras em Cingapura. Nesta as árvores estão igualmente espaçadas e apresentam altura média de 5,6 m e diâmetro de tronco de 0,4 m, Fig. 4.3.

Em Meng, Lee e Ng (2008) os autores evidenciam que a onda lateral é dominante na propagação na faixa de UHF e não é influenciada pela presença de

chuvas, propagando-se sobre a copa das árvores analogamente ao espaço livre. Por outro lado, a componente multipercurso induzida pelo espalhamento nas folhas e galhos são significativamente afetadas pela intensidade da chuva. Isto deve-se principalmente ao aumento de água na folhagem acarretando em maior atenuação e absorção da componente multipercurso. Verificaram que há um aumento do RMS e do número de *clusters* de multipercurso a medida que a chuva diminui.



Fig. 4.3. Cenário onde foram realizadas as medições.

Fonte: (MENG, LEE e NG, 2008)

Meng, Lee e Ng (2009a) apresentam um estudo estatístico da perda de propagação devido às chuvas e ventos. Os autores analisam diversas situações envolvendo chuvas e ventos fracos, moderados e fortes e combinações destes. Observou-se um aumento da atenuação quando há um aumento da chuva, mas o principal fato apresentado foi a intensidade do vento pois alterava consideravelmente a distribuição das folhas no tipo de árvore estudada.

Meng, Lee e Ng (2009b) fazem um estudo de um modelo de 4 camadas para transmissor e receptor dentro da floresta, neste os autores fazem uma comparação com modelos tradicionais, evidenciando que modelos como COST231 e ITU-R não apresentam bons resultados para regiões de floresta.

É importante salientar que apesar dos autores fazer uma abordagem para florestas tropicais, o cenário escolhido para medições é bem específico e não condiz com florestas naturais equatoriais e que, assim como no caso das florestas na Alemanha, não correspondem ao tipo de vegetação encontrado na floresta amazônica.

Este tópico torna-se importante para o presente trabalho uma vez que se pretende considerar a influência de condições ambientais/climáticas, em especial as chuvas e

umidade, no modelo de propagação proposto. É importante salientar que esta consideração não se dará de forma direta, mas sim de forma indireta na caracterização das constantes elétricas do solo seco e do solo úmido, informações já contempladas na recomendação ITU-R P. 527-3.

#### **4.4. Aplicações de técnicas de aprendizagem de máquina**

Uma grande quantidade de artigos aborda aplicações, comparações e melhoramentos de diferentes técnicas de aprendizagem de máquina nas mais diversas áreas do conhecimento.

Técnicas como KNN, *clustering*, agentes baseados em conhecimento, mineração de dados, entre outras são utilizadas na resolução de problemas envolvendo reconhecimento de voz e imagem aplicados à saúde, biologia, mercado financeiro, segurança, estudo de consumo dentre outros.

##### *4.4.1. Aplicações em classificação de imagem*

A análise e classificação de imagens utilizando KNN podem ser vistas num grande número de artigos.

Thessler et al. (2008) apresentam uma comparação de classificadores de imagem aplicada a identificação de tipos de florestas na Costa Rica. Neste trabalho os autores têm como objetivo classificar diferentes tipos de floresta visando conservação, manejo e sustentabilidade florestal. A floresta foi subdividida em quatro grupos levando em consideração o tipo de árvore e a idade média destas. Um KNN de  $k=3$ , e distância euclidiana foi aplicado a imagens de satélites de  $5 \times 5$  pixels. O KNN apresentou melhor o resultado dentre as técnicas de classificação utilizadas com precisão de 89%, cerca de 8% a mais que os outros métodos.

Pedronette, Penatti e Torres (2014) propõem um KNN que utiliza uma métrica diferente, nomenclaturada *Reciprocal KNN Graphs* para análise e classificação de imagens. Esta métrica difere das demais por considerar outras informações das imagens consideradas, como formato, cor e textura. O algoritmo proposto apresentou um ganho de até 37,99% na classificação quando comparado com outras técnicas.

Hung e Siu (2015) propõem um robusto e preciso KNN para a formação de um modelo autoregressivo para interpolação de imagens. Sun, Kang e Park (2015) também apresentam um KNN para tratamento de imagem. Os autores aplicaram o algoritmo

para classificação e marcação de rostos em imagens em “nuvem”.

#### 4.4.2. *Aplicações em detecção de doenças*

Em (SENGUR e TURKOGLU, 2008) é apresentado um classificador KNN fuzzy para determinar desordens das válvulas do coração. Foi utilizado o sinal de bulhas cardíacas Doppler para auxiliar diagnóstico. O híbrido proposto apresenta melhor resultado quando comparado com Redes Neurais Artificiais (RNA), *Support Vector Machines* (SVM) e Modelos *Hidden Markov* (MHM). Obteve correta taxa de classificação para 94% dos indivíduos normais e 95,9% para indivíduos anormais.

Bhuvanewari e Therese (2014) propõem um algoritmo híbrido de KNN com algoritmo genético para detecção de estágio inicial de câncer de pulmão. Os autores utilizam imagens de tomografias computadorizadas, pré-processamento de imagem e toolbox do Matlab para implementação do algoritmo. Os autores obtiveram entre 80% e 90% de sucesso.

#### 4.4.3. *Aplicações em análise de consumo*

Keramati et al. (2014) empregam diversas técnicas de aprendizado de máquina incluindo Árvore de Decisão (AD), RNA e SVM para previsão de rotatividade de clientes de uma empresa de telefonia do Irã. Os autores verificaram que uma técnica híbrida apresenta melhores resultados, com precisão acima de 95%.

Um modelo híbrido de *k-means clustering* e baseado em conhecimento é proposto por Huang e Kechadi (2013). Neste os autores obtêm bons resultados na determinação de rotatividade de clientes no setor de telecomunicações.

#### 4.4.4. *Comparações entre técnicas*

Velmurugan (2014) apresenta uma comparação entre dois algoritmos de clustering bastante conhecidos para classificação de dados de uma empresa de telecomunicações. Os algoritmos *K-means* e o *fuzzy C-means clustering* foram comparados apresentando seus prós e contras. O *K-means* por ser mais simples é mais rápido porém bastante susceptível a ruído, o *fuzzy C-means* apresenta resultados mais precisos devido sua robustez e complexidade.

Vafeiadis et al. (2015) apresentam um estudo comparativo de várias técnicas de aprendizagem de máquina aplicadas à rotatividade de clientes no ramo de telecomunicações. Os autores comparam RNA, AD, SVM, Naive Bayes e classificador de regressão logística utilizando dados disponíveis na internet e gerando dados

sintéticos através de simulações Monte Carlo. As duas melhores técnicas foram AD e RNA com duas camadas escondidas com precisão de 94%. SVM obteve precisão de 93%. Os piores desempenhos foram da naive Bayes e regressão logística com precisão de 86%.

#### **4.5. Considerações Finais**

Alguns modelos recentes que fazem considerações/correções para vegetação, critérios climáticos e os mais diferentes tipos de terrenos mistos foram comentados neste capítulo.

Cada modelo apresenta uma peculiaridade para o local estudado, mas observa-se que não há modelo que faça consideração da composição destes três critérios. Observa-se, ainda, que mesmo de forma isolada os modelos que contemplam um dos casos estudados não se adéquam às situações encontradas na região Amazônica, a qual possui grandes trechos de água doce, árvores de grande porte com altura média de 20 a 50 m (IDESAN, 2014) (inclusive em área urbana) e condições climáticas únicas apresentando apenas o período de chuvas (umidade muito alta) e o período de seca.

Uma grande variedade de aplicações das técnicas de AM, de modelos híbridos e variações destas foi encontrada na literatura. Na maioria dos casos foi visto que técnicas híbridas apresentam melhor desempenho por agregarem as melhores características de cada técnica para o problema abordado.

Não foram encontradas aplicações de técnicas de AM para modelos de modelos de rádio propagação.

## 5. Metodologia de Aquisição e Tratamento de Dados

Este capítulo descreve as duas campanhas de medições realizadas na Região Metropolitana de Belém (RMB), assim como a metodologia empregada na seleção aquisição e tratamento de dados.

Duas campanhas de medições foram realizadas ao longo de 2013, com o objetivo de adquirir informações sobre o nível do sinal de TV digital nos diferentes cenários e condições climáticas presentes na região amazônica.

### 5.1. Descrição das características climatológicas da Amazônia

A região amazônica apresenta condições climáticas e cenários bem peculiares. Apresenta apenas duas estações do ano: o inverno e o verão. O inverno amazônico também conhecido como período das chuvas caracteriza-se por chuvas muito fortes e de longa duração. O verão amazônico caracteriza-se por períodos de estiagem e aumento das temperaturas, podendo ocorrer pancadas rápidas de chuvas. A Tabela 5.1 evidencia essas diferenças. Além da imensa floresta amazônica, estão contidas nesta região rios caudalosos e cidades de grande porte.

Tabela 5.1. Dados Climatológicos de Belém

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago.	Set	Out	Nov	Dez
<b>Precipitação (mm)</b>	366,5	417,5	436,2	360,0	304,4	140,2	152,1	131,1	140,8	116,1	111,8	216,4
<b>Horas de sol</b>	136,4	98	102,3	123	186	225	254,2	257,3	228	229,4	204	179,8

Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

### 5.2. Seleção dos pontos de medição

Os pontos selecionados para medição estão distribuídos num cenário heterogêneo contendo trechos de áreas urbanas, suburbanas, de floresta e ainda, trechos sobre água doce (Baía do Guajará).

Objetivando analisar possíveis diferenças entre os níveis de sinal medidos sob condições climáticas distintas foram realizadas duas campanhas de medição ao longo do mesmo ano e nos mesmos pontos. A 1ª campanha foi realizada durante os meses de

março e abril durante o inverno amazônico, e a 2ª campanha ocorreu no mês de setembro durante o verão no ano de 2013.

Muitas formas de dispor os pontos foram discutidas. Levou-se em consideração as informações de campanhas de medição realizadas anteriormente. Nesta campanha de medições optou-se por distribuir os pontos em radiais de modo a cobrir a região metropolitana de Belém. A escolha por radiais deu-se por melhor representar a perda do sinal com a distância.

Duas emissoras de TV digital foram selecionadas para esta campanha de medições por apresentarem localizações próximas e frequências de operação adjacentes. A TX<sub>1</sub> é a (frequência central 521,14 MHz) e a TX<sub>2</sub> é a (frequência central 515,14 MHz) ambas com largura de banda de 6 MHz. Outras informações sobre as antenas transmissoras podem ser vistas na Tabela 5.2

Tabela 5.2. Informações das antenas transmissoras

Transmissora	Localização	Altura (m)	Faixa (MHz)	Potência de Operação (kW)	Potência Efetivamente Radiada (ERP) (kW)
TX1	01°27'43"S/ 48°29'28"O	114,58	518-524	6,00	52,15
TX2	01°27'12"S/ 48°29'22"O	125,30	512-518	10,00	61,79

Foram selecionados 84 pontos distribuídos em 14 radiais com origem na transmissora TX<sub>1</sub>. As radiais possuem quantidade de pontos diferentes uma vez que a TX<sub>1</sub> não se encontra centralizada no mapa de Belém. A geometria da cidade impossibilitou que algumas radiais tivessem mais de dois pontos com 1km de distância da emissora, pois Belém é circundada de água pela Baía do Guajará. A Tabela 5.3 mostra a quantidade de pontos em cada uma das radiais. A Fig. 5.1 ilustra a disposição das radiais (em azul), os eixos auxiliares que distinguem os quadrantes (em amarelo) e os limites geográficos da cidade. Portanto o 1º quadrante contém 4 radiais, o 2º quadrante contém 6 radiais e o 3º e 4º quadrantes possuem 2 radiais cada. Esta disposição leva em consideração os limites geográficos e a relevância e a quantidade de usuários em cada um dos quadrantes.



Fig. 5.1. Disposição dos pontos e radiais na RMB.

Tabela 5.3 Disposição dos pontos de medição ao longo das radiais

RADIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
QUANTIDADE	3	4	9	10	10	9	13	14	2	2	2	2	2	2

### 5.3. Campanhas de medições

A 1ª Campanha de medições foi realizada nos meses de março e abril de 2013, período selecionado por caracterizar o inverno amazônico. Em todos os pontos de medição foram coletados dados em ambiente nublado ou chuvoso das duas emissoras. A 2ª Campanha ocorreu no mês de setembro com dias bastante ensolarados caracterizando o verão amazônico.

#### 5.3.1. Equipamentos e Setup de medições

O *setup* de medições foi composto por um analisador de espectro portátil *Site Master S332E* da Anritsu (Fig. 5.2), uma antena dipolo da Anritsu MPP651A para a faixa de frequências entre 470MHz e 1700MHz e ganho de 0 dB (Fig. 5.3), um cabo coaxial RGC 213, com impedância característica de 50 Ohms e 3m de comprimento.

A antena foi instalada no teto do veículo com o auxílio de um tripé de alumínio, o cabo conectava a antena ao analisador de espectro no interior do veículo, Fig. 5.4. e 5.5. Um GPS e computador notebook foram utilizados para localização e armazenamento dos pontos respectivamente.



Fig. 5.2 Site Master S332E



Fig. 5.3. Antena dipolo Anritsu MPP651A



Fig. 5.4. Tripé e antena instalados no teto do veículo de passeio utilizado nas campanhas de medições



Fig. 5.5. Medição sendo realizada nas proximidades do lago Bolonha.

### 5.3.2. Realização das medições

As medições foram realizadas, na maioria das vezes, em grupos de três pessoas, uma dirigia o veículo, outra ficava responsável pela localização do ponto e a terceira pessoa ficava com o analisador de espectro para coletar os dados.

As primeiras medições foram realizadas com a antena fixada permanente ao teto do veículo, mas devido a alguns acidentes optou-se por recoloca-la em cada ponto de medição.

Em cada ponto a antena era redirecionada de modo a otimizar o sinal recebido, direcionando-a para a transmissora e afastando-a de situações de obstrução. Aguardava-se que o sinal estabilizasse em seguida a medição era realizada. Os dados eram armazenados em *pen drive* e na memória interna do equipamento.

## 5.4. Tratamento de dados

O analisador de espectro disponibiliza os dados em vários formatos, dentre estes dois foram escolhidos o *.spa* e o *.csv*.

O formato *spa* é próprio do programa que acompanha o *Site Master* e disponibiliza uma imagem do sinal na frequência e largura de banda estipuladas, este formato é interessante pois não contém uma simples figura, pois apresenta características dinâmicas para o usuário, possibilitando zoons, marcadores, escalas e etc. Fig. 5.6 exemplifica um arquivo em *spa*.

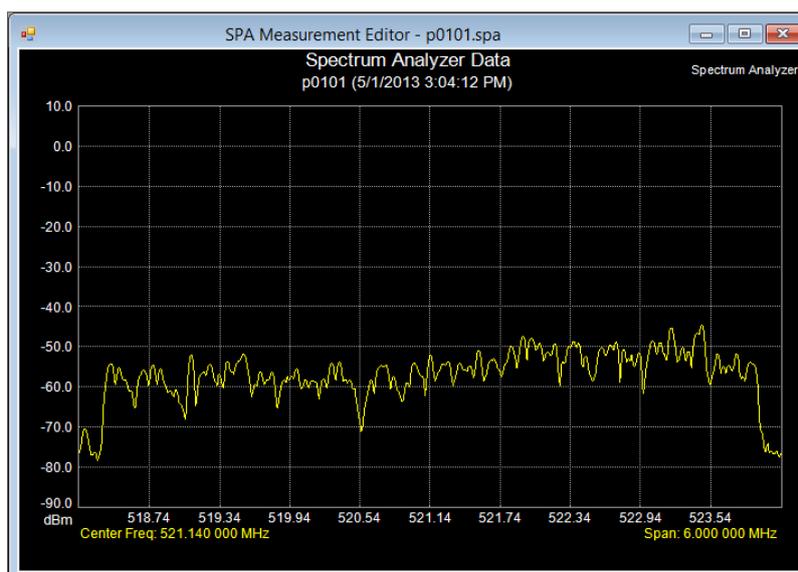


Fig. 5.6. Exemplo de arquivo spa das medições realizadas.

O formato csv, amplamente conhecido, disponibiliza dentre outros dados, uma planilha. Na medição realizada o arquivo contém 551 dados de potência respectivos a uma largura de banda de 6 MHz (Tx<sub>1</sub> variando de 518,14 a 524,14 MHz e Tx<sub>2</sub> variando de 512,14 a 518,14 MHz), além de muitas outras informações respectivas às características do equipamento.

Cada arquivo foi tratado de modo a conter apenas uma matriz  $2 \times 551$ , a primeira coluna respectiva às frequências e a segunda respectiva as potências. Em seguida foi calculada a média das potências e foram excluídos os *outliers* que são os dados que se distanciavam mais de duas vezes o desvio-padrão. Isto foi feito com intuito de armazenar apenas os dados referentes ao sinal e não a algum tipo de ruído.

Os dados já tratados podem ser utilizados diretamente nos modelos de propagação que utilizam potência, porem nos modelos que utilizam campo elétrico, como o P.1546-4, faz-se necessário o cálculo do campo elétrico dada a potência.

### 5.5. Intervalos de Confiança para os Dados Medidos

As Figs.5.7-5.9 ilustram os intervalos de confiança para os dados medidos. As barras verticais em cor magenta em cada ponto representam os intervalos de confiança sobre os dados medidos que estão em linha contínua azul. Cada ponto do gráfico representa a média das medidas no ponto considerado, e as barras verticais representam o intervalo entre dois desvios-padrões.

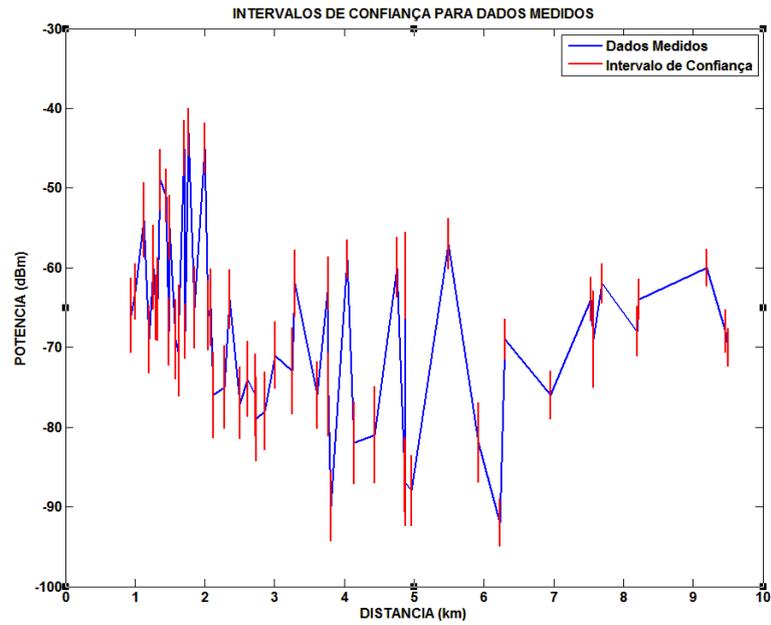


Fig. 5.7. Intervalos de confiança para dados medidos de 1 a 10 km.

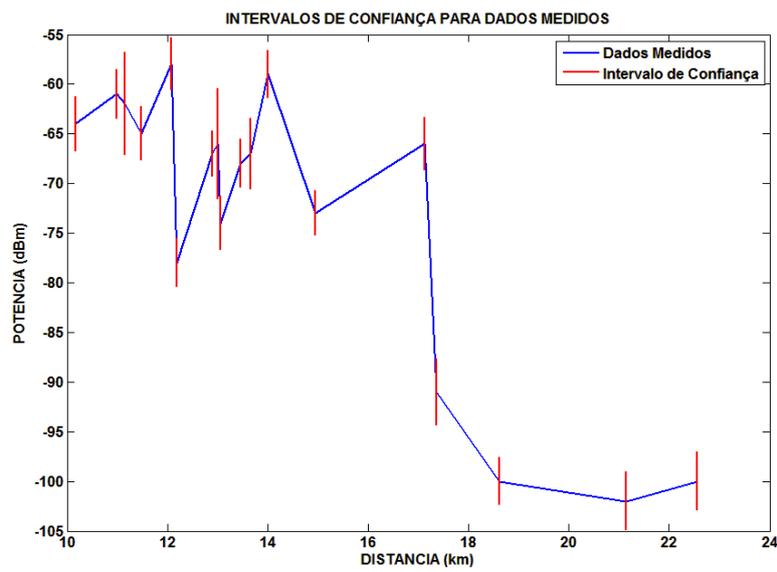


Fig. 5.8. Intervalos de confiança para dados medidos de 10 a 22 km.

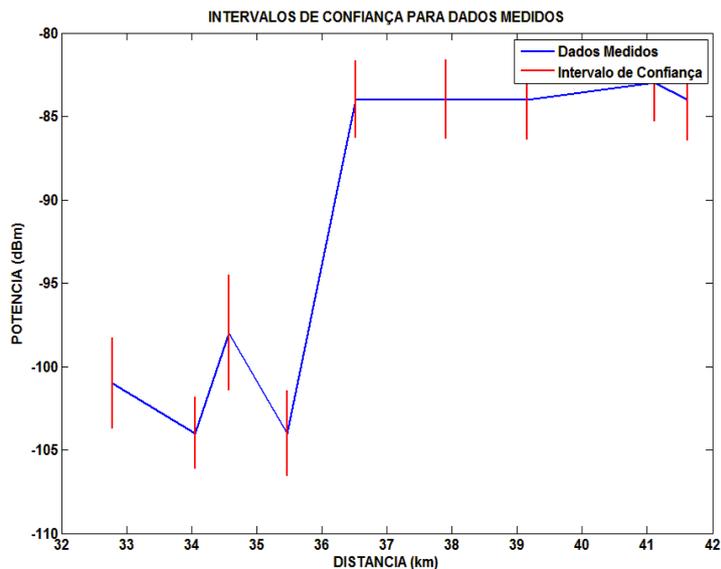


Fig. 5.9. Intervalos de confiança para dados medidos de 22 a 45km.

## 5.6. Cálculo do Campo Elétrico dada a Potência

Os cálculos e considerações da Recomendação ITU. R -P1546-4 são feitos com informações da intensidade de campo elétrico E, portanto faz-se necessária uma conversão, uma vez que os dados fornecidos pelo analisador de espectro são valores de potência dada em dBm.

Equação Geral (SAUNDERS, 1999):

$$L = P_T - P_R + G_T + G_R - L_T - L_R \quad (5.1)$$

Sendo:

L: Perda (dB);

$P_R$  : Potência recebida (dB);

$P_T$ : Potência transmitida (dB);

$G_T$ : Ganho da antena transmissora (dB);

$G_R$ : Ganho da antena receptora (dB);

$L_T$ : Perda na transmissora (dB);

$L_R$ : Perda na receptora (dB);

Características da transmissora Tx1:

Potência de Operação: 6,0 kW

Atenuação total (cabo+conectores):  $L_T = 1,709$  dB

Potência efetiva irradiada máxima:  $P_{ERP} = 52,15$  kW

Passando para escala logarítmica:

$$P_{ERP} = P_T + G_T = 10 \log_{10} 52150 = 47,1725 \text{ dB}$$

Frequência de operação:  $f = 521,14$  MHz = 0,52114 GHz

Características da receptora:

Ganho:  $G_R = 0$  dB (dipolo)

Perda (cabo+conectores):  $L_R = 1,62$  dB

Substituindo os valores em (5.1):

$$L = 47,1725 - P_R + 0 - 1,709 - 1,62 \quad (5.2)$$

Logo

$$L(\text{dB}) = 43,8435 - P_R \quad (5.3)$$

A perda em função do campo pode ser encontrada em Li et al. (1999).

$$L(\text{dB}) = 36,57 + 20 \log_{10} f(\text{GHz}) + 20 \log_{10} |E_0| - 20 \log_{10} |E| \quad (5.4)$$

A equação do Campo de Referência é dada por:

$$E_0 = \frac{173 \sqrt{P_{ERP}}}{d} \text{ mV/m} \quad (5.5)$$

Sendo:

$P_{ERP}$ : Potência efetiva irradiada máxima (W);

$d$ : Distância (km).

Substituindo:

$$E_0 = 39506927 (\mu\text{V/m}) \quad (4.6)$$

Passando para escala logarítmica:

$$E_0 = 20 \log_{10} 39506927 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$$

$$E_0 = 151,93 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$$

Substituindo os valores de em (5.4)

$$L(dB) = 36,57 - 5,661 + 151,93 - E(dB(\mu V/m))$$

$$L(dB) = 182,84 - E(dB(\mu V/m))$$

Igualando as equações:

$$43,8435 - P_R = 182,84 - E(dB(\mu V/m))$$

$$E(dB(\mu V/m)) = 138,99 + P_R(dB)$$

$$E(dB(\mu V/m)) = 168,99 + P_R(dBm) \tag{5.7}$$

### 5.7. Considerações Finais

Este capítulo apresentou a metodologia de aquisição de dados, os aspectos levados em consideração para disposição dos pontos de medição, procedimentos e tratamento de dados.

## 6. Modelo de Rádio Propagação para Diferentes Condições Climáticas Baseado em Função de Green Diádica

Este capítulo apresenta um modelo de rádio propagação determinístico para faixa de frequência de 470 MHz a 900MHz baseado na Função de Green Diádica (FGD) que é capaz de modelar os níveis de potência recebida para condições climáticas distintas (Gomes et al., 2015). Este modelo corroborou para a comprovação da hipótese de que há uma distinção entre os níveis de sinal de TV digital submetidos a condições climáticas diferentes. Os dados obtidos nas campanhas de medições descritas no capítulo 4 foram utilizadas para validar o modelo.

Diádicas são matrizes que têm a capacidade de armazenar muita informação numa notação compacta e simples. Sua simplicidade simbólica as torna atrativas na resolução de problemas complexos de eletromagnetismo. As FGD são baseadas nas equações de Maxwell da Teoria Eletromagnética.

### 6.1. Breve histórico da utilização da Função de Green Diádica (FGD)

Tamir (1967) e Tai (1971) foram precursores no uso destas para o estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em meio semi-infinito.

As FGD têm se mostrado uma importante ferramenta na resolução de problemas envolvendo fenômenos de propagação, radiação e espalhamento eletromagnético. Vários trabalhos abordam a utilização das FGD no estudo da radiação característica de uma antena dipolo num meio com diferentes camadas (CAVALCANTE; ROGERS; GIAROLA, 1982; CAVALCANTE; GIAROLA, 1983; LIAO; SARABANDI, 2005).

Muitos trabalhos em rádio propagação que utilizam FGD abordam aplicações na atenuação do sinal em ambiente de floresta numa faixa de frequência de 30 MHz a 300MHz. Os primeiros modelos consideram duas camadas com percurso semi-infinito coberto por vegetação semi-infinita (TAMIR, 1967); outros modelos apresentam três camadas com uma camada de vegetação entre solo semi-infinito e espaço livre (CAVALCANTE; ROGERS; GIAROLA, 1982; CAVALCANTE; GIAROLA, 1983;

SILVA et al., 2014); outros, ainda, admitem quatro camadas: espaço livre, a copa das árvores, o tronco e o solo de uma floresta (CAVALCANTE; ROGERS; GIAROLA, 1983; LI; JIAO, 1986).

## 6.2. Conceito de Função Diádica de Green

Uma diádica ou função diádica é uma matriz formada pelo produto de dois vetores, comumente denotada por  $\bar{\bar{D}}$ . É definida por:

$$\bar{\bar{D}} = \bar{A}\bar{B} \quad (6.1)$$

sendo  $\bar{A}$  um vetor coluna, definido como elemento anterior de  $\bar{\bar{D}}$  e  $\bar{B}$  um vetor linha, definido como elemento posterior de  $\bar{\bar{D}}$  (TAI, 1971).

As componentes de  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  em coordenadas retangulares são dadas por:

$$\bar{\bar{D}} = \begin{pmatrix} A_x B_x & A_x B_y & A_x B_z \\ A_y B_x & A_y B_y & A_y B_z \\ A_z B_x & A_z B_y & A_z B_z \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

ou

$$\begin{aligned} \bar{\bar{D}} = & A_x B_x \hat{x}\hat{x} + A_x B_y \hat{x}\hat{y} + A_x B_z \hat{x}\hat{z} + A_y B_x \hat{y}\hat{x} + A_y B_y \hat{y}\hat{y} \\ & + A_y B_z \hat{y}\hat{z} + A_z B_x \hat{z}\hat{x} + A_z B_y \hat{z}\hat{y} + A_z B_z \hat{z}\hat{z} \end{aligned} \quad (6.3)$$

A função diádica pode ser considerada como uma função composta que tem a capacidade de armazenar três funções vetoriais.

## 6.3. Formulação analítica da FGD

Considere uma estrutura de n camadas com uma fonte localizada em (0,0,z') num sistemas de coordenadas cilíndricas, Fig.6.1.

Por conveniência, a constante de propagação utilizada na formulação é dada por:

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon \left(1 + j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)} \quad (6.4)$$

sendo

$\omega$  a frequência angular;

$\mu_0$  a permeabilidade magnética;

$\varepsilon$  a permissividade do meio;

$\sigma$  a condutividade do meio.

A fonte de corrente e o campo eletromagnético associado possuem variação no tempo ( $e^{-j\omega t}$ ), que ficará implícita.

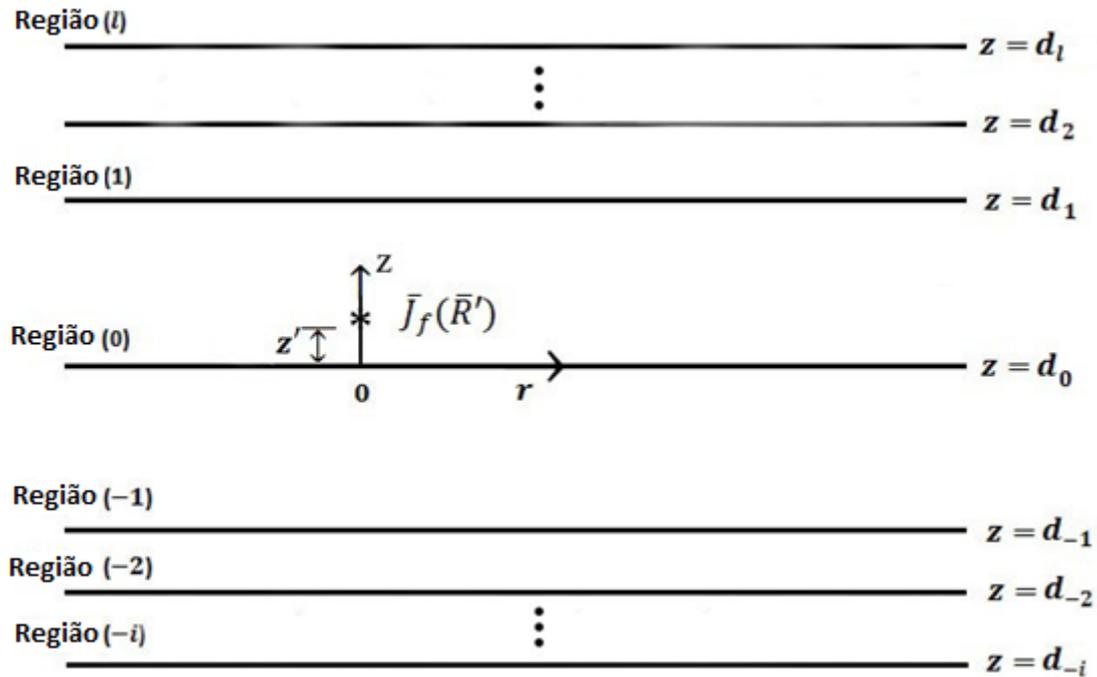


Fig. 6.1. Configuração geométrica de uma estrutura de n camadas.

A equação da onda para um campo elétrico numa dada região ou numa camada  $p$ , com uma fonte localizada em  $f$  ( $p, f = -i, \dots, -1, 0, 1, \dots, l$ ), é dada por

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}_p - k_p^2 \vec{E}_p = j\omega\mu_f \vec{J}_f \delta_p^f \quad (6.5)$$

sendo

$\vec{E}_p$  o campo elétrico na camada  $p$ ;

$k_p$  a constante de propagação na camada  $p$ ;

$\mu_f$  a permeabilidade magnética do meio onde a fonte está localizada;

$\vec{J}_f$  a densidade de corrente elétrica;

$\delta_p^f$  o delta de Kronecker.

A FGD para os tipos elétrico e magnético num ponto de observação  $\vec{R}$ , numa camada  $p$ , devido a fonte localizada em  $\vec{R}'$ , na camada  $f$ , é expressa como  $\vec{G}_{ep}(\vec{R}/\vec{R}')$  e

$\bar{G}_{mp}(\bar{R}/\bar{R}')$ , respectivamente. Além disso as funções elétricas e magnéticas para FGD devem satisfazer as condições de radiação no infinito de Sommerfeld, dadas por:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R[\nabla \times \bar{G} - jk\bar{R} \times \bar{G}] = 0 \quad (6.6)$$

Quando usado o teorema do vetor de Green o campo elétrico pode ser expresso por (Tai,1971):

$$\bar{E}_p(\bar{R}) = j\omega\mu_f \iiint \bar{G}_{ep}(\bar{R}/\bar{R}') \cdot \bar{J}_f(\bar{R}') dv' \quad (6.7)$$

Sendo  $v'$  é o volume da fonte onde é feita a integração.

#### 6.4. Modelo de três camadas para diferentes condições climáticas

O modelo descrito neste item estima o campo elétrico e a potência recebida para faixa de UHF numa formulação com três camadas (solo equivalente, edificação/vegetação e ar) priorizando as informações das condições climáticas do meio considerado. Na formulação matemática das FGD as condições climáticas do meio podem ser alteradas através da modificação dos valores de permissividade e condutividade do meio, Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Constantes elétricas para as duas estações do ano

Condição Climática	Permissividade Relativa ( $\epsilon_R$ )	Condutividade ( $\sigma$ )(mS/m)
Inverno amazônico	10	0,01
Verão amazônico	3	0,0001

A notação  $\bar{G}_i^{(sf)}(\bar{R}/\bar{R}')$  com  $s, f = 1,2,3, \dots$  e  $i = 1,2,3$  e 4 será usada para expressar a FGD que é solução da seguinte equação diferencial parcial:

$$\nabla^2 \bar{G}_i^{(sf)}(\bar{R}/\bar{R}') + k^2 \bar{G}_i^{(sf)}(\bar{R}/\bar{R}') = \begin{cases} \bar{I} \delta(\bar{R} - \bar{R}') & , s = f \\ 0 & , s \neq f \end{cases} \quad (6.8)$$

sendo  $\bar{I}$  a diádica unitária e  $\delta$  é a função delta de Dirac definida num domínio D por

$$\delta(\bar{R} - \bar{R}') = \delta(\bar{R}' - \bar{R}) = \begin{cases} \infty, & \bar{R} = \bar{R}' \\ 0, & \bar{R} \neq \bar{R}' \end{cases} \quad (6.9)$$

O campo elétrico foi calculado utilizando informações da fonte de corrente ( $\bar{J}_H$ ) e dos dados que caracterizam cada camada. O meio 1 tem constante de propagação  $k_1$ , permeabilidade magnética  $\mu_0$ , permissividade  $\epsilon_1 = \epsilon_0$  e condutividade  $\sigma_1$  (espaço livre); o meio 2 tem constante de propagação  $k_2$ , permeabilidade magnética  $\mu_0$ , permissividade  $\epsilon_2$  e condutividade  $\sigma_2$ ; o meio 3 é um meio dielétrico com perdas,

homogêneo com constante de propagação  $k_3$ , permeabilidade magnética  $\mu_0$ , permissividade  $\epsilon_3$  e condutividade  $\sigma_3$ . A Fig. 6.2 ilustra a situação estudada. No meio 2 uma permissividade e uma condutividade equivalentes foram consideradas, i.e. um valor médio destes para o cenário com edificações e vegetação, Tabela 6.2.

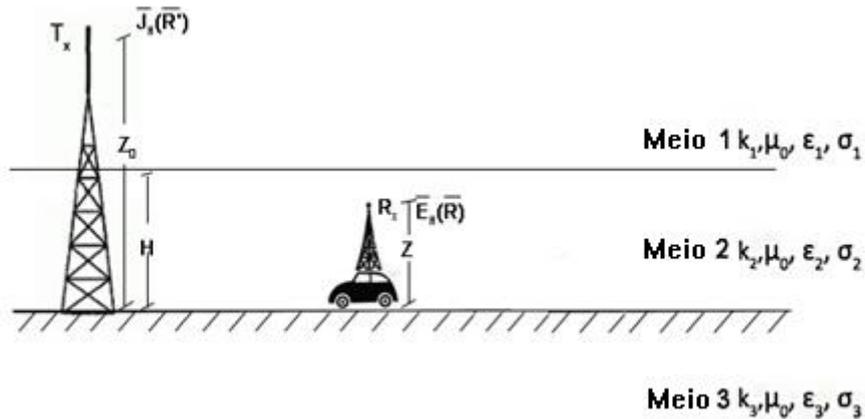


Fig. 6.2. Representação gráfica da situação.

Tabela 6.2. Constantes elétricas para o meio 2

Permissividade Relativa		Condutividade ( $\sigma$ )(mS/m)	
Floresta ( $\epsilon_F$ )	1,1	Floresta ( $\sigma_F$ )	0,1
Estrada e edifícios ( $\epsilon_{RB}$ )	2,7	Estrada e edifícios ( $\sigma_{RB}$ )	40
Meio 2 ( $\epsilon_2$ )	$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_F + \epsilon_{RB}}{2} = 1,9$	Meio 2 ( $\sigma$ )	$\sigma_2 = \frac{\sigma_F + \sigma_{RB}}{2} = 20,05$

O campo elétrico ( $\vec{E}_H$ ) é calculado para um campo distante para todos os pontos ( $\vec{R}$ ) do espaço. O ponto de observação ( $\vec{R}$ ) passa a ser  $(\rho, \phi, z)$  em coordenadas cilíndricas. Admitindo um campo distante o valor de  $z$  torna-se desprezível com relação à  $\rho$ .

As constantes de propagação para os meios são:

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}; \quad k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_2 \left(1 + j \frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_2}\right)} \quad e \quad k_3 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_3 \left(1 + j \frac{\sigma_3}{\omega \epsilon_3}\right)} \quad (6.10)$$

A fonte de corrente está situada no meio 1, abaixo do ponto de observação ( $\vec{R}$ ) (paralelo ao plano contendo o solo), no qual o campo elétrico é calculado. Portanto, a função de Green será uma função na variável  $\lambda$ , dada por

$$\bar{G}_3^{(21)}(\bar{R}/\bar{R}') = \frac{j}{4\pi} \int_0^\infty \frac{d\lambda}{\lambda h_1} \sum_{n=0}^\infty (2 - \delta_0) \{ [a\bar{M}_{\delta n\lambda}(h_2) + b\bar{M}_{\delta n\lambda}(-h_2)] \bar{M}'_{\delta n\lambda}(h_1) + [c\bar{N}_{\delta n\lambda}(h_2) + d\bar{N}_{\delta n\lambda}(-h_2)] \bar{N}'_{\delta n\lambda}(h_1) \} \quad (6.11)$$

sendo

$$h_1 = \sqrt{k_1^2 - \lambda^2} \quad (6.12)$$

$$h_2 = \sqrt{k_2^2 - \lambda^2} \quad (6.13)$$

$$\bar{M}_{\delta n\lambda}(h) = \left[ \pm \frac{nJ_n(\lambda r)}{r} \frac{\sin(n\theta\hat{r})}{\cos(n\theta\hat{\phi})} - \frac{\partial J_n(\lambda r)}{\partial r} \frac{\cos(n\theta\hat{\phi})}{\sin(n\theta\hat{\phi})} \right] e^{jhz} \quad (6.14)$$

$$\bar{N}_{\delta n\lambda}(h) = \frac{1}{k_\lambda} \left[ jh \frac{\partial J_n(\lambda r)}{\partial r} \frac{\cos(n\theta\hat{r})}{\sin(n\theta\hat{\phi})} \mp \frac{jhn}{r} J_n(\lambda r) \frac{\sin(n\theta\hat{\phi})}{\cos(n\theta\hat{\phi})} + \lambda^2 J_n(\lambda r) \frac{\cos(n\theta\hat{z})}{\sin(n\theta\hat{z})} \right] e^{jhz} \quad (6.15)$$

Observando que  $J_n$  é a função de Bessel de ordem  $n$ ,  $\delta_0$  é o delta de Kronecker ( $\delta_0 = 1$  para  $n = 0$  e  $\delta_0 = 0$  para  $n \neq 0$ ). As constantes  $a, b, c$  e  $d$  são determinadas pelas condições de contorno.

O campo elétrico é determinado por

$$\bar{E}_H(\bar{R}) = j\omega\mu_0 \iiint \bar{G}^{(11)}(\bar{R}/\bar{R}') \cdot \bar{J}_H(\bar{R}') dV' \quad (6.16)$$

Usando o momento de corrente  $\bar{p}$  a densidade de corrente elétrica do dipolo pode ser expressa por

$$\bar{J}_H(\bar{R}') = \bar{p}\delta(x-0)\delta(y-0)\delta(z-z_0) \quad (6.17)$$

Introduzindo (6.10), (6.14), (6.15) e (6.17) em (6.16), o modelo proposto é dado por

$$\bar{E}_H(\bar{R}) = -\frac{\omega\mu_0\bar{p}}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{jh_1z_0}}{h_1} \left\{ [a\bar{M}_{o_{1\lambda}}(h_2) + b\bar{M}_{o_{1\lambda}}(-h_2)] + [c\bar{N}_{e_{1\lambda}}(h_2) + d\bar{N}_{e_{1\lambda}}(-h_2)] \frac{jh_1}{k_1} \right\} d\lambda \quad (6.18)$$

A completa determinação do campo dado em (6.18) inicia com a resolução da forma integral da FGD. Uma mudança de variáveis é aplicada para obter os termos de integração  $k_\rho$  e as funções de Bessel. Como o cálculo numérico destas expressões é muito lento devido ao caráter oscilatório das funções de Bessel e a presença de

singularidades faz-se necessária a aproximação assintótica das soluções (Silva, 2014). O primeiro e o segundo tipo das funções de Hankel's foram utilizadas para calcular o campo elétrico num campo distante.

Uma abordagem convencional é calcular o campo distante através do método do ponto de sela (CAVALCANTE, 1982). Isto só pode ser feito introduzindo a seguinte transformação

$$\lambda = k_1 \text{sen } v \quad (6.19)$$

A qual mapeia o caminho de integração ao longo do eixo real do plano  $P_0$ . No plano complexo  $v = v' + jv''$ . A seguinte equação é obtida

$$h_i = k_1 \sqrt{n_i^2 - \text{sen}^2 v} \quad (6.20)$$

sendo

$$n_i = \frac{k_i}{k_1}, \quad i = 1 \text{ e } 2 \quad (6.21)$$

Por fim, o campo elétrico pode ser dado por:

$$\begin{aligned} \bar{E}_H(\bar{R}) = \frac{\bar{c} e^{-j\frac{\pi}{4}}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{h_1^2 \text{sen } v}{k_1} [e^{jh_1(z_0-z)} - b e^{jh_1(z_0+z)}] \right. \\ \left. + k_1 \text{sen } v [-e^{jh_1(z_0-z)} \right. \\ \left. - a e^{jh_1(z_0+z)}] \right\} \sqrt{\frac{2}{\pi k_1 r \text{sen } v}} e^{jk_1 r \text{sen } v} dv \end{aligned} \quad (6.22)$$

Sendo

$$\bar{c} = -\frac{\omega \mu_0 \bar{p}}{4\pi};$$

$z$  a altura da antena receptora;

$z_0$  a altura da antena transmissora.

## 6.5. Resultados do Modelo de FGD

O modelo apresentado foi codificado em Matlab e utiliza dados da RMB para as entradas e validação do modelo. Suas entradas são as características das antenas transmissoras e receptoras, a constante elétrica e as constantes de propagação do meio. Suas saídas são as funções que descrevem o campo elétrico.

As Figs. 6.3 e 6.4 ilustram a comparação entre os dados medidos e o modelo FGD com antenas transmissoras Tx1 e Tx2 respectivamente nas duas estações do ano: o inverno e o verão amazônicos. Os erros RMS foram calculados através da comparação entre os dados medidos e os resultados do modelo. Os erros RMS e a média das diferenças entre as curvas podem ser vistos na Tabela 6.3. Os maiores níveis de sinal são observados para o solo úmido em todos os casos, isto evidencia que o modelo acompanha a tendência dos dados medidos. Os erros RMS para o solo úmido são 5 dB para TX1 e 3,3 dB para Tx2. Para o solo seco os erros RMS são de aproximadamente 2 dB. Em ambos os casos os erros podem ser considerados aceitáveis uma vez que os dados medidos apresentam uma grande variabilidade, com desvio padrão da ordem de 13 dB.

A comparação da diferença média entre as curvas fornece outro importante resultado que pode ser utilizado na validação do modelo (Fig.6.5 e Fig.6.6). A diferença média entre as curvas obtidas com o modelo de FGD é 10,5 dB, valor próximo ao obtido com as tendências logarítmicas dos dados medidos (12,6 dB para Tx1 e 11,8 dB para Tx2). Essa diferença média entre as curvas mostra a capacidade do modelo em distinguir as duas condições climáticas estudadas.

Tabela 6.3. Erros e Diferença média entre as curvas

<b>Erros e Diferenças</b>	<b>Tx1</b>	<b>Tx2</b>
RMS (solo úmido) (dB)	4,97	3,31
RMS (solo seco) (dB)	2,13	2,53
Diferença média entre tendências logarítmicas dos dados medidos (dB)	12,58	10,87
Diferença média entre as curvas do modelo FGD (dB)	10,18	11,80

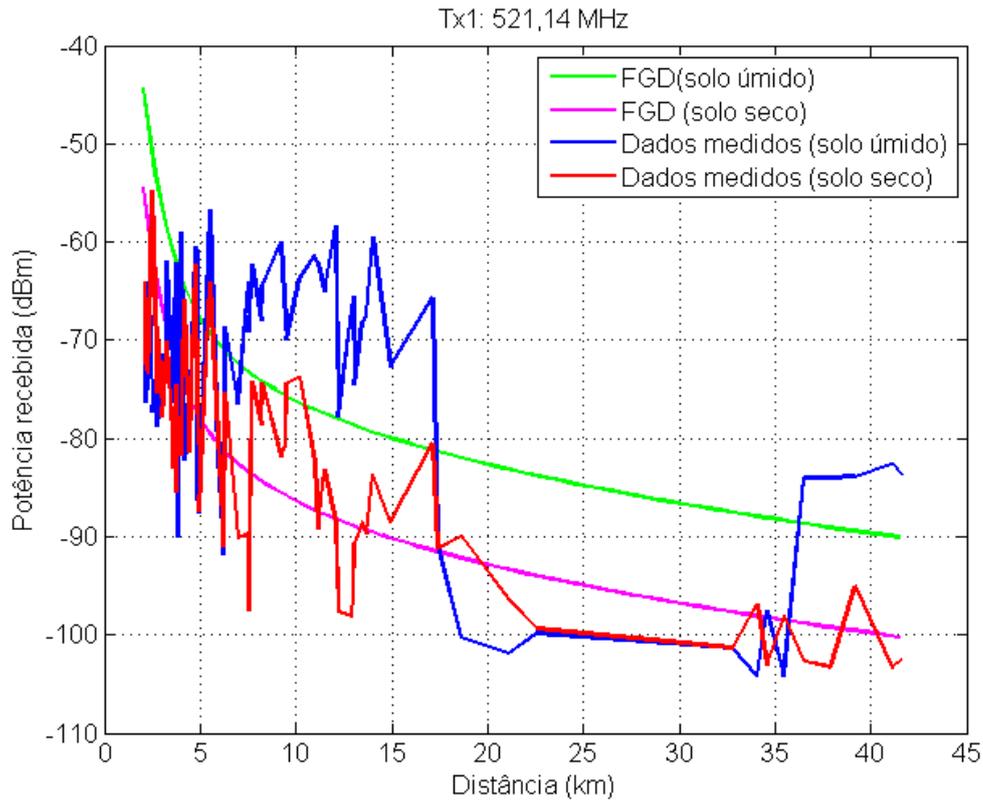


Fig.6.3. Comparação entre os dados medidos e o modelo de FGD para os solos úmido e seco para Tx1.

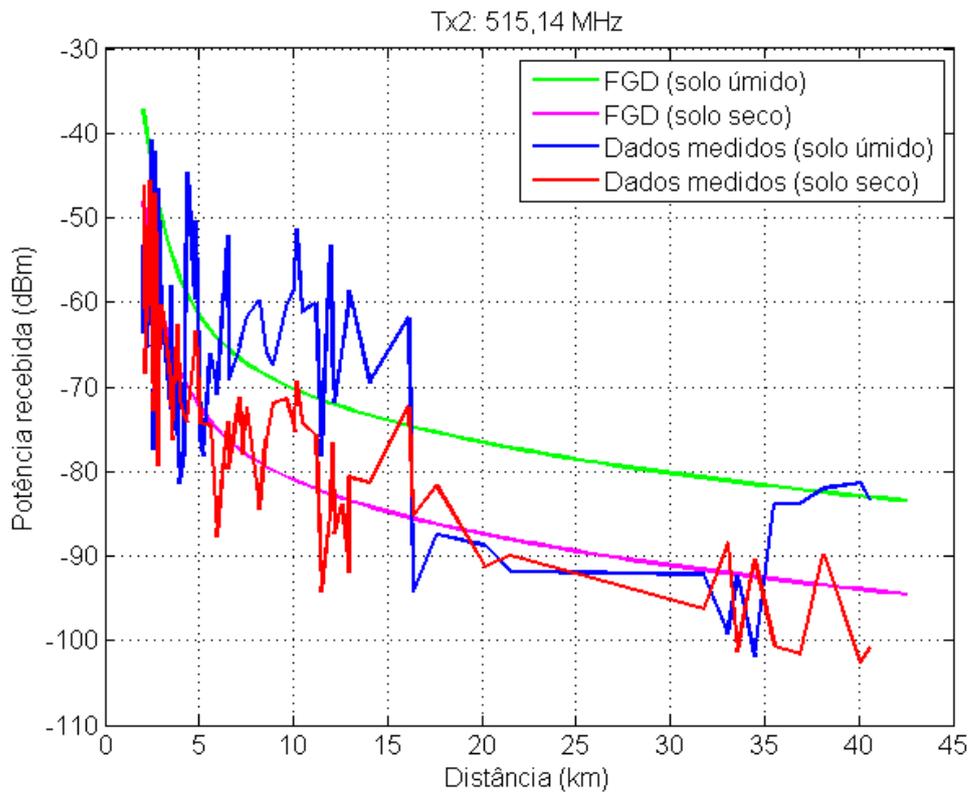


Fig.6.4. Comparação entre os dados medidos e o modelo de FGD para os solos úmido e seco para Tx2.

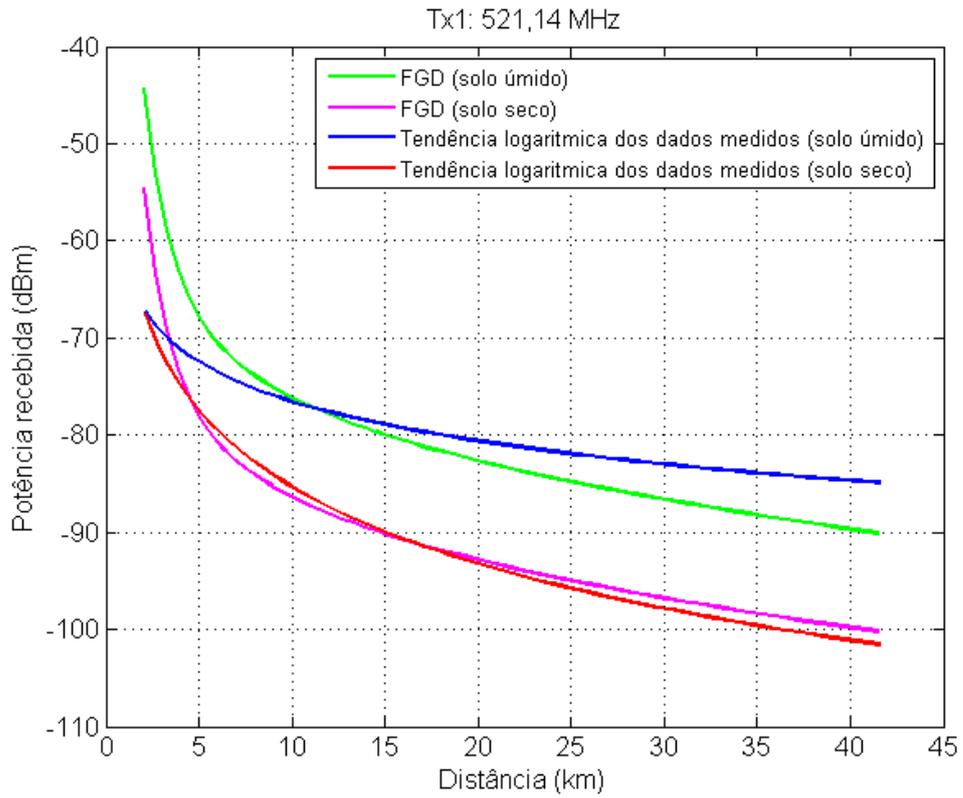


Fig. 6.5. Comparação entre a tendência logarítmica dos dados medidos e o modelo FGD para Tx1.

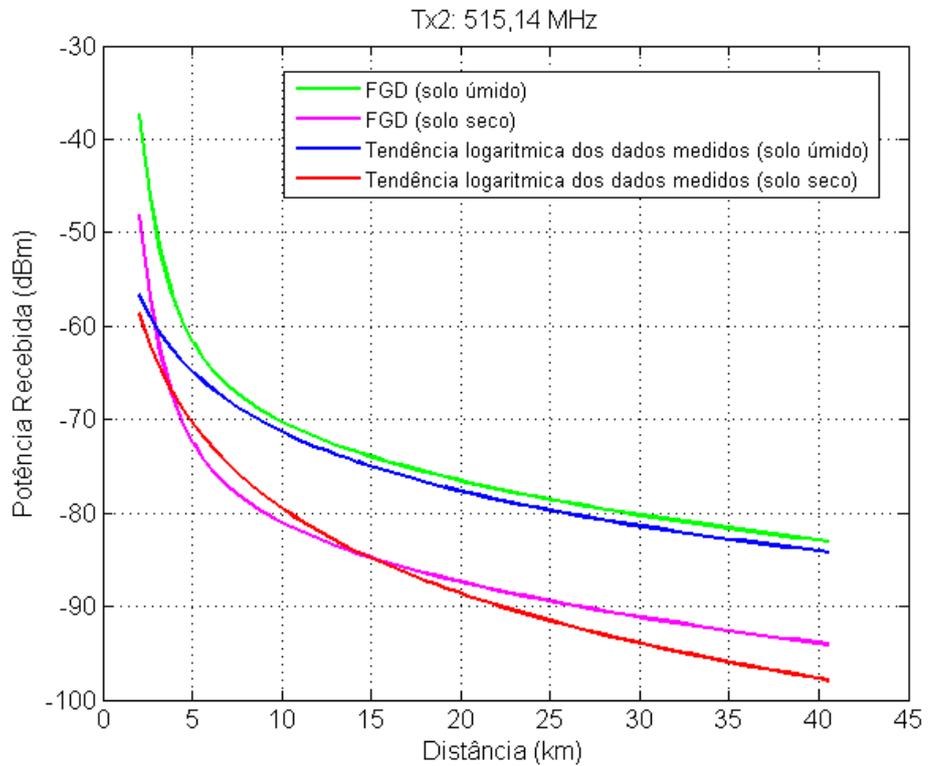


Fig.6.6. Comparação entre a tendência logarítmica dos dados medidos e o modelo FGD para Tx1.

## **6.6. Considerações finais**

Este capítulo mostrou um modelo de propagação outdoor para UHF inovador pois, tem a capacidade de admitir, através de suas entradas, as condições climáticas do meio.

As soluções das FGD foram obtidas através de sua expansão em autofunções para predição do campo eletromagnético para as duas estações do ano na região amazônica. Dentre as principais vantagens estão: i) a precisão da expansão em autofunções; ii) flexibilidade na inserção de dados referentes ao terreno e às condições climáticas; iii) a possibilidade de aplicação em meios isotrópicos ou anisotrópicos.

## 7. Modelo de Rádio Propagação em UHF para Ambientes Não Homogêneos e Climas Distintos Utilizando Técnica de Aprendizagem de Máquina

O presente capítulo apresenta o modelo proposto e todas as etapas de sua elaboração, assim como a teoria e a implementação deste. São apresentados, ainda, os resultados obtidos pelo modelo proposto, comparações com modelos tradicionais empíricos e determinísticos, e análise de erros.

Os modelos de propagação clássicos não apresentam resultados satisfatórios para percursos urbanos densamente arborizados com grandes porções de água doce, como os presentes na região amazônica (GOMES et al., 2012b).

A principal hipótese deste trabalho alicerça-se em introduzir informações do clima e da morfologia do terreno para melhor determinar a potência recebida em qualquer ponto do percurso estudado.

Diferentes técnicas de IA foram escolhidas para embasamento teórico e computacional por apresentarem a capacidade de introduzir, organizar e descrever dados quantitativos e qualitativos de maneira rápida e eficiente, possibilitando a determinação da potência recebida em uma diversidade muito grande de cenários e climas.

O modelo proposto é um algoritmo híbrido de KNN's e BC's, onde inicialmente cada ponto do cenário recebe uma classificação de seus atributos, e em seguida, baseado nessas informações, é calculado um valor de potência recebida.

Para melhor entendimento do modelo proposto optou-se por apresentar cada um dos subproblemas e seus resultados para posteriormente apresentar e discutir o modelo completo.

### 7.1. Organização e Classificação dos Dados de Entrada

A primeira parte da elaboração do modelo é a descrição, organização e análise dos tipos de terrenos e climas estudados.

Cada ponto medido do terreno recebeu seis atributos, portanto é um vetor de seis componentes. Os atributos relacionados à morfologia do terreno foram dados conforme o que se observa nas proximidades do ponto. Estas informações foram coletadas *in loco* e com imagens de satélite disponíveis em programas livres.

Os atributos são:

- Morfologia do terreno
  - Edificação
  - Vegetação
  - Passagem por trechos de água doce
- Estação do ano
- Perda de propagação em função da distância ao transmissor.
- Potência estimada em um ponto qualquer

Inicialmente pensou-se num atributo único que descrevesse simultaneamente edificação e vegetação. Porém logo se percebeu que isto acarretaria em alguns problemas, o primeiro, e mais evidente, é um número muito grande de possibilidade de notas, uma vez que um terreno poderia ser considerado, por exemplo, densamente urbano e densamente arborizado, características que na maioria das cidades seria inconsistente, porém na cidade em que o modelo foi aplicado (Belém) é muito presente.

As informações qualitativas adquiridas com as campanhas foram organizadas em notas, sendo que cada atributo recebe uma nota diferente num intervalo diferente. Os atributos de morfologia do terreno recebem notas em valores inteiros nos seguintes intervalos: Edificação [1,5]; Vegetação [1,4]; Passagem de água doce [0,1]. O atributo de estação do ano recebe notas inteiras [0,1]. A descrição e as notas atribuídas a cada atributo estão na Tabela 6.1.

As informações quantitativas foram inseridas no vetor através de equação, no caso da perda com a distância e de um KNN regressor generalizado no caso da potência estimada.

Tabela 6.1. Descrição dos atributos e notas associadas

	<b>ATRIBUTO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>NOTA</b>
<b>1</b>	Edificação	Espaço livre	1
		Poucas casas ou de pequeno porte	2
		Muitas casas ou casas de médio porte	3
		Pequenas edificações	4
		Grandes edificações	5
<b>2</b>	Vegetação	Sem vegetação	1
		Poucas árvores	2
		Muitas árvores	3
		Floresta	4
<b>3</b>	Passagem de água doce	Ausência de rios/lagos	0
		Após rios/lagos	1
<b>4</b>	Estação do ano	Verão	0
		Inverno	1
<b>5</b>	Perda de propagação	Equação do modelo de perda no espaço livre	-
<b>6</b>	Potência estimada	Atribuição do valor da potência considerando a proximidade com um ponto medido	-

## 7.2. Técnicas Utilizadas no Modelo Proposto

O modelo proposto é uma composição de três KNN's e dois BC's. Esta distinção entre os tipos de técnicas se deu em virtude do tipo de dados de entrada obtidos nas campanhas de medição.

O KNN foi escolhido por apresentar a dupla característica que é de classificador e regressor generalizado. O BC foi escolhido por descrever os fatos em regras de inferência e assim podendo deduzir novas informações.

O KNN atua como classificador na análise dos dados de edificação e vegetação, utilizando a distância Euclidiana e  $K=1$ , tecendo o diagrama de Voronoi para cada atributo. Este atua como regressor generalizado no caso do cálculo da potência recebida num ponto qualquer próximo a um ponto medido. Nos dois casos os 84 pontos medidos foram utilizados como pontos de treinamento.

O BC foi utilizado nos atributos estação do ano e passagem por água doce. O atributo estação do ano foi amplamente discutido no capítulo 5 apresentando uma diferença de aproximadamente 10 dB nas potências recebidas considerando as estações de verão e inverno amazônicos, tanto para dados medidos como para o modelo determinístico utilizado. Foi observado que há um aumento da potência recebida após trechos com rios e lagos como vê-se em (GOMES et al., 2012b, MAYRINK et al., 2006), no caso do cenário estudado se observou que este aumento é de cerca de 3 dB. Sendo assim foram elaboradas as seguintes regras:

- Se a estação for inverno então acrescenta 10 dB ao cálculo da potência recebida, caso contrário não acrescenta nada.
- Se o ponto for após água doce então acrescenta 3 dB ao cálculo da potência recebida, caso contrário não acrescenta nada.

### **7.3. Análise dos tipos de terrenos**

#### *7.3.1. Edificação*

A Fig. 6.1 (a) ilustra as quantificações obtidas in loco do atributo edificação. Uma pequena porção em roxo (canto superior esquerdo) é área densamente urbana (nota 5), trechos em vermelho apresentam muitas casas e grandes edificações de forma mais espaçada (nota 4), áreas em laranja apresentam muitas casas de médio porte (nota 3), áreas em amarelo apresentam casas de pequeno porte (nota 2) e por fim, áreas em verde não apresentam edificações (nota 1).

A Fig. 6.1 (b) ilustra o diagrama de Voronoi para o atributo edificação obtido a partir dos 84 dados de treinamento.

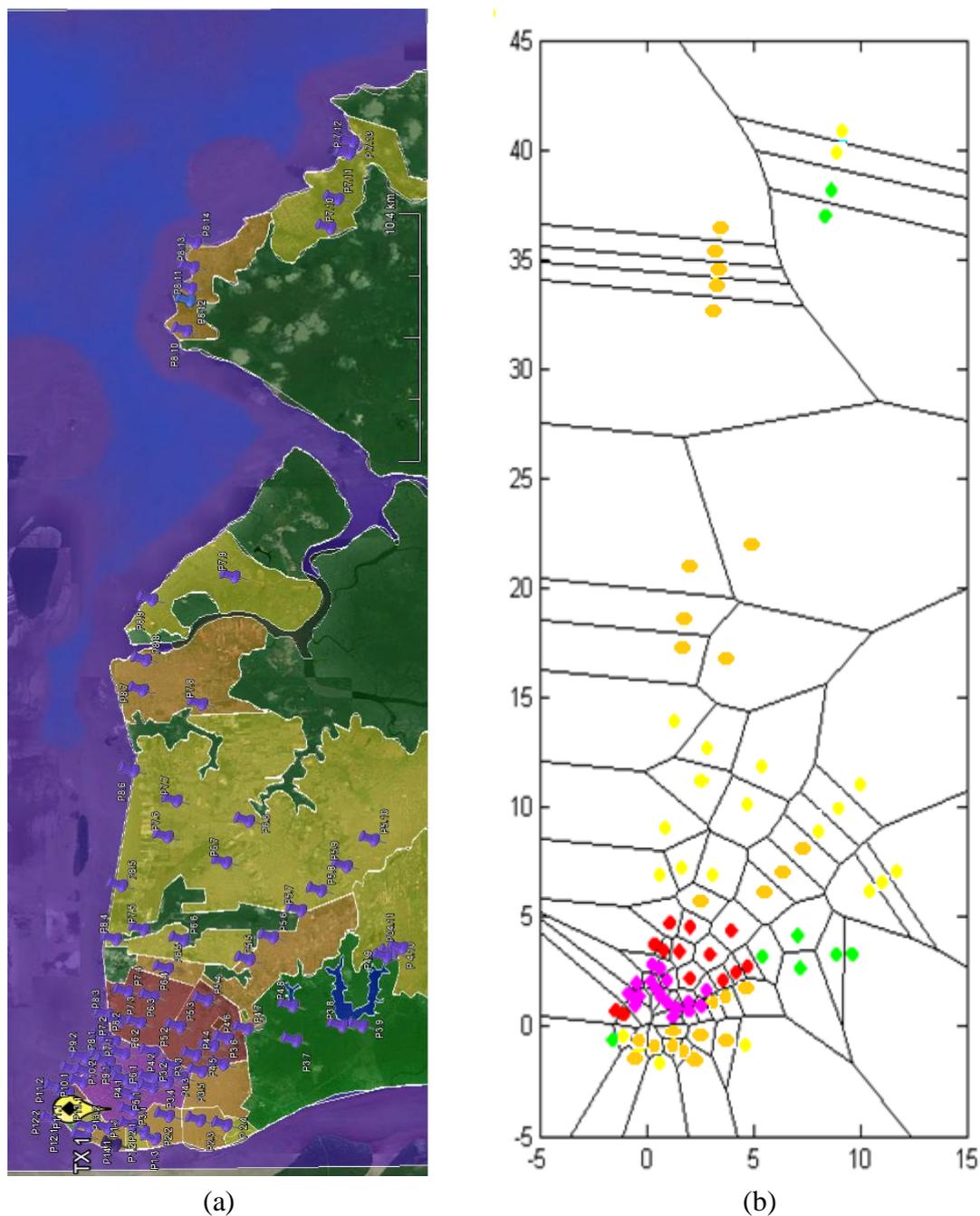


Fig. 6.1. Morfologia do terreno considerando critérios de edificação.

### 7.3.2. Vegetação

A Fig. 6.2 (a) ilustra a quantificações dos trechos do terreno considerado. As áreas em verde escuro são regiões de floresta dentro da área metropolitana de Belém (nota 4). Áreas em azul claro apresentam muitas árvores (nota 3). Como comentado, não estão delimitadas somente às áreas suburbanas, estas também estão presentes em regiões densamente urbanas (comparar com critérios de edificação). As regiões em amarelo possuem árvores de pequeno porte (nota 2). Por fim, as pequenas áreas em branco quase não apresentam arborização (nota 1) estes bairros são basicamente Terra Firme e

Condor, bairros que não tiveram planejamento e possuem muitas vias e casas irregulares em condição de invasão e sem saneamento básico.

A Fig. 6.2 (b) ilustra o diagrama de Voronoi para o atributo vegetação obtido a partir dos 84 dados de treinamento. Nesta figura os pontos em negro representam o atributo arborização com nota 1, as demais cores são iguais às descritas para a Fig. 6.2 (a).

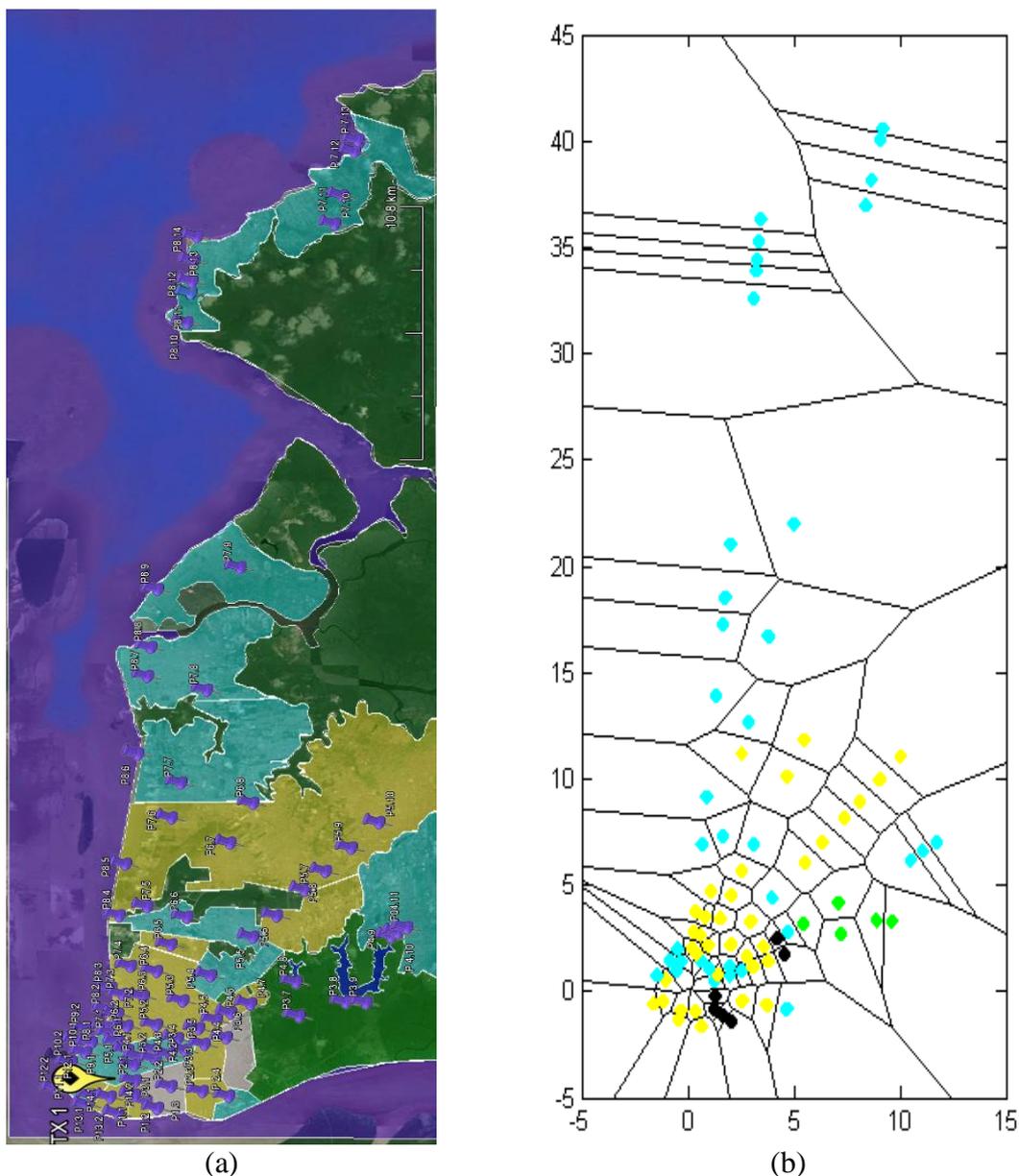


Fig. 5.2. Morfologia do terreno considerando critérios de vegetação.

### 7.3.3. Trechos com água doce

Apenas duas notas foram utilizadas para classificar os trechos com água doce. A nota 2 foi atribuída aos terrenos posteriores a trechos de água doce e nota 1 às demais

regiões. Portanto apenas dois grupos de pontos se enquadram na nota 2, os pontos da radial 4 que estão após os extensos lagos Bolonha e Água Negra (lagos que fornecem abastecimento de água para Belém) e os pontos das radiais 7 e 8 que estão localizados no distrito de Mosqueiro após a Baía do Guajará.

A Tabela 6.2 apresenta cada uma das notas atribuídas a cada ponto medido e os valores médios de potência medida. Observe que os décimos de potência foram desconsiderados pois estes já são valores médios de várias medidas.

Tabela 6.2. Notas atribuídas aos pontos medidos

PONTO	POTÊNCIA (dBm)	DESVIO PADRÃO	EDIFICAÇÃO	VEGETAÇÃO	PASSAGEM DE AGUA DOCE
0101	-55	4,1031	3	1	1
0102	-45	3,2255	3	1	1
0103	-77	4,5803	3	1	1
0201	-65	4,0692	3	1	1
0202	-74	4,7974	3	2	1
0203	-62	3,3955	3	2	1
0204	-60	3,8208	2	3	1
0301	-64	5,2342	5	3	1
0302	-76	5,4265	5	3	1
0303	-76	5,2154	5	3	1
0304	-62	4,2196	3	2	1
0305	-59	2,4649	3	2	1
0306	-61	5,4691	3	1	1
0307	-62	2,5606	1	4	1
0308	-70	2,4027	1	4	1
0309	-64	2,7812	1	4	1
0401	-71	5,1409	5	2	1
0402	-75	5,2878	5	3	1
0403	-73	5,4514	5	2	1
0404	-82	5,1630	4	2	1
0405	-87	5,4277	4	1	1
0406	-57	3,2275	4	3	1
0407	-69	2,5322	1	4	1
0408	-64	2,5397	1	4	1
0409	-78	2,4900	2	3	1
0410	-67	2,3106	2	3	1
0411	-67	3,5898	2	3	1
0501	-68	4,2844	5	3	1
0502	-71	4,2409	4	2	1
0503	-81	6,0641	4	2	1
0504	-82	5,0463	4	3	1
0505	-68	3,1801	3	2	1
0506	-68	2,7482	3	2	1
0507	-61	2,4792	3	2	1
0508	-58	2,6384	2	2	1
0509	-68	2,4810	2	2	1
0510	-73	2,2585	2	2	1
0601	-69	5,0313	5	3	1
0602	-64	3,7391	5	2	1
0603	-76	5,2328	4	2	1
0604	-88	4,4331	4	2	1

0605	-92	2,9807	3	2	1
0606	-69	6,0737	2	3	1
0607	-62	5,1831	2	2	1
0608	-74	2,7324	2	2	1
0701	-65	5,1681	5	2	1
0702	-79	5,2733	5	2	1
0703	-76	4,2435	4	2	1
0704	-86	4,7002	4	2	1
0705	-64	2,7543	2	3	1
0706	-65	2,7348	2	2	1
0707	-66	5,5960	2	3	1
0708	-66	2,6887	3	3	1
0709	-100	2,9509	2	3	1
0710	-84	2,3683	1	3	2
0711	-84	2,4469	1	3	2
0712	-83	2,3468	2	3	2
0713	-84	2,4911	2	3	2
0801	-65	4,8884	5	2	1
0802	-78	4,9132	5	2	1
0803	-90	4,4103	4	2	1
0804	-76	3,0729	2	3	1
0805	-60	2,3774	2	3	1
0806	-59	2,4350	2	3	1
0807	-91	3,3808	3	3	1
0808	-100	2,4116	3	3	1
0809	-102	2,9360	2	3	1
0810	-101	2,7204	3	3	2
0811	-104	2,1557	3	3	2
0812	-98	3,4662	3	3	2
0813	-104	2,5767	3	3	2
0814	-84	2,3272	3	3	2
0901	-51	3,3619	5	3	1
0902	-66	4,3680	5	3	1
1001	-54	4,6963	5	3	1
1002	-68	3,4511	5	3	1
1101	-69	4,2637	4	3	1
1102	-66	3,8600	4	2	1
1201	-60	5,2921	2	3	1
1202	-45	3,4769	1	2	1
1301	-66	4,7087	3	2	1
1302	-49	3,8663	3	2	1
1401	-63	3,5322	3	2	1
1402	-43	3,0136	2	2	1

#### 7.4. Modelo proposto

O modelo proposto neste trabalho foi implementado em Matlab®. O modelo é empírico e associa informações qualitativas (critérios de edificação, vegetação, passagem por água doce e estação do ano) e quantitativas (localização e potência), portanto não apresenta formulação analítica, até o presente momento.

As entradas do modelo são:

- Dados da emissora (localização e potência efetivamente irradiada);
- Potência recebida em cada ponto;
- Localização geográfica dos pontos;
- Notas referentes aos critérios morfológicos;
- Notas referentes à estação do ano;
- Vetor de pesos que define a intensidade de cada regra.

Suas saídas são:

- Localização dos pontos em coordenadas polares;
- Superfície de potências;
- Gráficos por radiais;
- Gráficos por morfologia.

O algoritmo faz uma interpolação/extrapolação do tipo bicúbica dos 84 pontos medidos para um grid de 1000 pontos gerado por uma matriz  $20 \times 50$ . Dimensão esta correspondente ao tamanho do terreno estudado em quilômetros.

### **7.5. Considerações Finais**

Este capítulo apresentou as etapas de elaboração do modelo, descrevendo organização dos dados de entrada e as técnicas de AM utilizadas.

## 8. Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelo modelo proposto. Os resultados são apresentados em diversos formatos no intuito de melhor comentá-los e analisá-los. Este capítulo apresenta ainda, a comparação do modelo proposto com modelos empíricos e determinísticos e a comparação de erros.

### 8.1. A superfície de potências estimadas

O modelo estima a potência recebida em cada um dos 1000 pontos apresentando uma superfície cujo eixo z apresenta as potências estimadas.

Diferentes ângulos da superfície gerada pelo modelo para a transmissora Tx1 podem ser vistas nas Figs. 8.1-8.3. As imagens geradas para a Tx2 foram suprimidas devido ao grande número de figuras apresentadas neste capítulo.

As Figs. 8.1 e 8.2 mostram a superfície de potências estimadas pelo modelo e as potências medidas (diamante magenta), a transmissora é representado por um cilindro vermelho. Nestas é possível observar que a superfície acompanha o comportamento dos pontos medidos apresentando potências mais altas (-50dBm) nas proximidades de TX<sub>1</sub> (origem das distâncias) e potências mais baixas nas regiões mais afastadas (-90dBm), que são as considerações mais básicas de atenuação em função da distância.

A Fig. 8.2 evidencia alguns declínios em pontos relativamente próximos aos à TX<sub>1</sub> (regiões em verde e azul), estes pontos estão localizados em regiões densamente urbanas e densamente arborizadas, verifica-se, pelas medidas, que a potência recebida é menor em função da maior variabilidade. No entanto, observa-se que nestas regiões os pontos medidos estão ainda mais abaixo, mostrando que o modelo tenta acompanhar o comportamento, mas ainda precisa de mais ajustes. Ainda na Fig. 8.2, próximo ao quilômetro 20 é possível observar valores de potência estão tão baixos quanto aos que estão após a Baía do Guajará, cerca do quilômetro 35.

A Fig. 8.3 ilustra uma grande área amarela (-65dBm) relativamente distante de TX<sub>1</sub>. Apesar da distância em relação a TX<sub>1</sub> estas áreas apresentam um bom sinal, possivelmente por serem áreas suburbanas cujas maiores obstruções são árvores e não edificações.

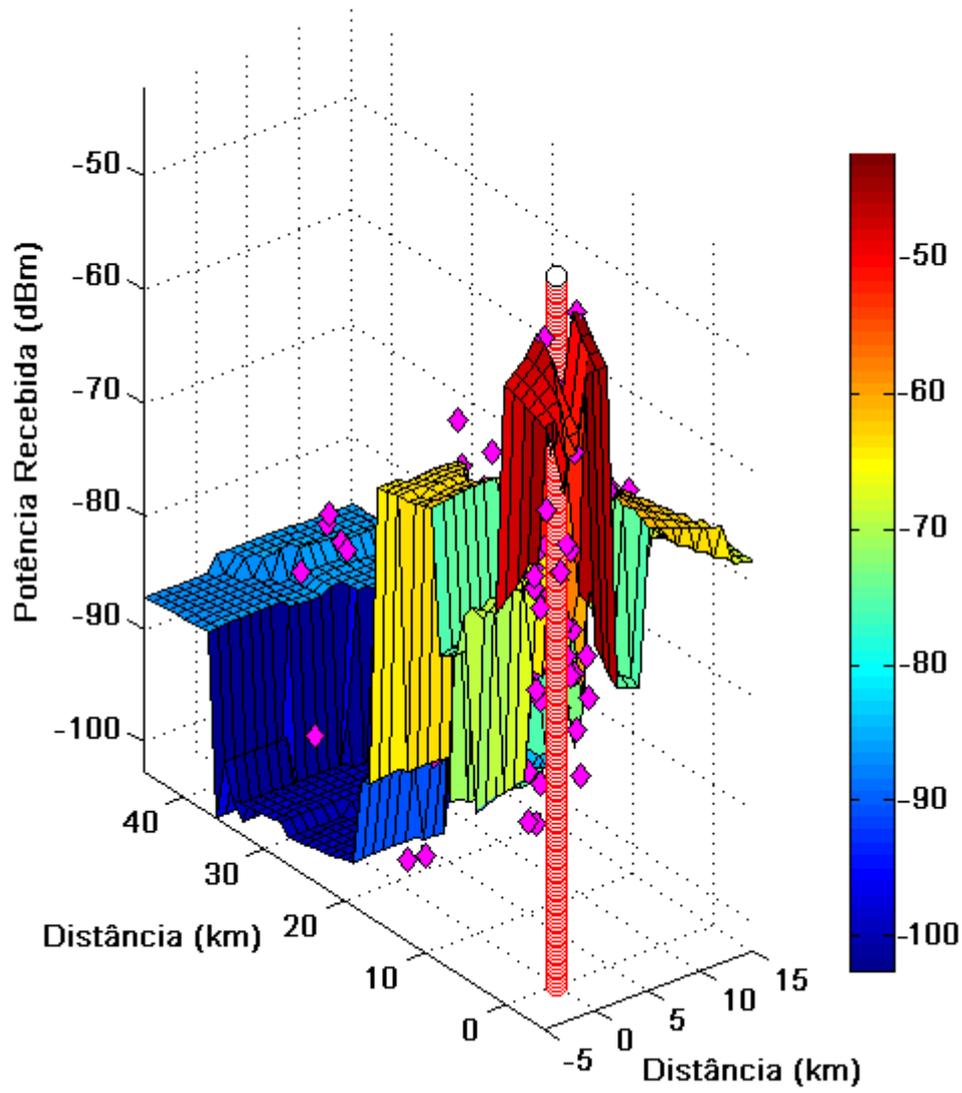


Fig. 8.1. Superfície de potências estimadas pelo modelo proposto.

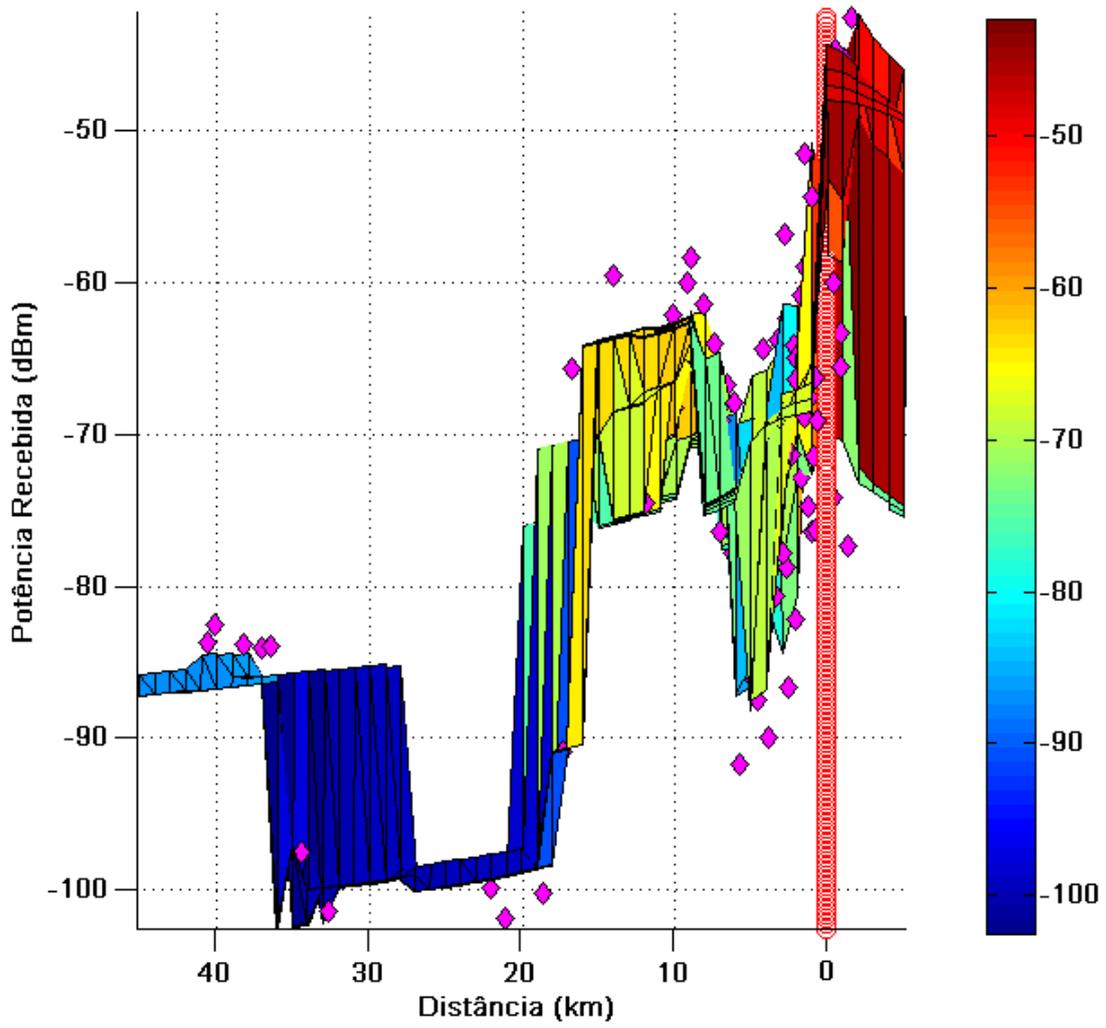


Fig. 8.2. Vista frontal da superfície de potências estimadas.

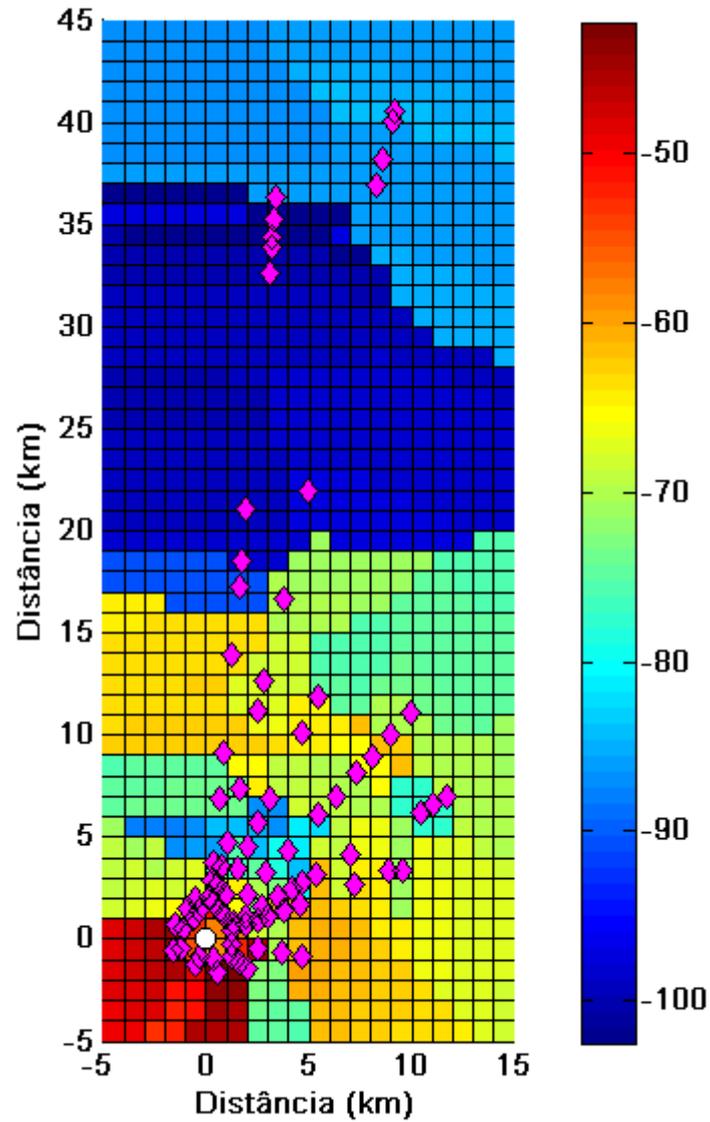


Fig. 8.3. Planificação da superfície de potências

## 8.2. Perfil da perda com a distância

A perda de propagação pode ser melhor visualizada quando calculada a média dos valores de potência recebida dos pontos internos à discos concêntricos centrados em cada uma das emissora Fig.8.4.

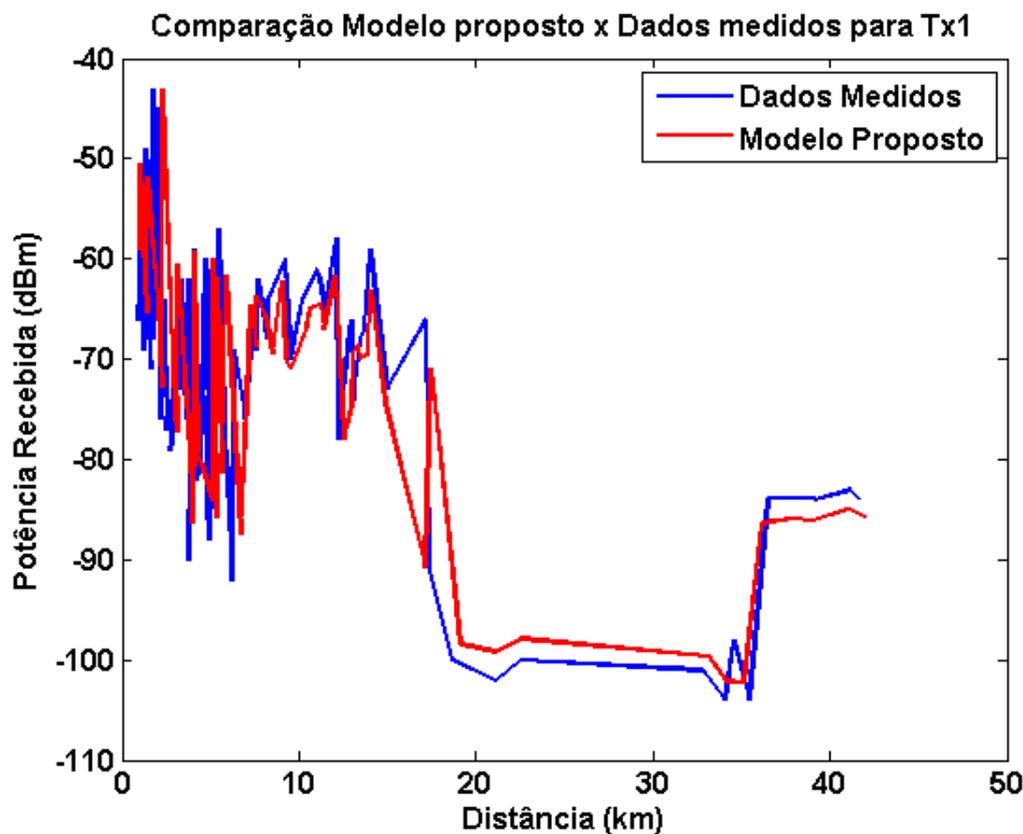


Fig.8.4. Comparação dos dados medidos com o modelo proposto para Tx1

### 8.3. Resultados apresentados em radiais

Outra forma de analisar os resultados é a comparação do modelo com dados medidos nas 14 radiais que os contém, Figs. 8.5-8.18. Nesta visualização pode-se observar que as saídas do modelo acompanham o comportamento dos dados medidos em todas as radiais.

O teste t-Student foi realizado em cada uma das radiais e no conjunto total de pontos das distâncias com as potências. Em todos os casos o teste da hipótese nula foi positivo significando que as médias do conjunto de dados do modelo segue a média dos dados medidos com 95% de confiança (confiança padrão).

O erro RMS (em dB) entre os dados medidos e o modelo proposto pode ser visto para cada uma das radiais na Tabela 8.1. Os erros ficam em torno de 3, sendo o menor em torno de 0,8 e o maior 5,5.

A radial 1, Fig. 8.5, apresenta uma oscilação no valor da potência recebida que não está relacionada a morfologia do terreno pois os três pontos estão situados na mesma região nos dois critérios admitidos. Possivelmente corresponde a obstruções

momentâneas (carros ou ônibus) ou obstruções permanentes que poderiam ter sido evitadas se o local da medição fosse alterado em poucos metros. Novas medições podem ou não confirmar esta hipótese.

A radial 2, Fig. 8.6, ilustra claramente a situação de dois tipos de morfologia, um primeiro trecho urbano (dois primeiros pontos) em seguida um trecho suburbano (dois últimos pontos).

Na radial 3, Fig. 8.7, observa-se dois comportamentos distintos. Os primeiros quilômetros há uma queda na potência recebida, isto por estar em área urbana, em seguida há uma súbita subida e uma constância do sinal, nestas regiões o terreno é suburbano e de floresta.

As radiais 4-6, Figs. 8.8-8.10, apresentam comportamento semelhante. Seus primeiros pontos (seis primeiros para a radial 4 e os quatro primeiros para as radiais 5 e 6) localizam-se em áreas urbanas (notas 4 e 5) apresentando uma maior variabilidade do sinal, com grandes oscilações nos valores de potência recebida. Os pontos subsequentes localizam-se em áreas suburbanas na qual há um padrão de edificações e vegetação, condições que podem ser vistas através de uma maior suavidade nos gráficos de potência recebida.

As radiais 7 e 8, Figs. 8.11 e 8.12, passam por trajetos semelhantes (intencionalmente) e apresentam comportamento semelhante apresentando os seus primeiros pontos (quatro primeiros na radial 7 e três primeiros na radial 8) em área densamente urbana apresentando um declínio da potência recebida. Os pontos seguintes se encontram em áreas suburbanas apresentando uma região praticamente constante nos gráficos. Nos pontos localizados próximos ao quilometro 20, em ambos os gráficos, observa-se uma queda significativa na potência recebida, estes últimos estão localizados no distrito de Outeiro (antes da Baía do Guajará). Por fim, nos últimos pontos (quatro últimos na radial 7 e cinco últimos na radial 8), localizados em Mosqueiro, observa-se um aumento da potência recebida, característica observada em outros trabalhos envolvendo terrenos mistos com trajetos terra-água doce.

As radiais 9 e 10, Figs. 8.13 e 8.14, estão totalmente contidas em área densamente urbana apresentando uma diminuição da potência inerente à distância.

Na radial 11, Fig.8.15, localizada no centro histórico de Belém observa-se variações muito pequenas no sinal da potência recebida.

As radiais 12, 13 e 14, Figs. 8.16-8.18, apresentam o mesmo comportamento que contraria os modelos de perda com a distância, porém nos três casos o ponto mais próximo está localizado em área urbana e o último ponto em área praticamente livre com casas e árvores de pequeno porte. Neste caso a morfologia do terreno é fator preponderante na intensidade do sinal recebido.

Em todas as radiais observa-se que a morfologia do terreno influencia fortemente a potência recebida e que o modelo proposto apresenta resultado satisfatório devido às estas considerações.

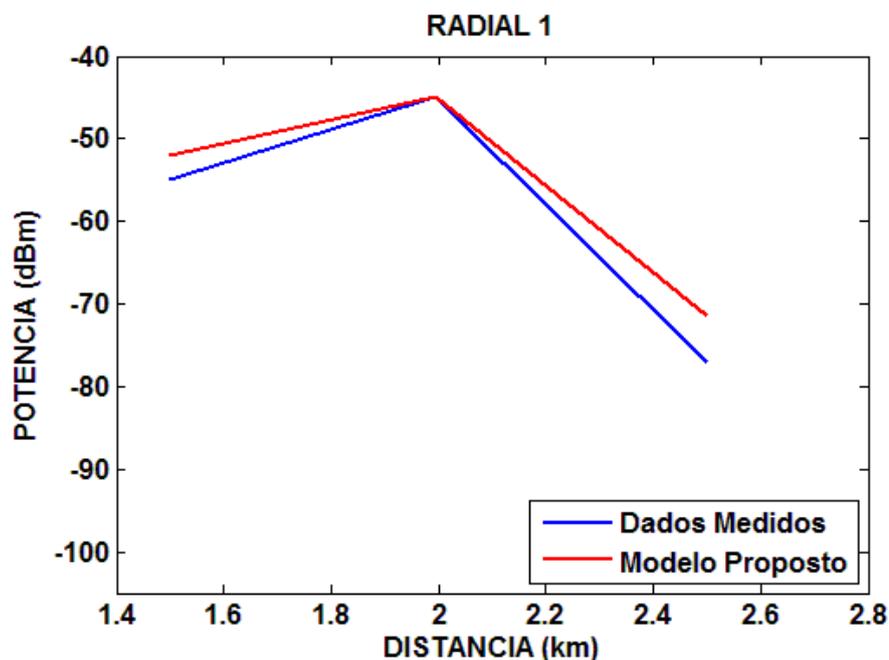


Fig. 8.5. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 1.

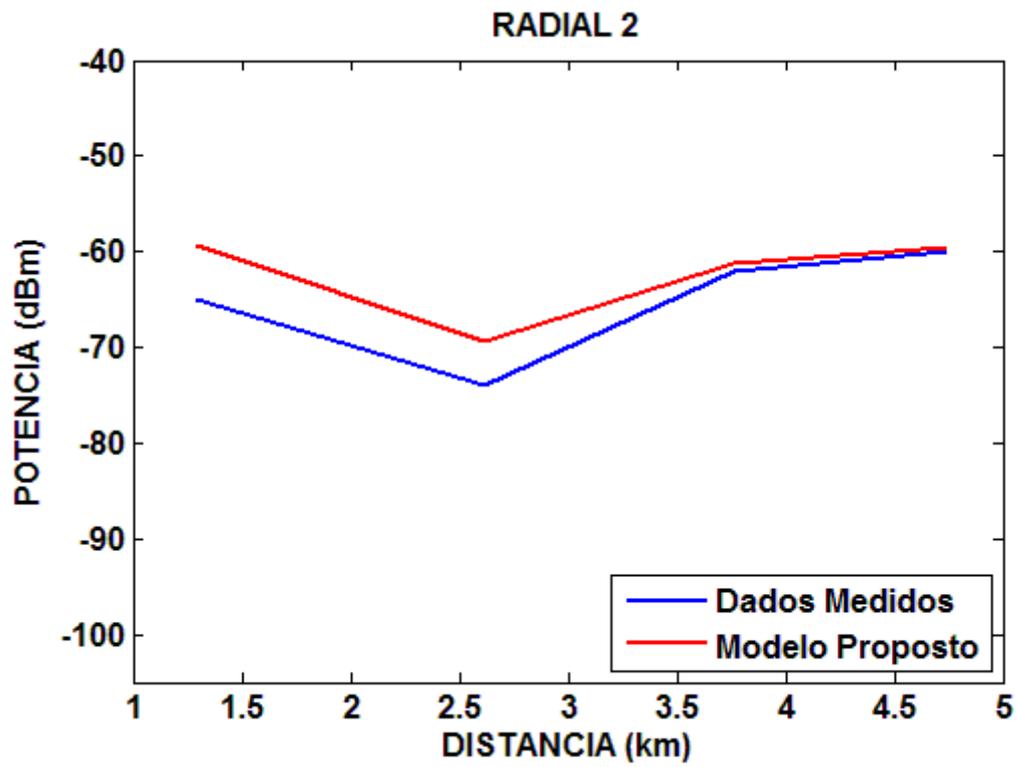


Fig. 8.6 Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 2.

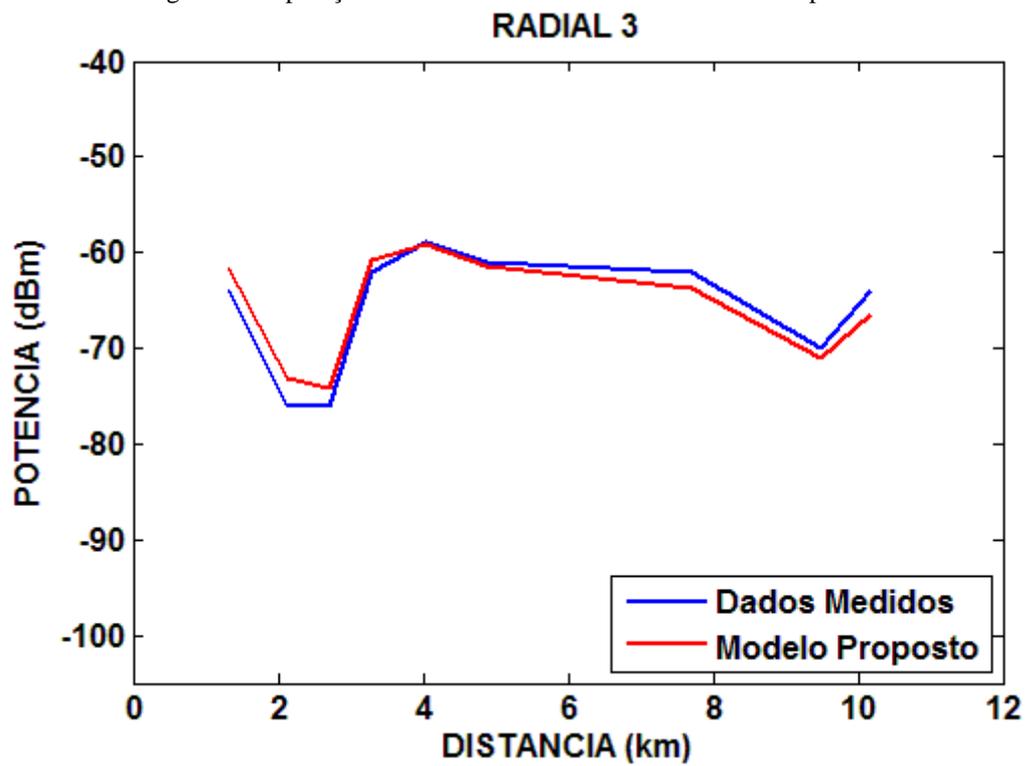


Fig.8.7. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 3.

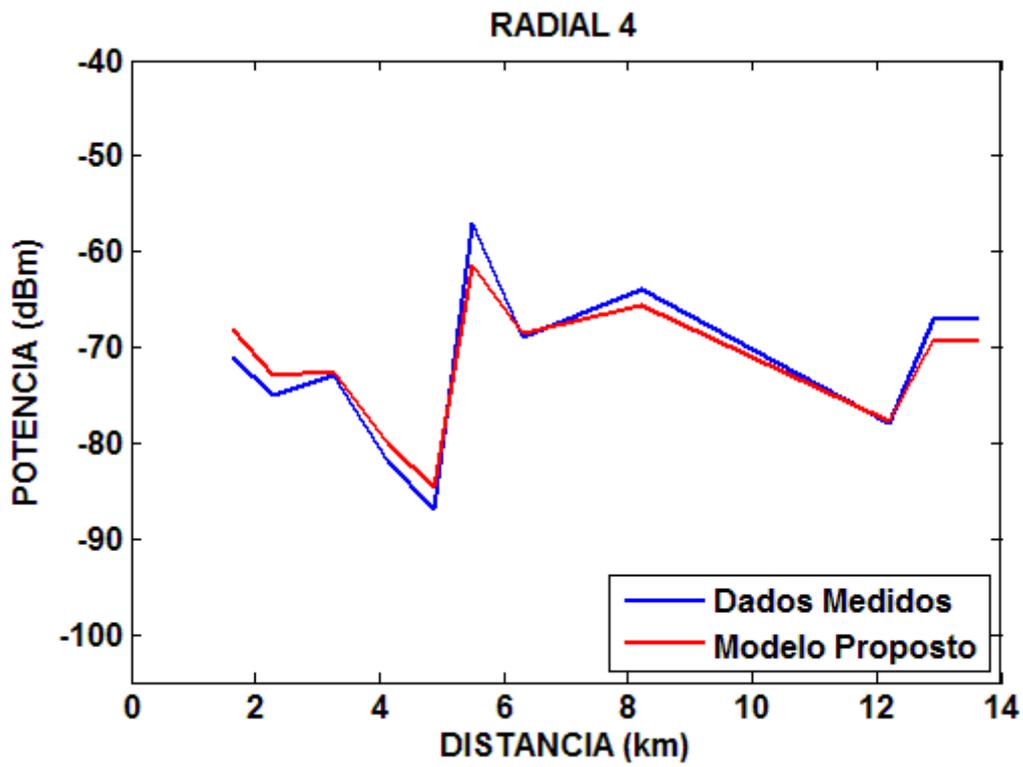


Fig. 8.8. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 4.

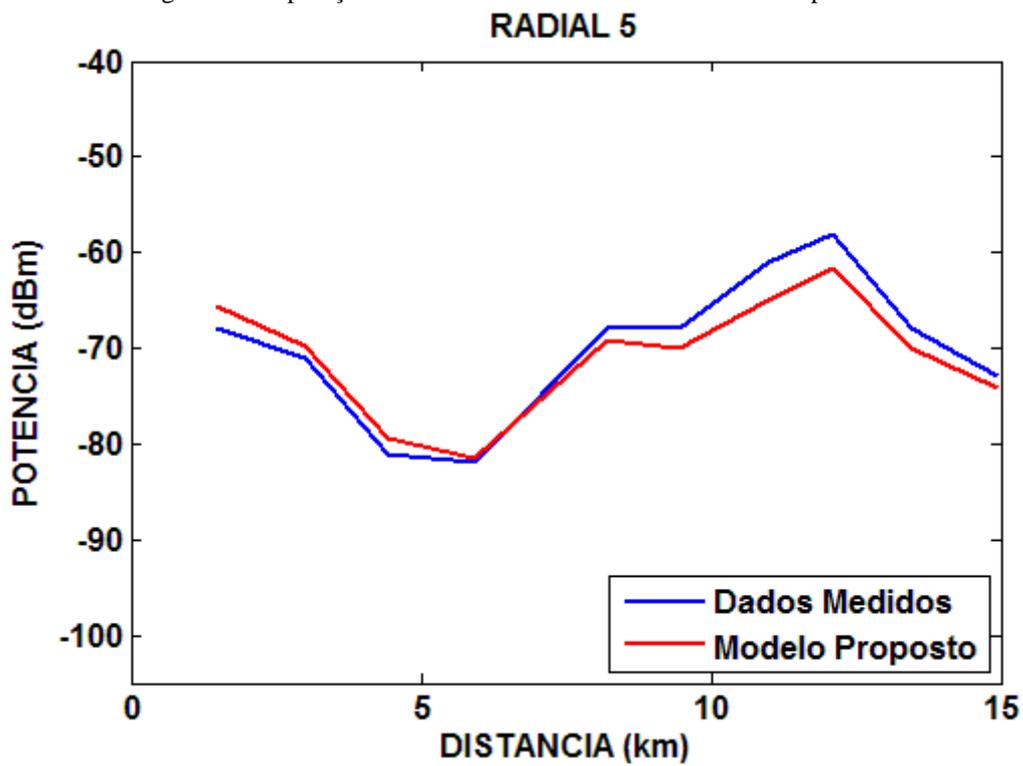


Fig. 8.9. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 5.

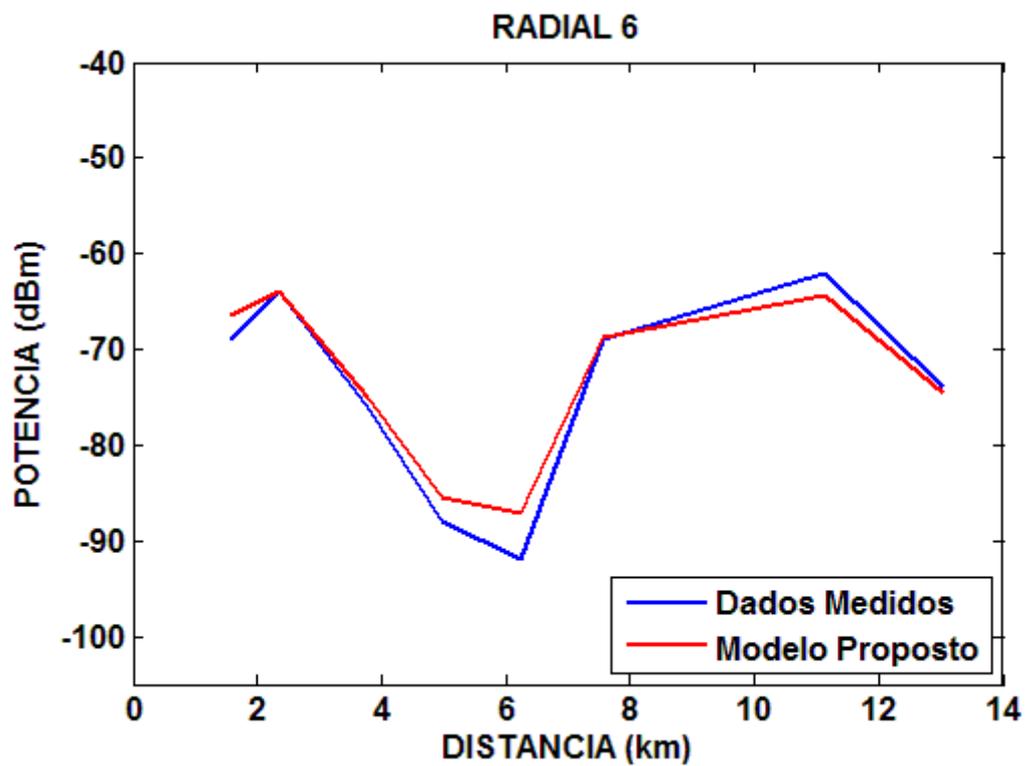


Fig. 8.10. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 6.

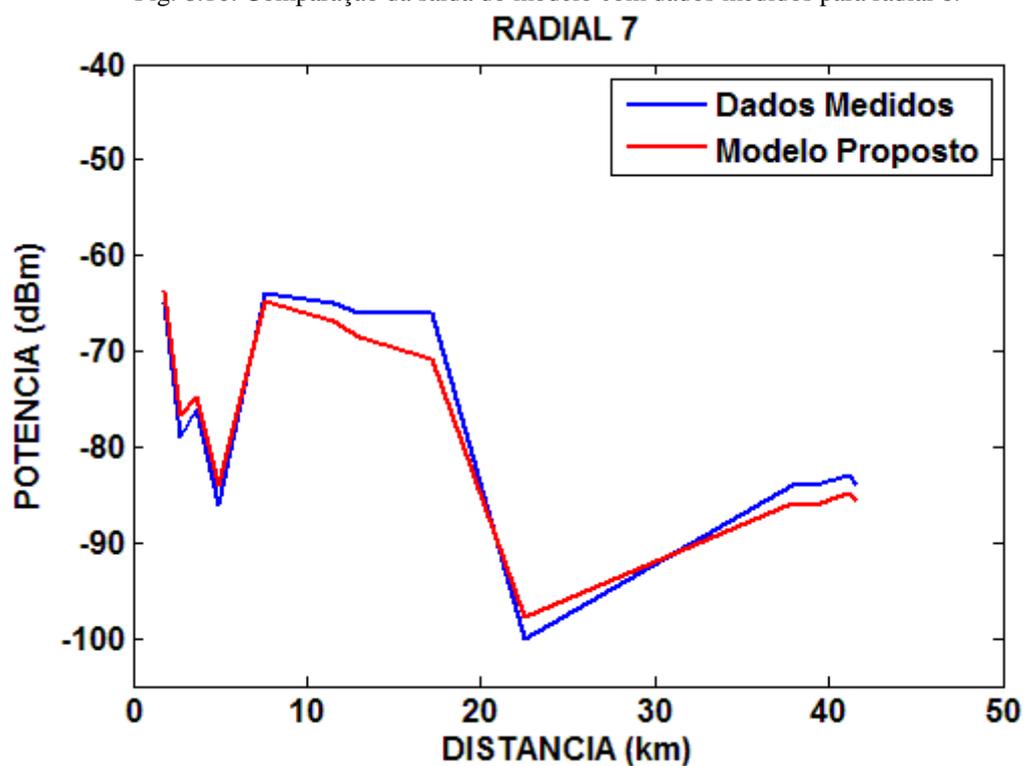


Fig. 8.11. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 7.

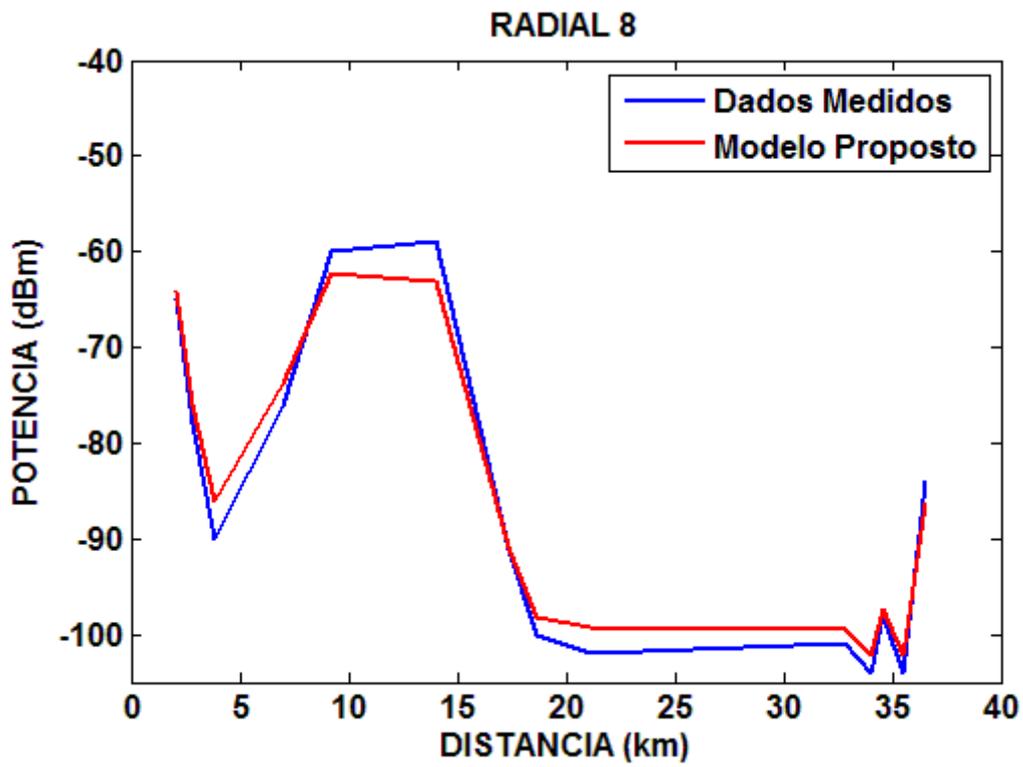


Fig. 8.12. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 8.

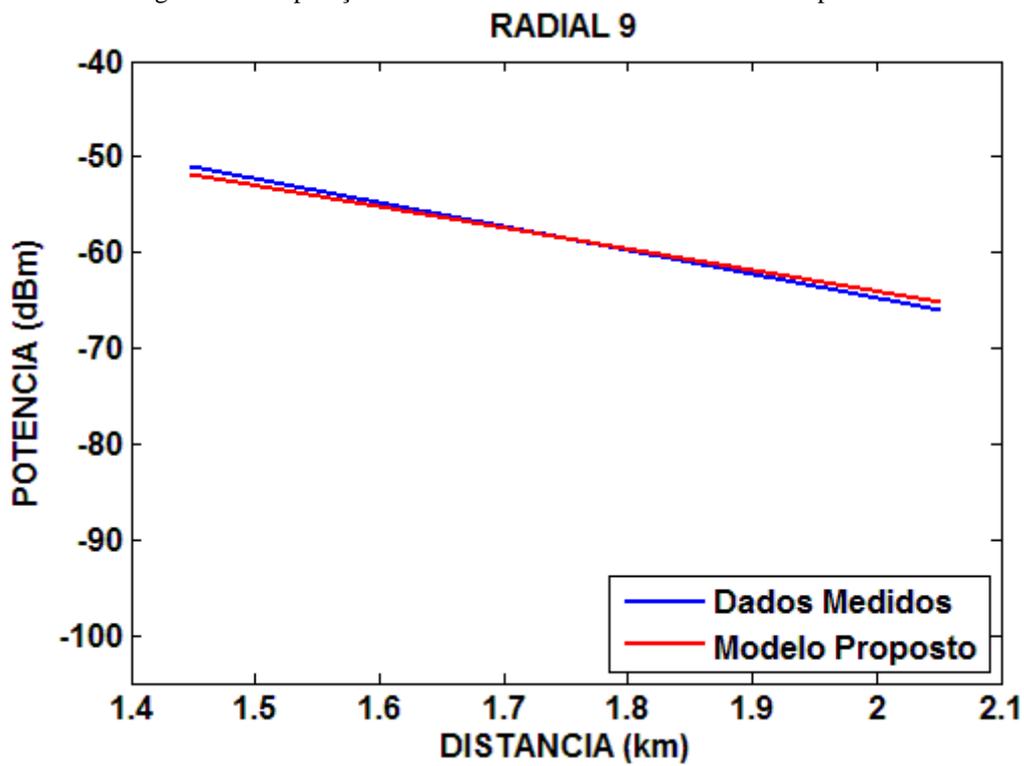


Fig. 8.13 Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 9.

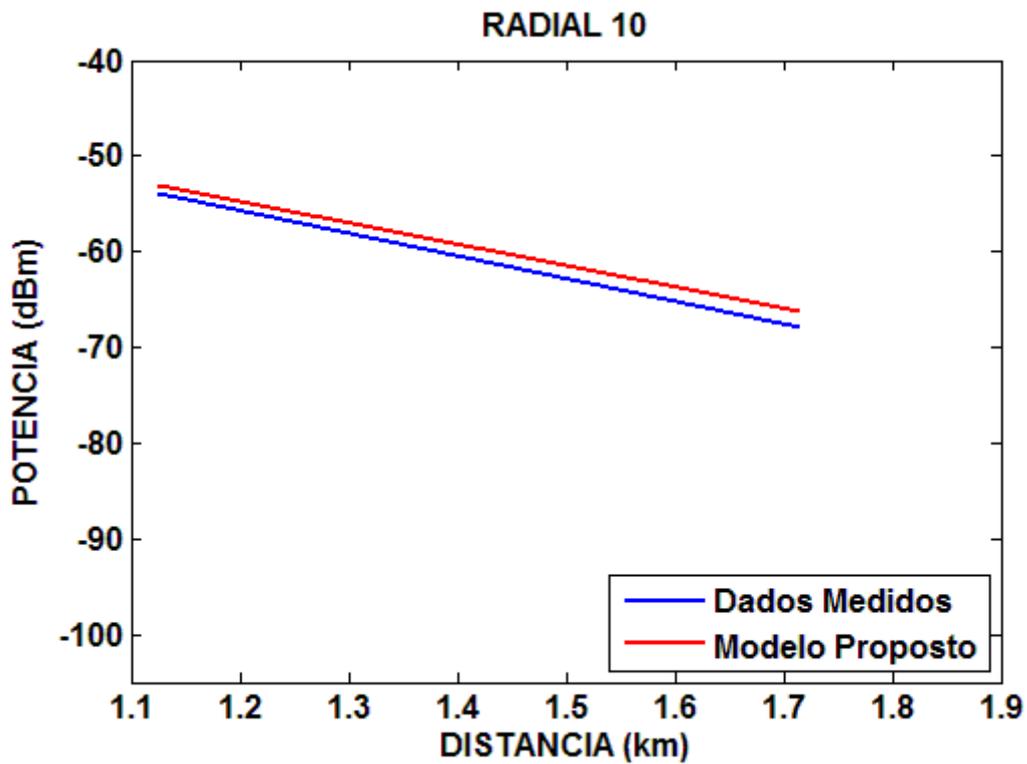


Fig. 8.14. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 10.

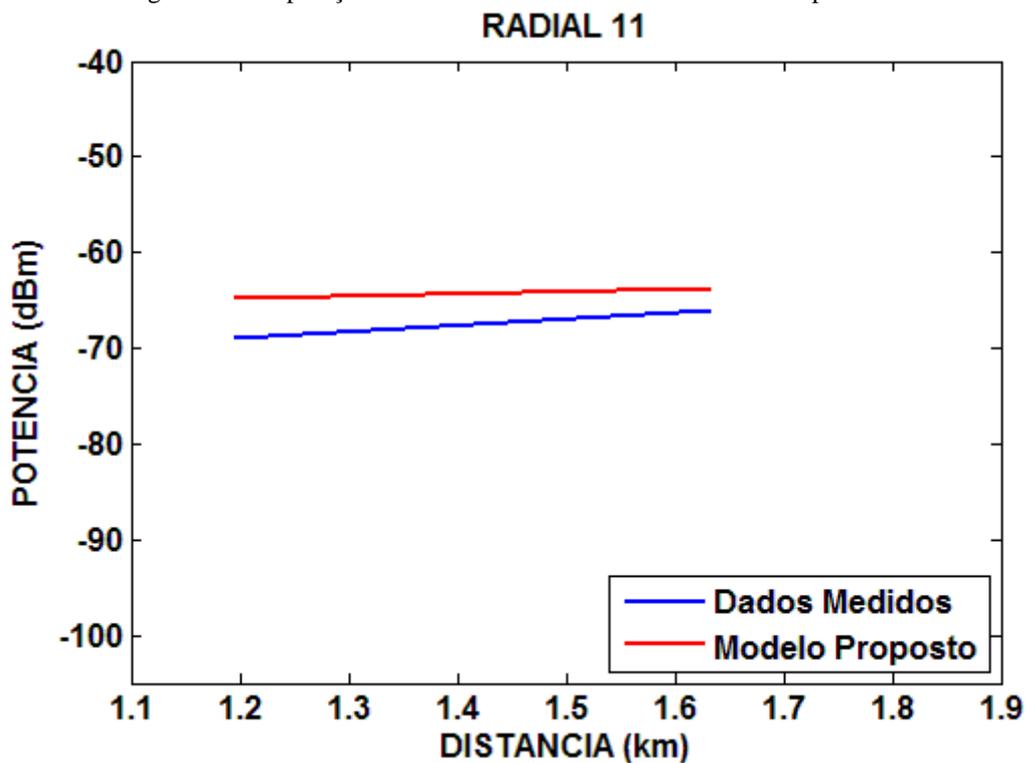


Fig. 8.15. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 11.

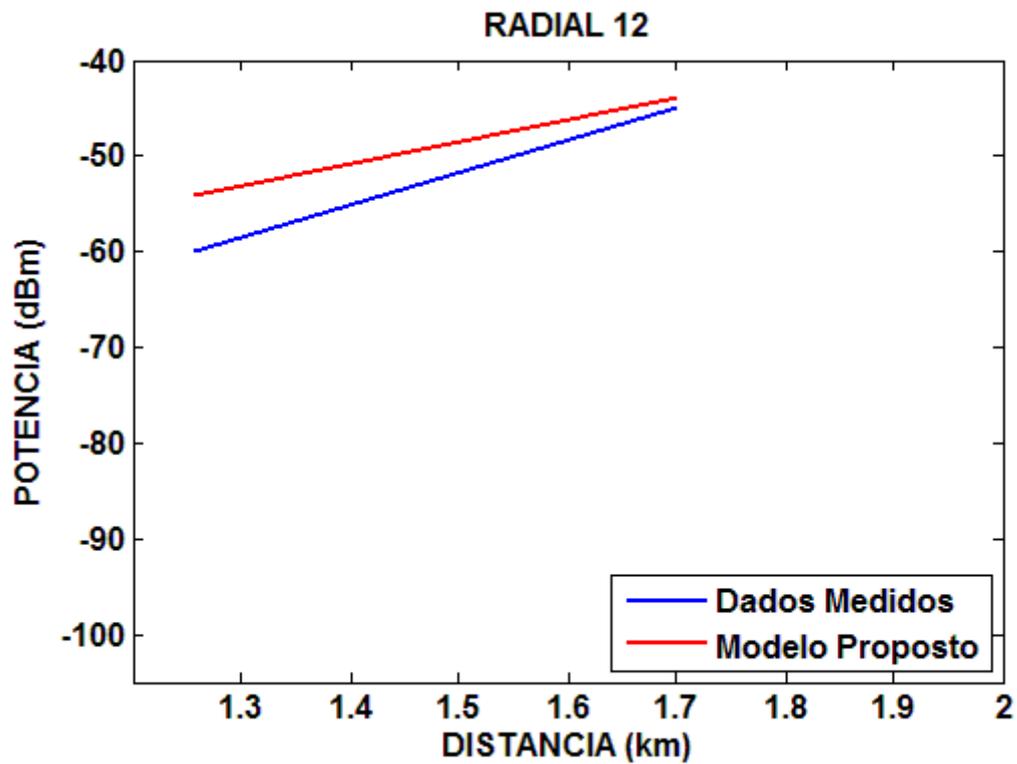


Fig. 8.16. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 12.

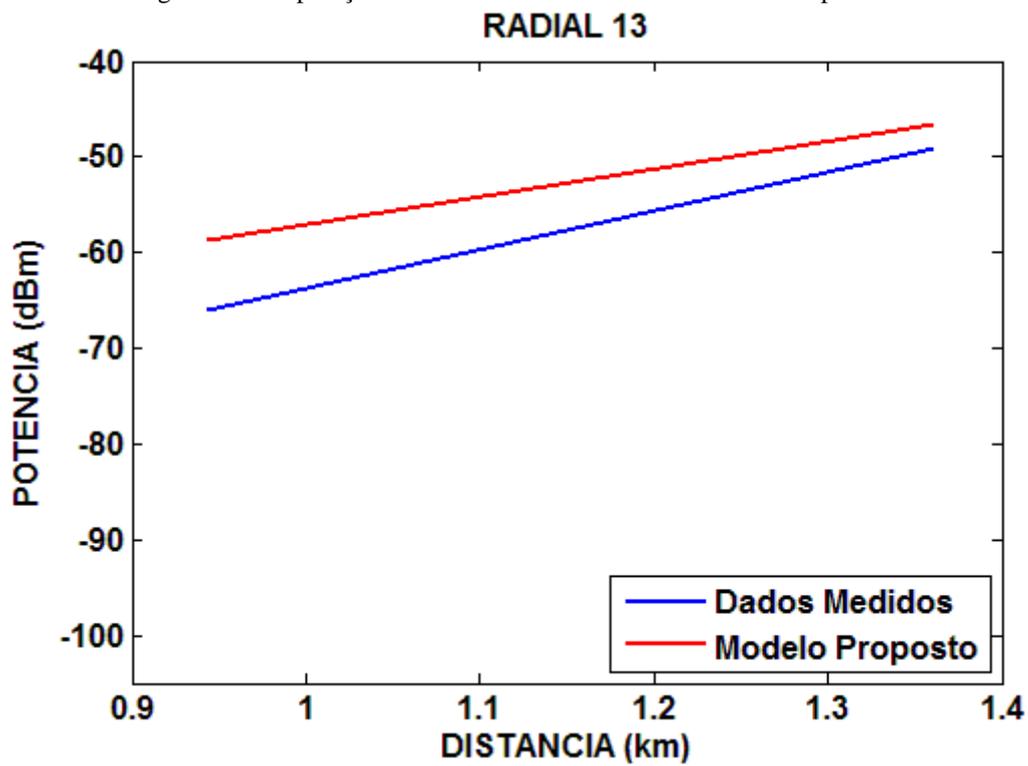


Fig. 8.17. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 13.

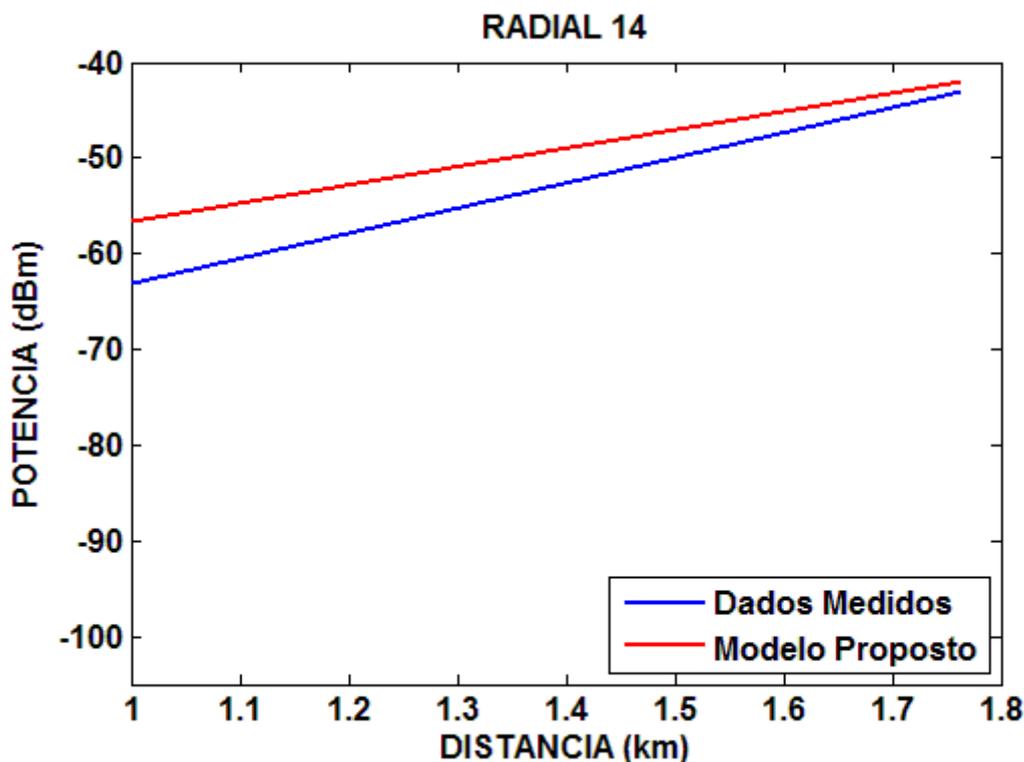


Fig. 8.18. Comparação da saída do modelo com dados medidos para radial 14.

Tabela 8.1. Erros RMS para cada radial.

RADIAL	1	2	3	4	5	6	7
RMS (dB)	3,63	3,70	1,77	2,25	2,23	2,37	2,24
RADIAL	8	9	10	11	12	13	14
RMS (dB)	2,28	0,81	1,46	3,42	4,23	5,38	4,57

#### 8.4. Resultados apresentados segundo morfologia do terreno

A análise do modelo por radiais evidenciou a importância da consideração da morfologia no terreno, então optou-se por apresentar, também, os resultados quando dispostos em regiões que possuam o mesmo tipo de morfológico. As Figs. 8.19-8.23 ilustram a comparação do modelo com os dados medidos em cada uma das regiões identificadas nas regras de edificação. Em todos os casos o modelo acompanha o comportamento dos dados medidos. Os erros RMS para cada nota do atributo edificação podem ser vistos na Tabela 8.2.

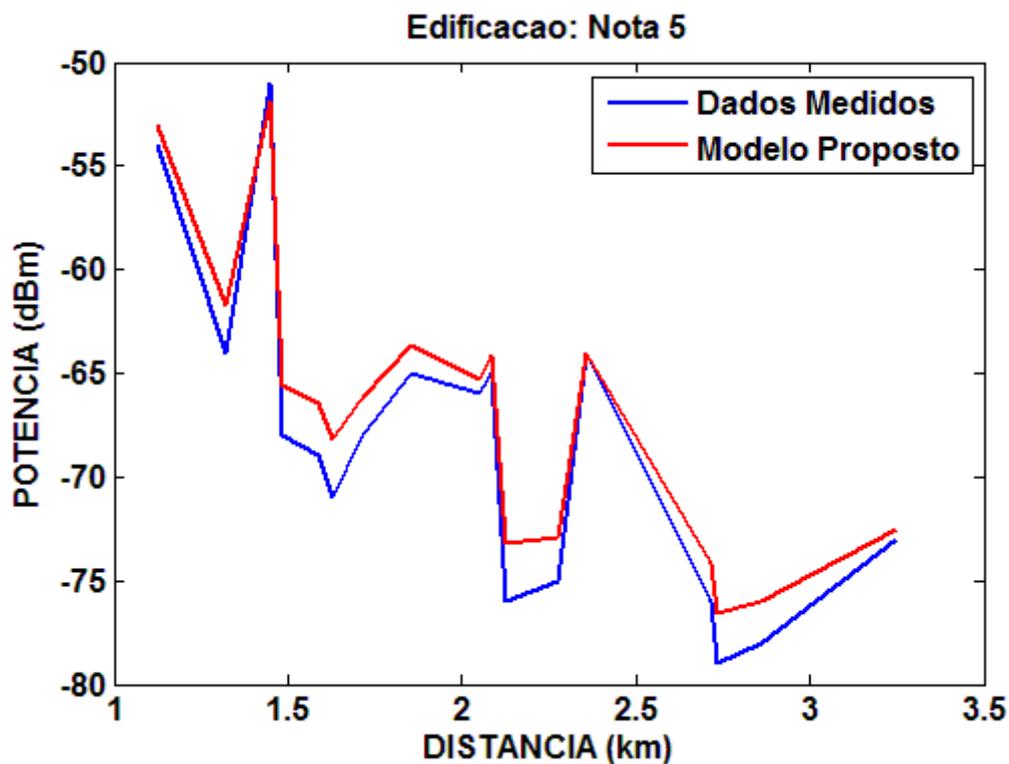


Fig. 8.19. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área densamente urbana – Nota 5.

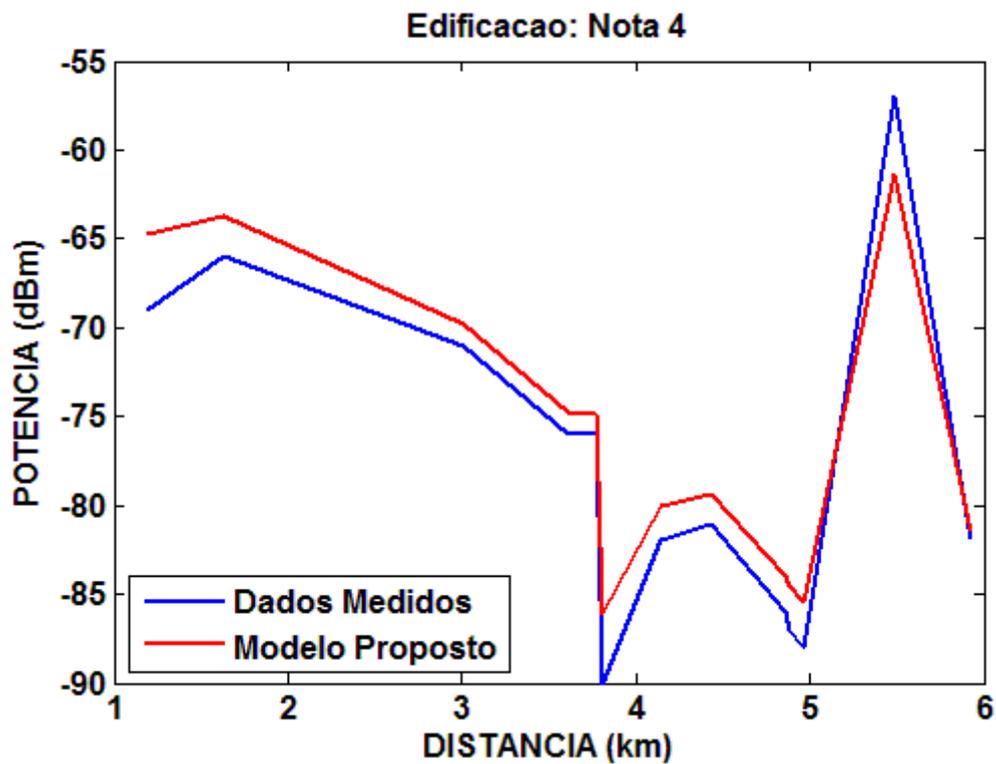


Fig. 8.20. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área urbana – Nota 4.

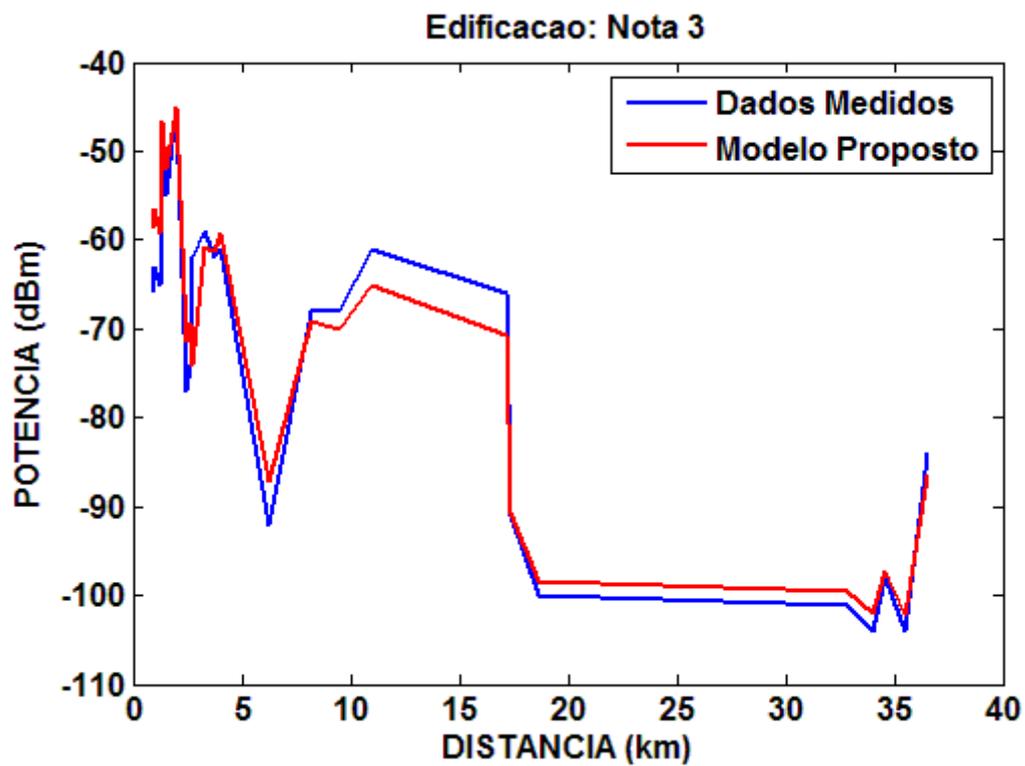


Fig. 8.21 Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área suburbana – Nota 3

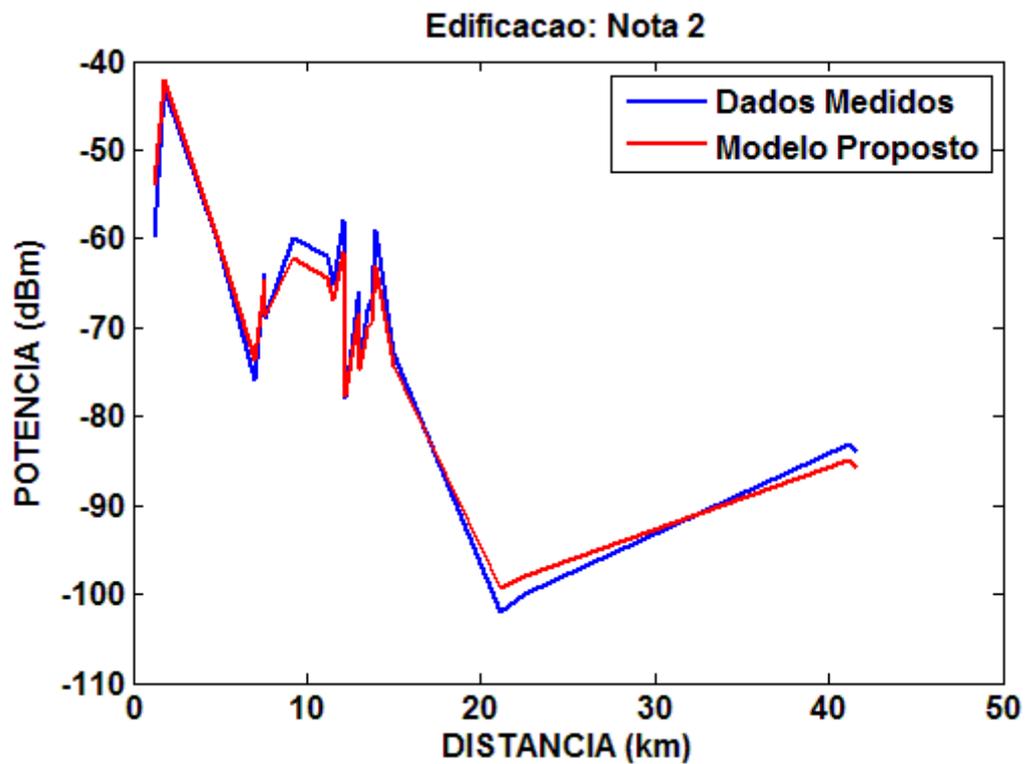


Fig. 8.22. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área suburbana – Nota 2

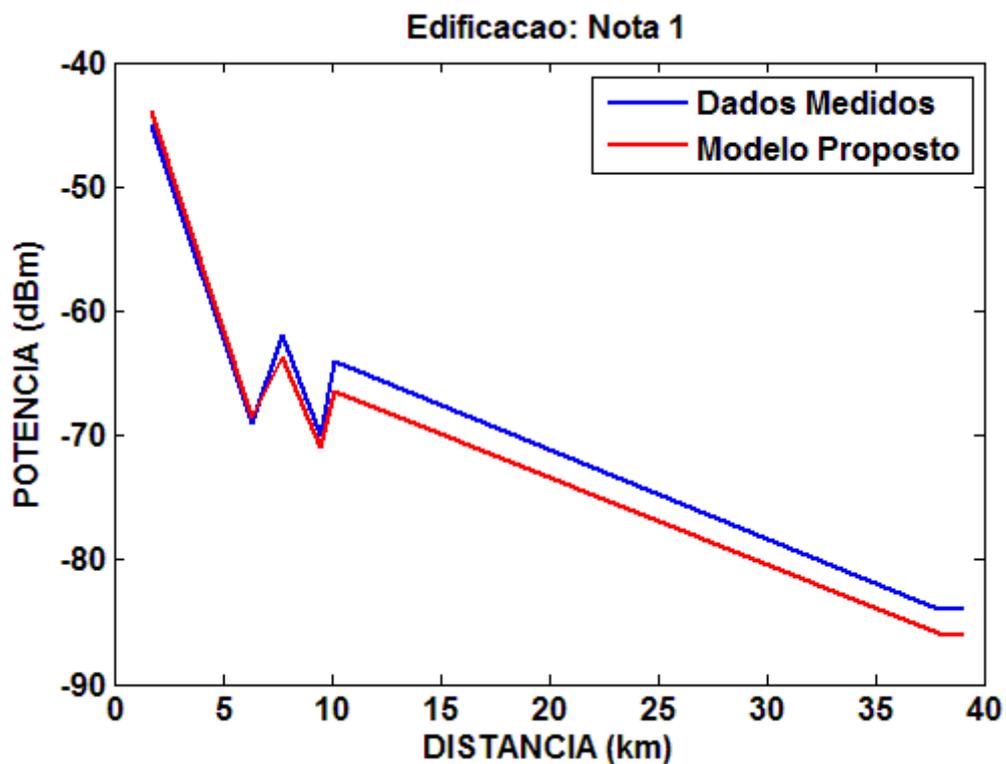


Fig. 8.23. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em espaço livre – Nota 1

Tabela 8.2. Comparação do erro RMS para cada nota de edificação.

EDIFICAÇÃO	1	2	3	4	5
RMS (dB)	<b>1,67</b>	<b>2,41</b>	<b>4,25</b>	<b>2,57</b>	<b>1,87</b>

As Fig. 8.24-8.27 ilustram a comparação da saída do modelo com os dados medidos para as quatro notas de vegetação. A Tabela 8.3 mostra o erro RMS em cada caso.

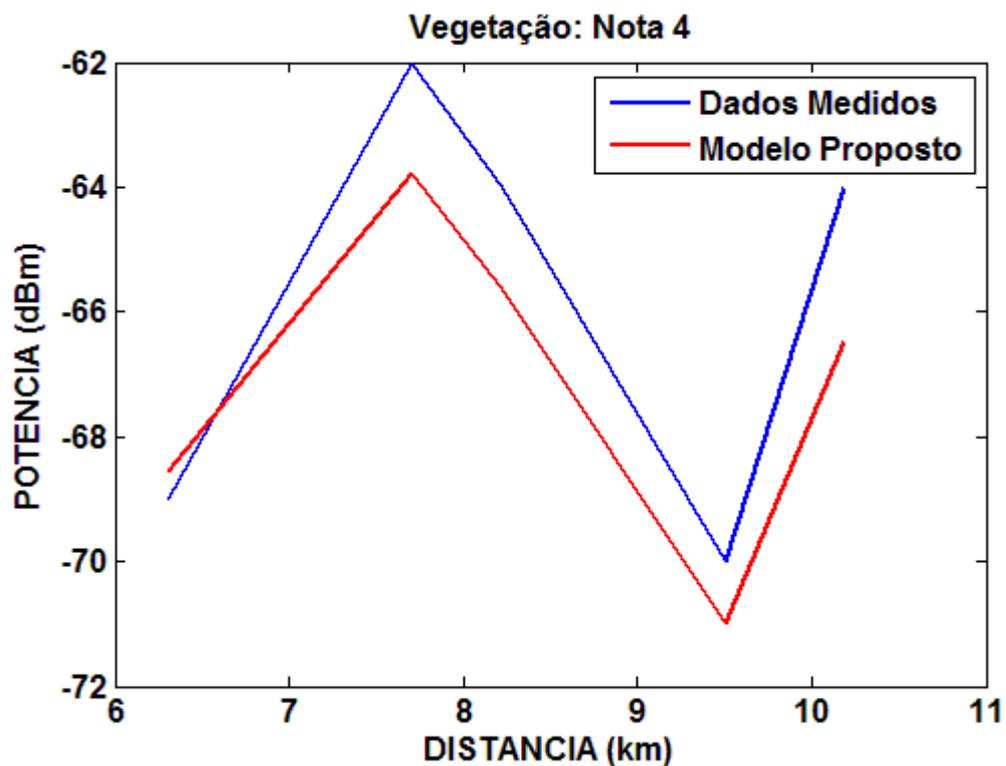


Fig. 8.24. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em floresta – Nota 4

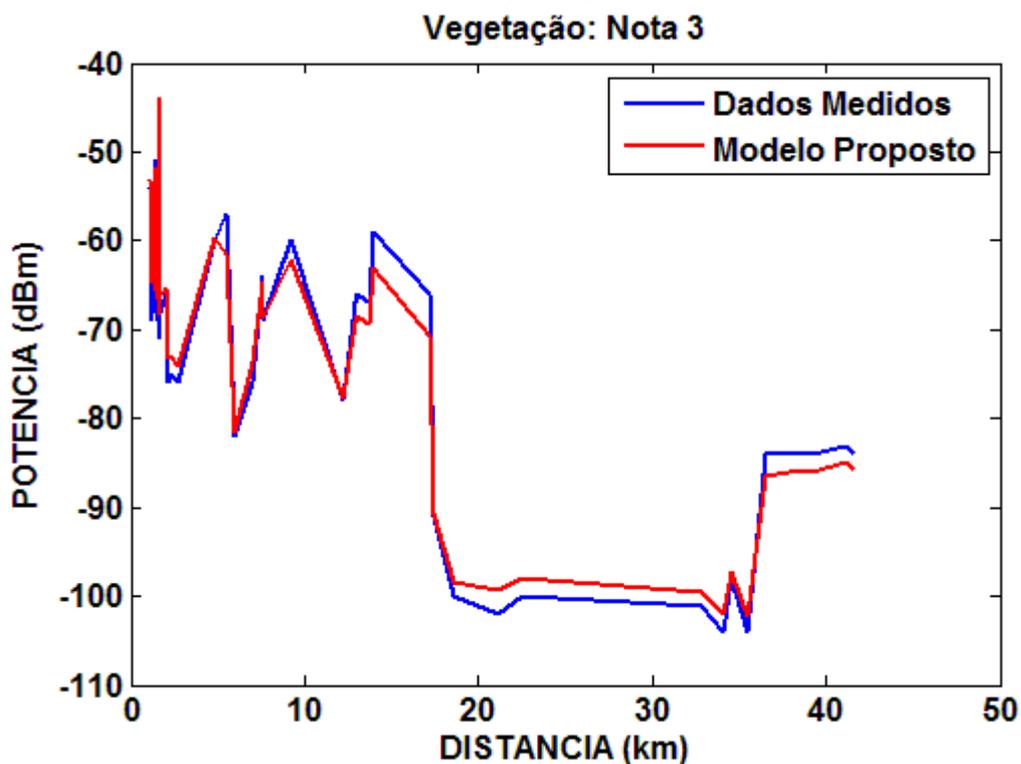


Fig. 8.25. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em áreas com muitas árvores – Nota 3.

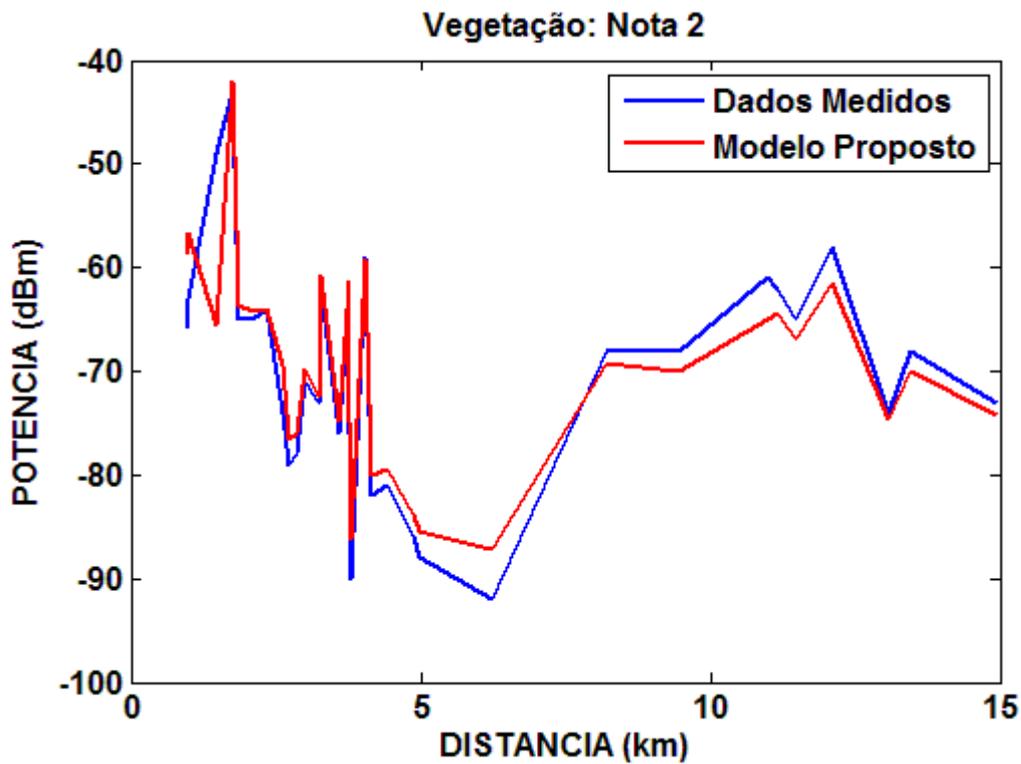


Fig. 8.26. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área com poucas árvores – Nota 2.

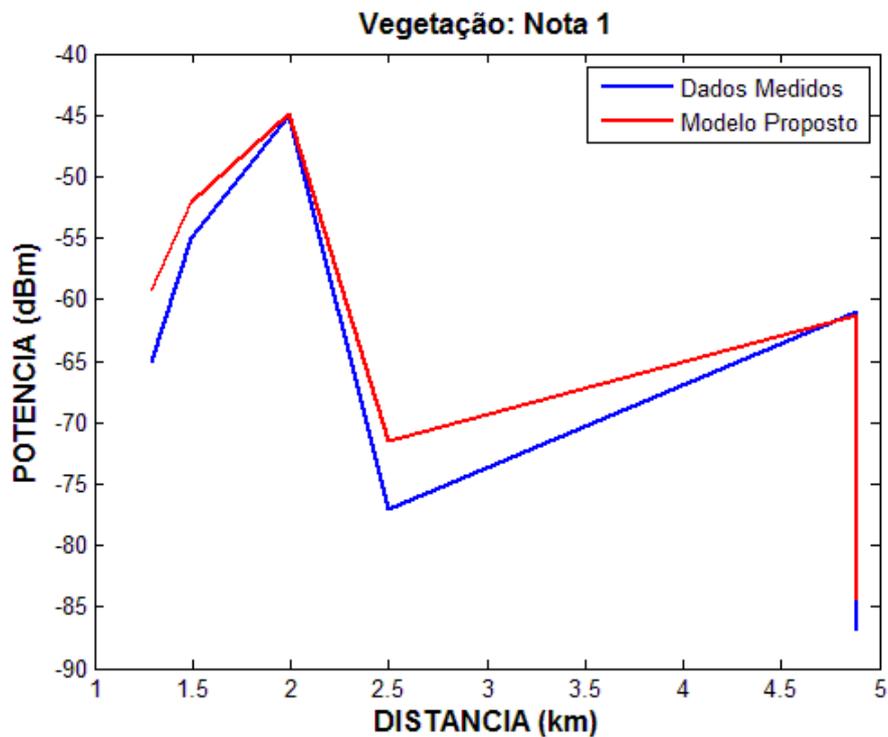


Fig. 8.27. Comparação da saída do modelo com os dados medidos para os pontos que estão situados em área sem arborização – Nota1.

Tabela 8.3. Comparação do erro RMS para cada critério de vegetação.

CRITÉRIO VEGETAÇÃO	1	2	3	4
RMS (dB)	1,62	4,01	2,41	1,62

## 8.5. Resultados para diferentes condições climáticas

Com base nos dados medidos e no que foi apresentado no capítulo 6, foi possível introduzir no modelo proposto um atributo quantificando a condição climática. Ou ainda, o modelo faz distinção entre as condições climáticas, fornecendo saídas diferentes para climas diferentes a partir de informações fornecidas pelo usuário.

A Fig. 8.28 ilustra a saída do modelo comparado com dados obtidos na campanha de medições durante o inverno. A Fig. 8.29 ilustra a saída do modelo comparado com dados obtidos na campanha de medições durante o verão. Em ambas as figuras existe uma lacuna no gráfico representando a localização da baía do Guajará (local onde não foram realizadas medições). O modelo prevê uma diferença de cerca de 10 dB entre o sinal obtido no verão e o sinal obtido no inverno. A Figs. 8.30 e 8.31 ilustram as tendências lineares dos dados apresentados nas Figs. 8.28 e 8.29 respectivamente. O modelo apresentou um erro RMS de 1,71 dB no caso do inverno e 3,31 dB para o verão.

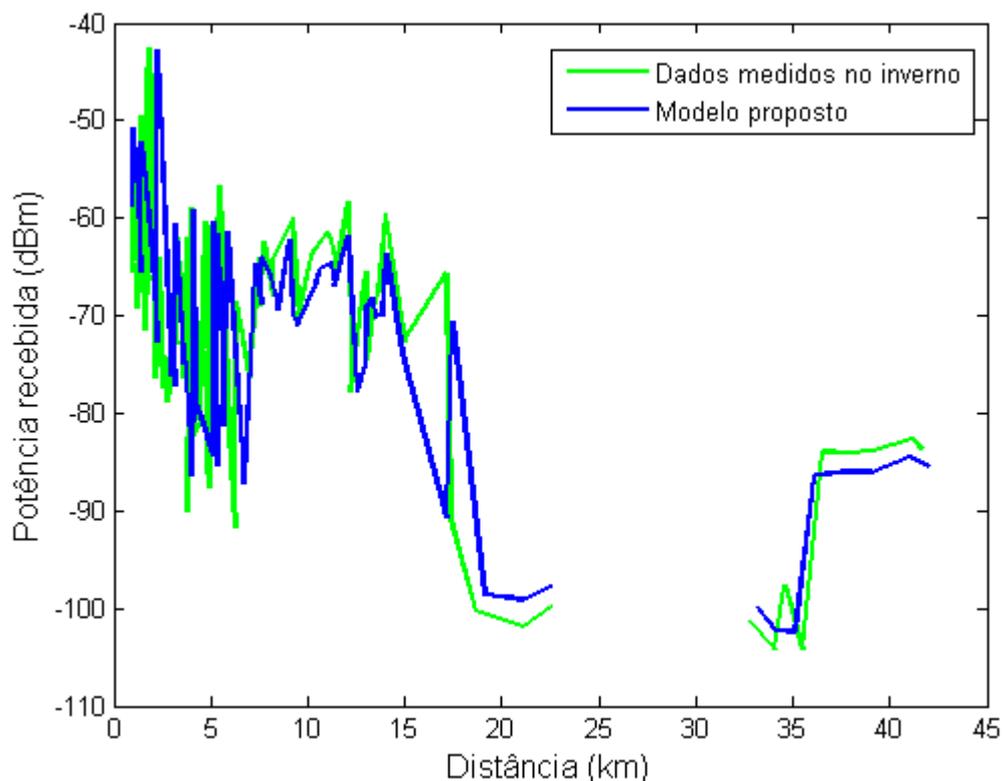


Fig. 8.28. Comparação entre dados medidos no inverno e saída do modelo proposto considerando diferenças climáticas

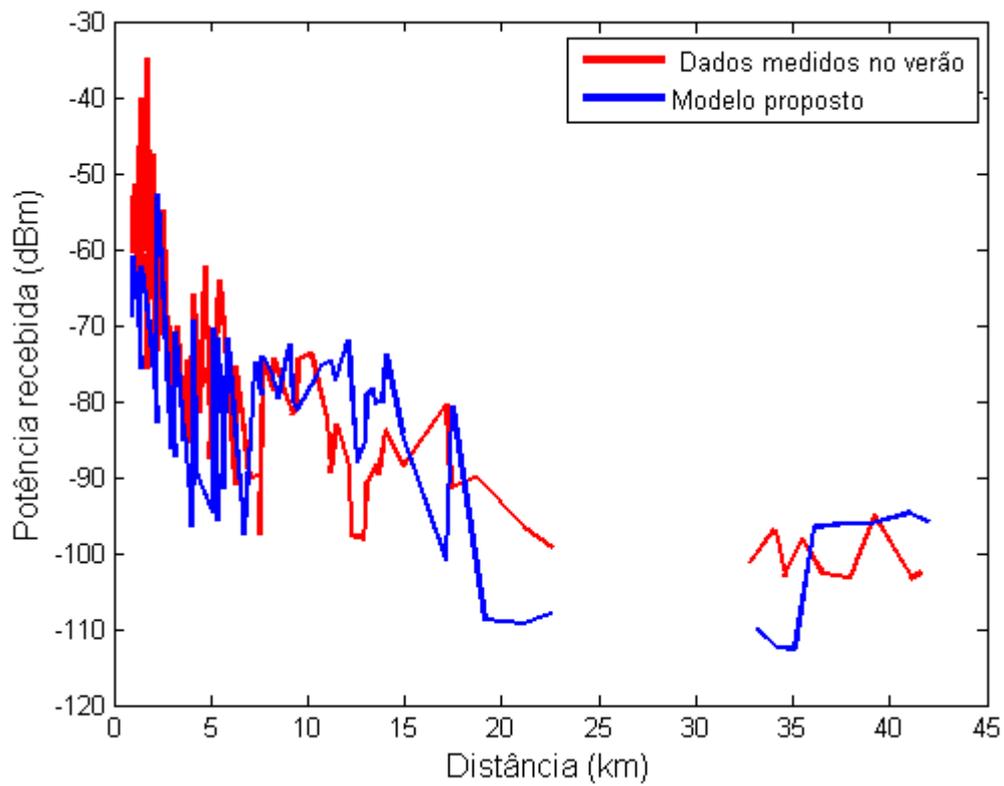


Fig. 8.29. Comparação entre dados medidos no verão e saída do modelo proposto considerando diferenças climáticas

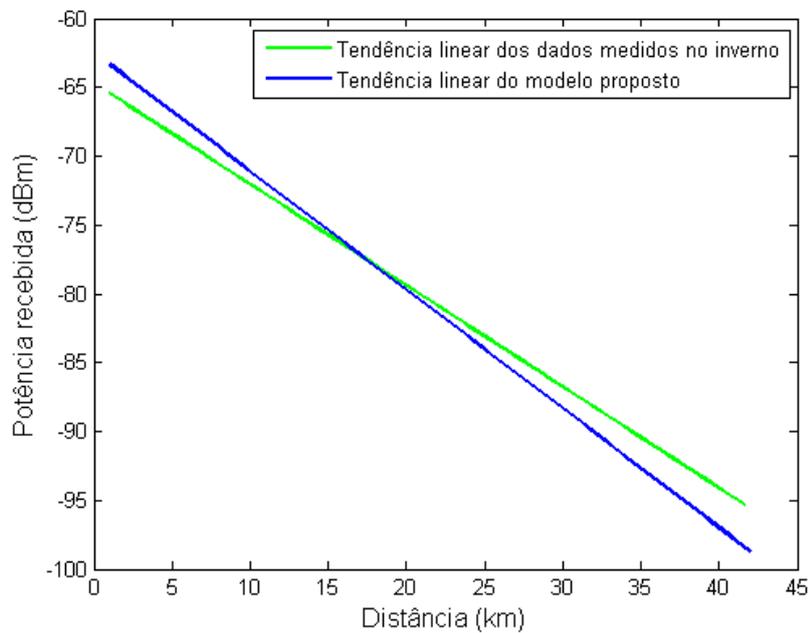


Fig. 8.30. Comparação entre as tendências lineares dos dados apresentados na Fig. 8.28.

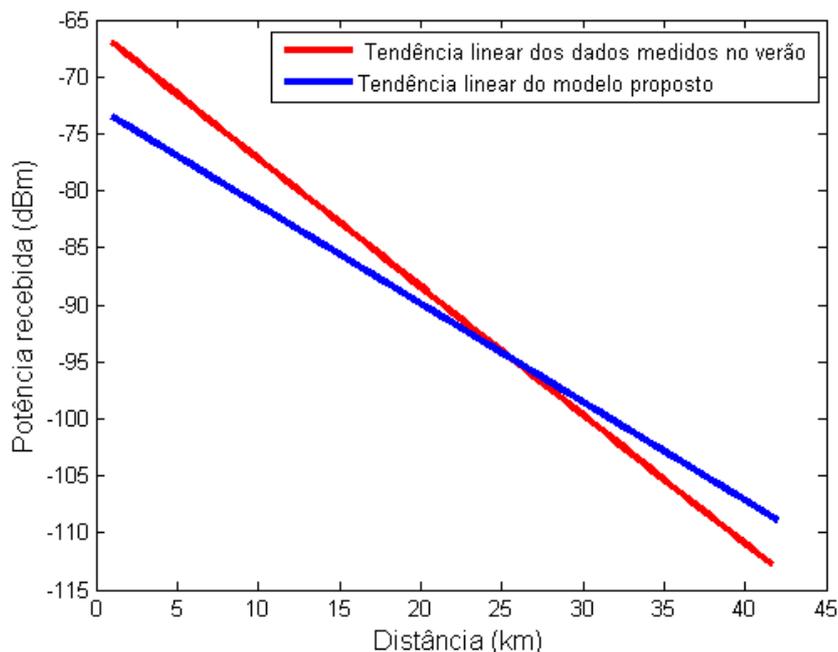


Fig. 8.31. Comparação entre as tendências lineares dos dados apresentados na Fig.8.29.

## 8.6. Comparação com outros modelos

O modelo proposto foi comparado com três modelos diferentes, um para cada tipo de atributo analisado. Primeiramente, o modelo proposto foi comparado com o modelo Hata (1980) para analisar o atributo edificação. Para análise e comparação dos atributos vegetação e passagem por água doce o modelo proposto foi comparado com o modelo de equações parabólicas (OLIVEIRA et al. 2013) e como o modelo para terrenos mistos (GOMES et al. 2012b) respectivamente.

O modelo tradicional Hata é um modelo empírico ponto-área para trajetórias homogêneas. Embora o modelo Hata seja considerado um modelo clássico, continua a ser um modelo básico e importante para comparações (FARUK; ADEDIRAN; AYENI, 2013). Diferentes equações do modelo Hata foram escolhidas para permitir uma comparação satisfatória do atributo edificação. As Figs. 8.32-8.36 mostram a comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para cada tipo de edificação. Pode ser visto que o modelo Hata segue a tendência média dos dados medidos, mas para certos caminhos a diferença atingiu 25dBm. O modelo proposto apresenta um desempenho melhor do que o modelo Hata, pois considera além do atributo edificação, os atributos vegetação e passagem por água doce. Uma comparação de erros pode ser vista na Tabela 8.4. Em todos os casos, o modelo proposto mostrou erros RMS menores, com erros entre 1,67dB e 4,25 dB enquanto que o modelo Hata apresenta erros

entre 3,71 dB e 13,09 dB. Em ambos os casos o tipo de edificação nota 3 apresenta o maior erro RMS, possivelmente devido à grande variabilidade dos dados.

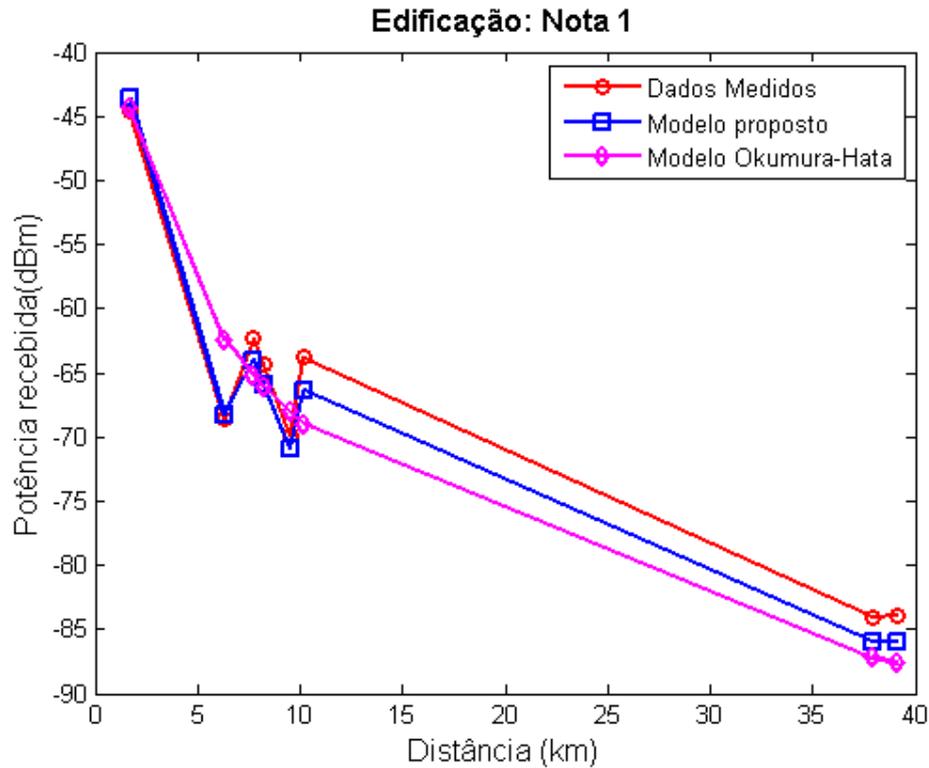


Fig. 8.32. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com espaço livre.

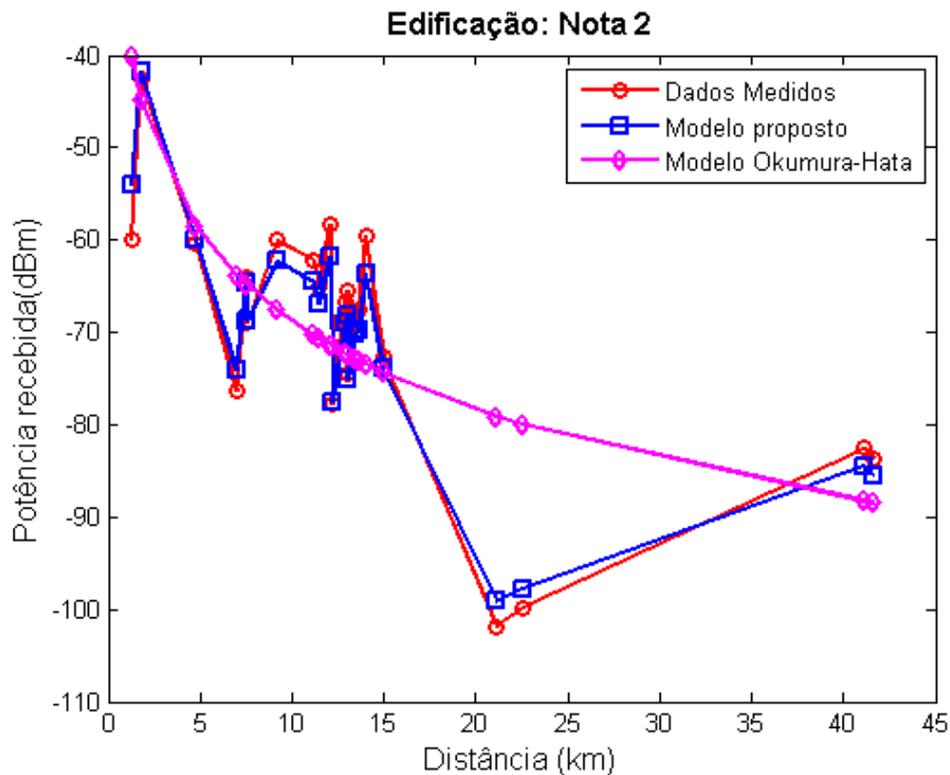


Fig. 8.33. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com pequenas casas.

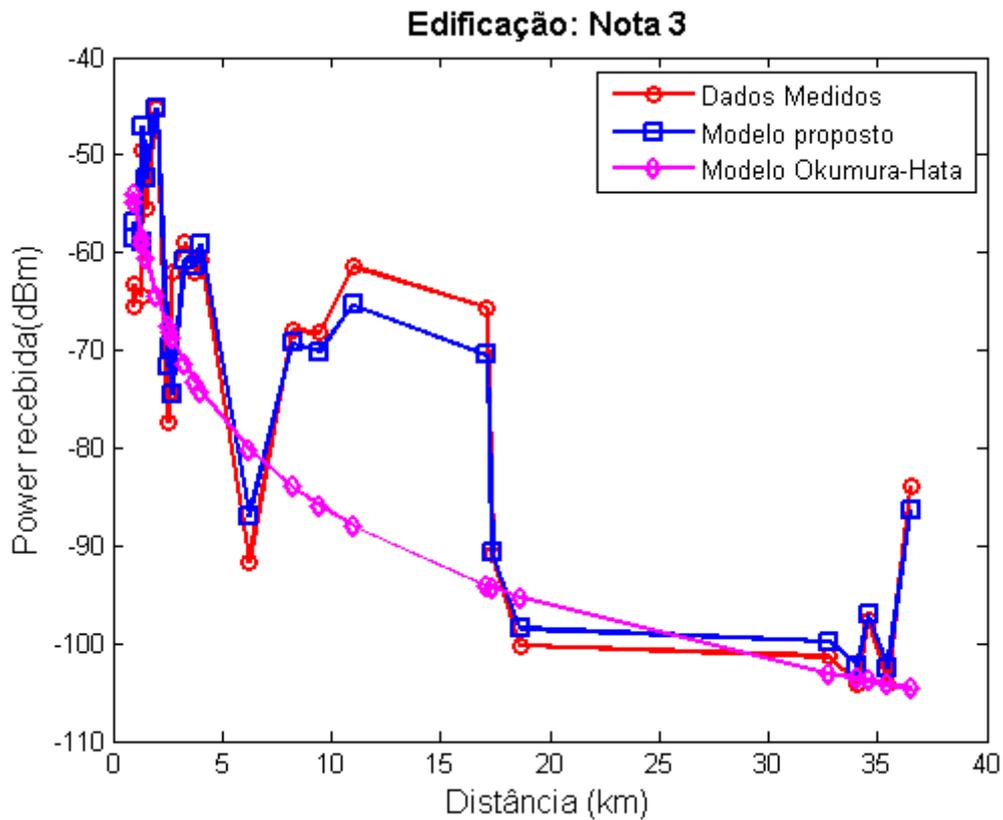


Fig. 8.34. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com muitas casas.

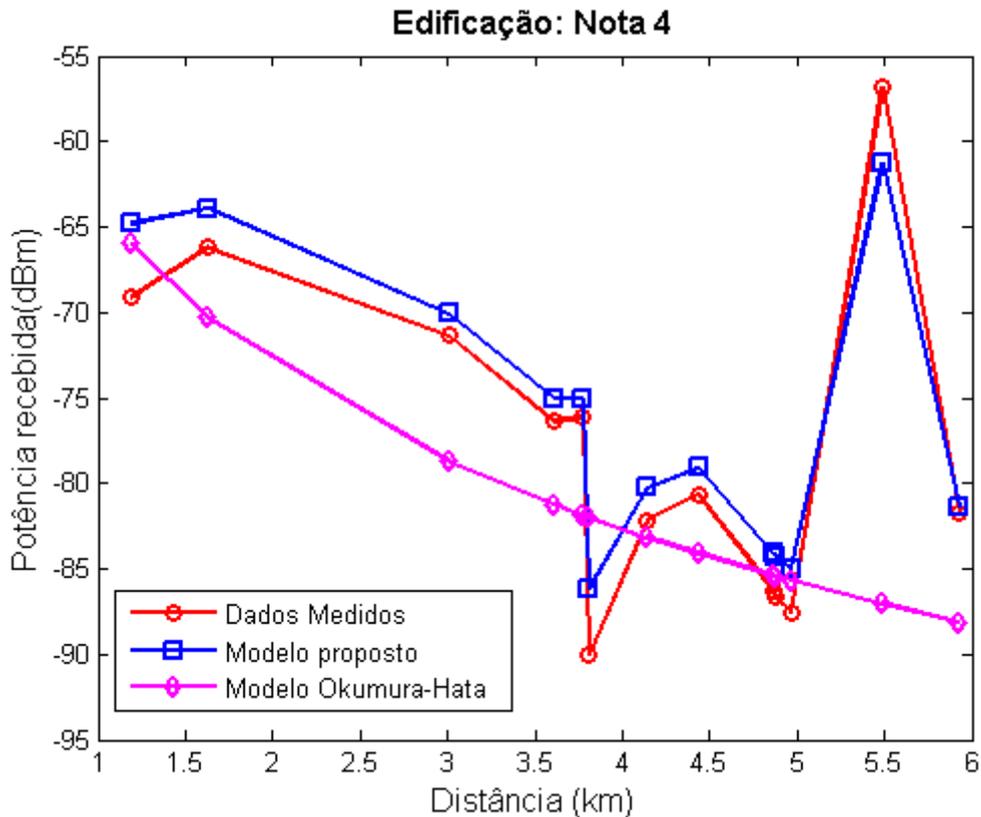


Fig. 8.35. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com pequenos edifícios.

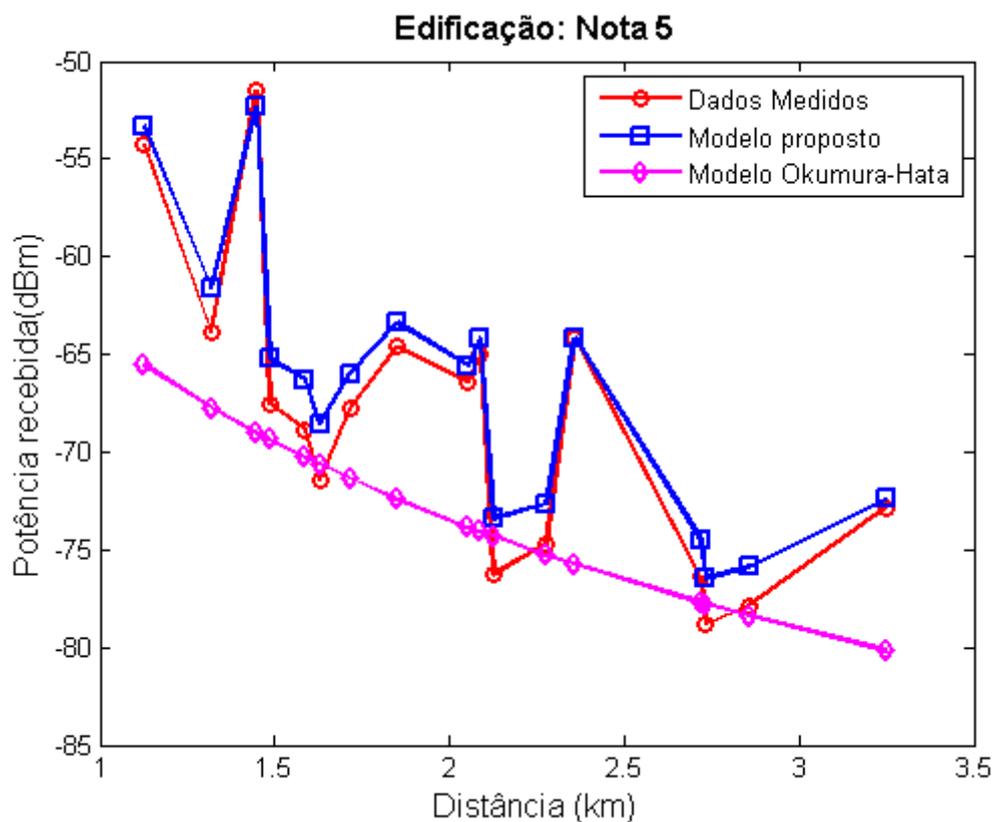


Fig. 8.36. Comparação entre o modelo proposto e o modelo Hata para trajeto com grandes edifícios.

Um modelo empírico baseado na recomendação ITU-R P.1546-4 é apresentado em (GOMES et al. 2012 b). Neste modelo é proposta uma correção na recomendação para terrenos mistos com trajetos sobre água doce. O modelo em (OLIVEIRA et al. 2013) é um modelo determinístico que utiliza equações diferenciais parciais parabólicas para estimar a potência recebida em ambiente de floresta. Fig. 8.37 mostra o perfil comparativo entre os dados medidos, o modelo proposto, o modelo de caminho de água doce (GOMES et al. 2012 b) e o modelo de EP (OLIVEIRA et al. 2013). O modelo em (GOMES et al. 2012 b) é um modelo logarítmico bem comportado e apresenta uma correção para os pontos além da baía do Guajará, no entanto, o modelo proposto apresenta um melhor ajuste com os dados medidos, pois considera outros dois critérios, a vegetação e a edificação. O modelo proposto e o modelo EP apresentam bom desempenho acompanhando os dados medidos. Em ambos os casos pode se ver um aumento da potência recebida nas fronteiras de diferentes morfologias (linhas verticais tracejadas) evidenciando o efeito de recuperação (*recovery effect*).

A Tabela 8.5 mostra a comparação dos erros para cada modelo aplicado. Mais uma vez fica evidente o melhor desempenho do modelo proposto apresentando erro

RMS de 1,68 dB enquanto que o modelo para terrenos mistos tem erro de 6,99 dB e o modelo de EP um erro de 7,61 dB.

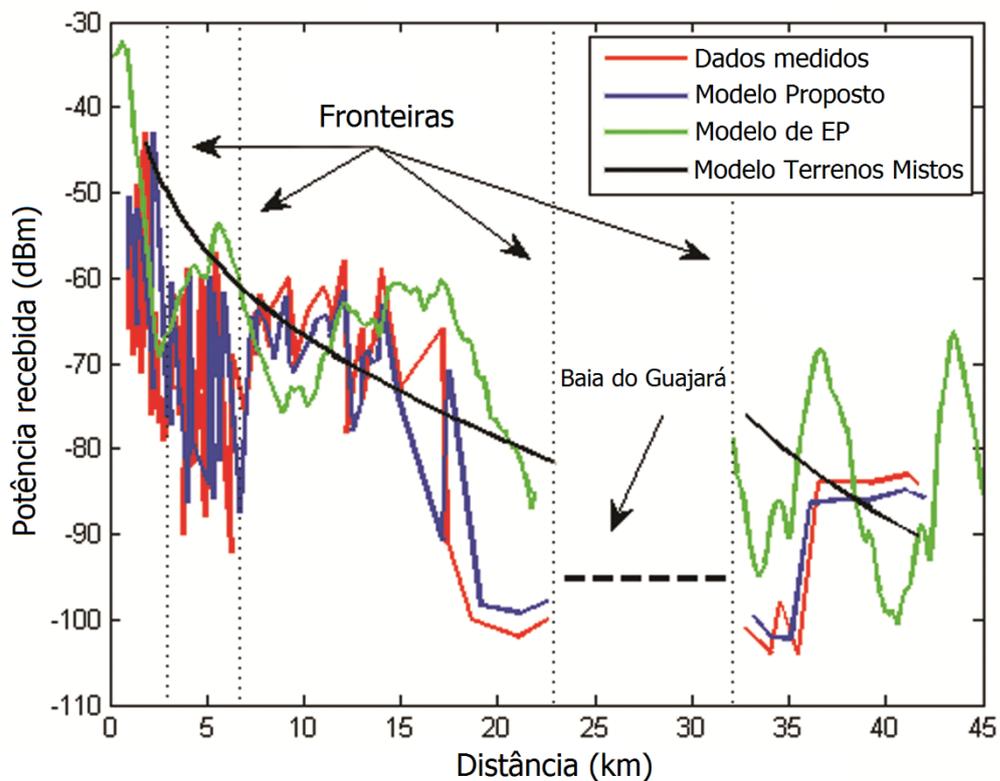


Fig. 8.37. Perfil de perda com a distância para o modelo proposto, o modelo para terrenos mistos e o modelo de EP.

Tabela 8.4. Comparação dos erros RMS entre o modelo proposto e o modelo de Hata para as diferentes notas do atributo edificação.

Tipo de edificação	Erro RMS (dB)	
	Modelo proposto	Modelo de Hata
1	1,67	7,19
2	2,41	9,50
3	4,25	13,09
4	2,57	10,12
5	1,87	3,71

Tabela 8.5. Comparação dos erros RMS entre os três modelos aplicados

Modelo	Erro RMS (dB)
Modelo proposto	1,68
Modelo para terrenos mistos	6,99
Modelo de EP	7,61

## 9. Conclusões

Esta tese propôs um modelo de rádio propagação empírico para TVD para trajetos não homogêneos e climas distintos utilizando técnicas de aprendizado de máquina.

O modelo proposto apresenta vários aspectos inovadores. O primeiro é o caráter híbrido do modelo, utilizado dois tipos de aprendizado de máquina na abordagem teórica/computacional, possibilitando tratar diferentes atributos (quantitativos e qualitativos) mais clara e eficiente.

Outro aspecto inovador é a aplicação do modelo proposto em trajetos não homogêneos contemplando distintos cenários de urbanização e vegetação incluindo grandes porções de água doce. Esse tipo de cenário é comum em cidades localizadas nas florestas equatoriais/tropicais e é muito pouco abordado nos modelos de propagação e recomendações internacionais.

A distinção entre as estações do ano num modelo para faixa de UHF é a culminância desta tese. Poucos trabalhos abordam uma análise sobre chuvas, ventos ou umidade para a faixa de frequência considerada, e em nenhuma das referências estudadas os autores propõem um modelo ou correção para estes atributos.

Para alicerçar todos os aspectos considerados no modelo proposto foram realizadas duas campanhas de medições na região metropolitana de Belém. Os pontos selecionados para medição estavam localizados nos cenários mais distintos possíveis dentro de Belém, visando a aquisição de informações a partir de diferentes tipos de trajetos. Além disto, as campanhas ocorreram intencionalmente no inverno e no verão amazônicos buscando-se por padrões que diferenciassem as duas estações do ano.

A análise dos dados evidenciou um aumento da potência recebida após os trechos com água doce, como a passagem pelos lagos Bolonha e Água Preta e principalmente pela Baía do Guajará. Este aumento é de cerca de 3 dB e possivelmente deve-se à reflexão do sinal sobre a água. Os dados mostraram, ainda, uma distinção entre o verão e o inverno, sendo que a potência do sinal recebido no verão é, em média, 10 dB menor do que no inverno. A observação deste fato acarretou numa busca por uma teoria que pudesse explicar o fenômeno.

A FGD se apresentou como a teoria necessária para explicar os dados obtidos nas campanhas de medições, mostrando que alterações nas constantes de propagação do meio alteram a perda de propagação. Ou ainda, um meio com maior umidade apresenta menor perda de propagação.

O modelo proposto foi analisado e discutido sob vários aspectos. Primeiramente observou-se que a superfície de potências estimadas pelo modelo acompanha a maior parte dos dados apresentando declives ou aclives de acordo com o tipo de edificação ou vegetação naquele lugar. Em seguida, a análise em radiais e segundo os tipos de edificação e vegetação evidencia o bom desempenho do modelo apresentando erros RMS inferiores a 5 dB em todos os casos. Por fim, foram apresentadas as saídas do modelo para estações do ano distintas, mostrando a capacidade do modelo de ajustar-se às diferentes condições climáticas.

A validação do modelo proposto foi baseada na comparação deste com outros modelos, um para cada tipo de atributo analisado. Foram utilizados o modelo de Hata (1980) para analisar o atributo edificação, o modelo de equações parabólicas de (OLIVEIRA et al., 2013) para analisar o atributo vegetação e o modelo de (GOMES et al., 2012 b) que é uma modificação do ITU-R P.1546-4 para terrenos mistos.

Diferentes equações de modelo Hata foram escolhidas para permitir uma comparação satisfatória do atributo edificação. O modelo Hata segue a tendência média dos dados medidos, mas para certos trajetos a diferença atingiu 25 dBm. Em todos os casos, o modelo proposto mostrou erros RMS menores, com erros entre 1,67dB e 4,25 dB enquanto que o modelo Hata apresenta erros entre 3,71 dB e 13,09 dB.

O modelo proposto apresenta os melhores aspectos dos outros dois modelos, ajustando para pontos após a baía do Guajará e apresentando um aumento da potência recebida nas fronteiras de diferentes morfologias, efeito de recuperação (*recovery effect*). Apresenta ainda menor erro RMS de 1,68 dB enquanto que o modelo para terrenos mistos tem erro de 6,99 dB e o modelo de equações parabólicas um erro de 7,61 dB.

De todos os aspectos discutidos pode-se dizer que o modelo proposto apresenta resultados consistentes podendo ser aplicado em outros cenários e climas.

Em trabalhos futuros pretende-se estudar o problema inverso para estimativa dos parâmetros elétricos do solo equivalente da região metropolitana de Belém através de

otimização, com possíveis extensões para outras cidades equatoriais/tropicais. Outro trabalho ainda seria tornar o modelo paramétrico propiciando a aplicabilidade deste mais simples em outros cenários.

## Referências

ALPAYDIN, E. **Introduction to machine learning**. 3a edição. Massachusetts: MIT, 2014.

BATISTA, C.G.; REGO, C.G. Predição da Cobertura em terrenos mistos de baixa rugosidade: uma abordagem via equações integrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT, 25., 2007, Recife. **Anais...**, Recife: SBT, 2007.

BHUVANESWARI, P.; THERESE A. Detection of Cancer in Lung with K-NN Classification Using Genetic Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOMATERIALS AND TECHNOLOGIES – CNT, 2., 2014, Hydeabad. **Anais...**, Elsevier, 2014, p.433-440.

CAVALCATE, G.P.S. Propagação de ondas eletromagnéticas em meios com camadas múltiplas usando funções de Green Diádicas e sua aplicação no modelamento de florestas. 1982. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.

CAVALCANTE, G.P.S.; ROGERS, D.A.; GIAROLA, A.J. Analysis of electromagnetic wave propagation in multilayered media using dyadic Green's functions, **Radio Science**, vol. 17, no. 3, pp. 503-508, May-Jun, 1982.

CAVALCANTE, G.P.S.; GIAROLA, A.J., "Optimization of radio communication in media with three layers," **IEEE Trans Antennas Propagation**, vol. AP-31, pp. 141-145, Jan. 1983.

CAVALCANTE, G.P.S.; ROGERS, D.A.; GIAROLA, A.J. Radio loss in forest using a model with four layered media. **Radio Science**, v.18, n°5, p. 691-695, 1983.

CAVALCANTE, G.P.S.; SANCHES, M.A.R.; OLIVEIRA, R.A.N. Mobile radio propagation along mixed paths in forest environments. In: MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, 4., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: SBMO, 1999. p. 320-324.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES.  
**Planejamento de Canais de TV Digital.** Campinas, 2003.

CHEE, K.L.; TORRICO, S.A.; KUNER, T. Foliage Attenuation Over Mixed Terrains in Rural Areas for Broadband Access at 3.5 GHz. **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, v. 59, nº 7, jul. 2011.

DIAS M.H.C.; SANTOS J.C.A.; SILVA G.M.O. VHF/UHF Urban Sites Coverage Planning with Special Care to Mixed Terrain Transition. **IEEE Latin America Transaction**, v.9, nº 3, jun, 2011.

EUROPEAN COOPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH EURO-COST231, **Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800MHz Bands.** Revision 2, The Hague, set. 1991.

FARUK, N.; ADEDIRAN, Y.A.; AYENI, A. A. Error bounds of empirical path loss models at VHF/UHF bands in Kwara State, Nigeria, In: EUROCON, **Anais...**, Zagreb: IEEE, 2013. p.602-607.

GOMES, C. R.; LEITE, J. B. N.; NASCIMENTO, R. A.; GOMES, I. R.; GOMES, H. S.; FRAIHA, S. G. C.; CAVALCANTE, G. P. S. Knowledge-Based Indoor Propagation Model. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION-EUCAP, **Anais...**, Praga: IEEE, 2012. p. 2087-2090.

GOMES, C. R.; NASCIMENTO, R. N. A.; GOMES, H. S.; CAVALCANTE, G. P. S. Methodology Based on Recommendation ITU-R P.1546-4 for Prediction of Field-Strength in Mixed Path: Land-Freshwater. In: MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE-MOMAG, 15., 2012. **Anais...**, João Pessoa: MOMAG, 2012.

HATA, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service, **IEEE Transactions on , Vehicular Technology**, VT- 29, 3, p.317-325, 1980.

HRUSCHK, E.R.; EBECKEN, N.F.F. Applying a clustering genetic algorithm for extracting rules from a supervised neural network. In: IEEE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS-IJCNN, 2001. **Anais...**, Como: IEEE, 2001. p. 407-412.

HUANG, Y.; KECHADI, T. An effective hybrid learning system for telecommunication churn prediction. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n° 14, p. 5635-5647, out. 2013.

HUNG, K.W.; SIU, C.W. Learning-based image interpolation via robust k-NN searching for coherent AR parameters estimation. **Journal of Visual Communication e Image Representation**, v. 31, p. 305-311, 2015.

INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO AMAZONAS- IDESAM. **Árvores do Sul do Amazonas**: Guia de espécies de interesse econômico e ecológico. Manaus, 2014.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Radiocommunication Sector. **ITU-R P.527-3 Electrical Characteristics of the Surface of the Earth**. Genebra, 1992.

\_\_\_\_\_. ITU-R P.833-7 Attenuation in Vegetation. Genebra, 2012.

\_\_\_\_\_. ITU-R P.837 Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling. Genebra, 2012

\_\_\_\_\_. ITU-R P.840 Attenuation due to clouds and fog. Genebra, 2012.

\_\_\_\_\_. ITU-R P.1546-2 Method for Point-to-area Prediction for Terrestrial Service in Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. Genebra, 2005.

\_\_\_\_\_. ITU-R P.1546-4 Method for Point-to-area Prediction for Terrestrial Service in Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. Genebra, 2009.

KAWANO, T.; GOTO, K.; ISHIHARA, T. New experimental results and asymptotic representation for ground wave propagation land-to-sea mixed-path. In: ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, **Anais...**, San Diego: IEEE, 2008. p. 1-4.

KERAMATI, A.; JAFARI-MARANDI, R.; ALIANNEJADI, M.; AHMADIAN, I.; MOZAFFARI, M.; ABBASI, U. Improved churn prediction in telecommunication industry using data mining techniques. **Applied Soft Computing**, v. 24, p. 994-1012, nov. 2014.

KIRK, M. **Thoughtful machine learning**: a test-drive approach. Sabastopol: O'Reilly, 2014.

LI, L.W.; JIAO, P. N. Solution of the electromagnetic field in a forest model with four layered media, Chinese J. Radio Science. (in Chinese) [or J. Guizhou Univ.-Natural Sci. (in English)], vol. 1(2) [or 6(3) and 7(1) (em duas partes)], pp. 10-25 [ou 24-31 e 41-52], 1986 (e 1989 e 1990, respect.).

LI, L. W.; YEO, T. S.; KOOI, P. S.; LEONG, M. S.; KOH J.H.; Analysis of electromagnetic wave propagations in forest environment along multiple path. **Progress in Electromagnetics Research**, PIER 23, p.137-164, 1999.

LI, L. et al. Wave mode and path characteristics in a four-layered anisotropic forest environment, **IEEE Transaction Antennas Propagation**, vol. 52, no. 9, pp. 2445-2455, set. 2004.

LIAO, D.; SARABANDI, K. Near-Earth wave propagation characteristics of electric dipole in presence of vegetation or snow layer," **IEEE Transaction Antennas Propagation**, vol. 53, no. 11, pp. 3747-3756, nov. 2005.

MÁGNO, F. N. B.; SOUZA, J. F.; VALENTE, Z. A.; COSTA, J. C.; CAVALCANTE, G. P. S. Study of the Slow Fading in Indoor Environment using Parabolic Equation. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 49, n° 7, p. 1676-1679, jul, 2007.

MANDEEP, J.S. et al. Modified ITU-R rain attenuation model for equatorial climate. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE SCIENCE AND COMMUNICATION, **Anais...**, Malásia, 2011.

MAYRINK, M. A. S.; MOREIRA, F. J. S.; REGO, C. G. SILVA MELLO, L. A. R.; CARVALHO, P. H. P.; SOARES, A. J. M.; MELO, E. V. Evaluation of Recommendation ITU-R P1546 for UHF Field-Strength over Fresh-Water Mixed Paths, In: MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE-MOMAG, 12., 2006, Belo Horizonte. **Anais...**, Belo Horizonte: MOMAG, 2006. p. 1-5.

MENG, Y.S.; LEE, Y.H.; NG, B.C. Investigation of rainfall effects on forested radio wave propagation. **IEEE Antennas and wireless propagation letters**, v. 7, pp.159-162, 2008.

\_\_\_\_\_. The effects of tropical weather on radio-wave propagation over foliage channel. **IEEE Transaction on vehicular technology**, v. 58, n 8, out, 2009. pp.4023-4030.

\_\_\_\_\_. Further study of rainfall effect on VHF forested radio-wave propagation with four layered model. **Progress in electromagnetics research-PIER99**, pp.149-161, 2009.

MURPHY, K.P. **Machine learning**: A probabilistic perspective. Massachusetts: MIT, 2012.

NASCIMENTO, R. N. A.; GOMES, C. R.; MARTINS, B. W.; ALMEIDA, M.; GOMES, H. S.; CAVALCANTE, G. P. S. Ajuste na Recomendação ITU-R P.1546-4 para Predição de Campo Elétrico de TV Digital na Região Metropolitana de Belém. In: MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE-MOMAG, 15., 2012. **Anais...**, João Pessoa: MOMAG, 2012.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial intelligence**: a guide to intelligent systems. Harlow:Addison-Wesley, 2a edição, 2005, p.26.

NESKOVIC, A.; NESKOVIC, N.; PAUNOVIC, G.; Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment. **IEEE Communications Surveys**, p. 9-11, 2000.

OLIVEIRA, R. A. N.; SOUZA, J. F.; MAGNO, F. N. B.; COZZOLINO, K.; CAVALCANTE, G. P. S. Propagation Path Loss Prediction Using Parabolic Equations for Narrow and Wide Angles, In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION-EUCAP, 7., 2013, Gothenburg. **Anais...**, Gothenburg: IEEE, 2013. p. 964-968.

OKUMURA, T.; OHMORI, E.; FUKUDA, K. Field strength and its variability in VHF and UHF Land-Mobile radio service. **Review of the Electrical Communication Laboratory**, v. 16, 9-10, p.825-873, 1968.

PEDRONETTE, A. C. G.; PENATTI, O. A. B.; TORRES, R. S. Unsupervised manifold learning using Reciprocal kNN Graphs in image re-ranking and rank aggregation tasks. **Image and Vision Computing**, v.32, p. 120-130, 2014.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002.

RUSSEL, S. J.; NORVING, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Nova Jersey: Prentice-Hall, 1995.

SAKAR, T. K.; JI, Z.; KIM, K.; MEDOURI, A.; SALAZER-PALMA, M. A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v.45, n. 3, p.51-82, jun. 2003.

SAUNDERS, S. R. **Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems**. Baffins Lane: John Wiley and Sons, 1999.

SENGUR, A.; TURKOGLU, I. A hybrid method based on artificial immune system and fuzzy k-NN algorithm for diagnosis of heart valve diseases. **Expert Systems with Applications**. v. 35, p. 1011–1020, 2008.

SILVA, D. K. N.; OLIVEIRA, A. W.; BARROS, W. J. S.; DE ARAUJO, J.P.; CAVALCANTE, G. P. S. Dyadic Green's functions for wireless system to electric field prediction: A study case for digital TV systems in Amazon Region. In: WIRELESS TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM - WTS 2014, **Anais...**, Washington, D.C., 2014.

SUN, K.; KANG, H.; PARK, H. H. Tagging and classifying facial images in cloud environments based on KNN using MapReduce. **International Journal Optik**. 2015.

TAI, C. T. **Dyadic Green's Functions in Electromagnetic Theory**. Scranton: Intext Educational, 1971.

TAMIR, T. On radiowave propagation in forest environments. **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, v.15, n°6, 1967.

TAMIR, T. Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments. **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, AP-25, n°4, jul.1977.

THESSLER, S.; SESNIE, S.; BENDAÑA, Z. S. R.; RUOKOLAINEN K.; TOMPPONEN, E.; FINEGAN, B. Using k-nn and discriminant analyses to classify rain forest types in a

Landsat TM image over northern Costa Rica. **Remote Sensing of Environment**. v.112, p. 2485–2494, 2008.

VAFEIADIS, T.; DIAMANTARAS, K. I. SARIGIANNIDIS, G.; CHATZISAVVAS, K. C. A comparison of machine learning techniques for customer churn prediction. **Simulation Modelling Practice and Theory**. v. 55, p. 1–9, 2015.

VELMURUGAN, T. Performance based analysis between k-Means and Fuzzy C-Means clustering algorithms for connection oriented telecommunication data. **Applied Soft Computing**. v. 19, p. 134–146, 2014.

WITVLIET, B.A.; WIJNINGA, P.W.; VAN MAAEM, E.; SMITH, B.; BENTUM M.J.; SCHIPHORST, R.; SLUMP C.H. Mixed-path trans-horizon UHF measurements for P.1546 propagation model verification. In: TOPICAL CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION IN WIRELESS COMMUNICATIONS APWC, 2011, Torino. **Anais...**, Torino: IEEE, 2011. p. 303-306.

WU, K.; SCHUSTER, J.; OHS, R.; LUEBBERS, R. Application of Moving Window FDTD to Modeling the Effects of Atmospheric Variations and Foliage on Radio Wave Propagation Over Terrain. In: IEEE Military Communications Conference – MILCOM, 2004, Monteray, **Anais...**, Monteray: IEEE, 2004. p.1515-1521.

YEO, J.X.; LEE, Y.H.; ONG J.T. Modified ITU-R Slant Path Rain Attenuation Model for Tropical Region. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION, COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING – ICICS, 7., 2009, Macau. **Anais...**, Macau: IEEE, 2009.