

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Rodrigo Martins de Souza**

**Previsão da Atenuação por Chuvas  
Através de uma Modelagem Semi-  
Empírica Consistente para Enlaces  
Rádio Terrestre e Via Satélite**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro  
Agosto de 2006



**Rodrigo Martins de Souza**

**Previsão da Atenuação por Chuvas  
Através de uma Modelagem Semi-  
Empírica Consistente para Enlaces  
Rádio Terrestre e Via Satélite**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
**Orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Mauro Soares Assis**  
UFF

**Prof. Erasmus Couto Brasil de Miranda**  
UCP

**Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**  
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Nelson Alexander Pérez García**  
Universidad de Los Andes

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de agosto de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## Rodrigo Martins de Souza

Graduou-se em Engenharia de Comunicações pelo Instituto Militar de Engenharia – IME em 1993. cursou Mestrado em Engenharia de Comunicações pelo Instituto Militar de Engenharia – IME. Responsável pelo planejamento, implantação e gerência de projetos em redes rádio do Exército Brasileiro no âmbito do RJ e ES.

### Ficha Catalográfica

Souza, Rodrigo Martins de

Previsão de atenuação por chuvas através de uma modelagem semi-empírica consistente para enlaces rádio terrestres e via satélite / Rodrigo Martins de Souza ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – 2006.

164f. ; 30 cm

Tese (doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Atenuação por chuvas. 3. Enlaces rádio. 4. Comunicações via satélite. 5. Radiometeorologia. 6. Telecomunicações. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*A Deus Todo Poderoso, a meus pais,  
a minha esposa a minha filha*

## **Agradecimentos**

A minha família, em especial, minha esposa, pelo incentivo, compreensão durante o período do desenvolvimento deste trabalho e permanente fonte de inspiração.

Ao meu orientador, Professor Luiz A. R. da Silva Mello, pela sua contínua assessoria e apoio pessoal, moral e profissional.

Ao Professor Rodolfo Sabóia Lima de Souza, por sua amizade, orientação, colaboração, entusiasmo e parceria para a realização deste trabalho.

Ao Professor Erasmus Couto de Miranda, por suas importantes orientações que ajudaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Mauro Soares Assis, pelo incentivo inicial.

Aos amigos Antônio Nascimento, Antônio Neto e Marcelo, pelo apoio e colaborações importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos, chefes e subordinados do 2º CTA, em especial ao Grupo Serra/1, pelo apoio profissional e amizade.

Ao amigo Jorge Luís Cerqueira, por sua amizade.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

## Resumo

Souza, Rodrigo Martins; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Orientador). **Previsão da Atenuação por Chuvas Através de uma Modelagem Semi-Empírica Consistente para Enlaces Rádio Terrestre e Via Satélite**. Rio de Janeiro, 2006. 164p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com a crescente utilização de sistemas de acesso sem fio ponto-multiponto em banda larga, operando em frequências cada vez mais elevadas, cresce também a necessidade do desenvolvimento de novos modelos, mais precisos e consistentes, para a previsão da atenuação por chuvas, principal efeito da propagação em frequências superiores a 10 GHz. Este trabalho apresenta uma modelagem semi-empírica para a previsão do comportamento estatístico da atenuação por chuvas em enlaces rádio terrestres ponto-a-ponto e via satélite. Os modelos foram desenvolvidos com base em resultados de medições conjuntas de taxa de precipitação e atenuação por chuvas em diversas regiões do Brasil, realizadas no período de desenvolvimento deste trabalho, além de medidas de várias partes do mundo, disponíveis no banco de dados de propagação da União Internacional de Telecomunicações (UIT-R). Os modelos desenvolvidos permitem obter a distribuição cumulativa de probabilidades da atenuação por chuvas a partir da distribuição da taxa de precipitação medida ou estimada na região do enlace. Embora existam diversos modelos propostos na literatura para previsão da atenuação em enlaces terrestres ou em enlaces via satélite, duas características importantes não são encontradas, conjuntamente, na maioria deles: utilizar, como base para a previsão, a distribuição da taxa de precipitação em toda a faixa de percentagens de tempo de interesse, e não apenas em um ou dois pontos; e manter consistência entre os modelos para os casos terrestre e via satélite. Além não de atender a estes requisitos, os modelos propostos apresentam erros de previsão menores ou equivalentes aos dos principais modelos da literatura, quando testados contra os resultados disponíveis de medidas em enlaces reais.

## Palavras-chave

Atenuação por Chuvas, Enlaces Rádio, Comunicações via Satélite, Radiometeorologia, Telecomunicações

## Abstract

Souza, Rodrigo Martins; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor). **A Semi-Empiric Consistent Model for Rain Attenuation Prediction in Terrestrial and Satellite Radio Links**. Rio de Janeiro, 2006. 164p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of new technologies for broadband wireless access, using increasingly higher frequencies, points to the necessity of more accurate methods for rain attenuation, that represents the most serious impairment for radio systems operating in frequencies above 10 GHz. This work presents semi-empirical models for the prediction of rain attenuation in terrestrial and satellite links. The models were developed using data obtained in concurrent measurements of rain attenuation and point rainfall rate in different regions of Brazil. Some of these measurements were performed as part of this work and some were already available from previous measurements campaigns. Data available in the UIT-R data banks of propagation measurements were also used, in order to develop global methods. The models that have been developed allow the prediction of the cumulative probability distribution of rain attenuation from the cumulative distribution of point rainfall rate in the region of the link. Although several methods with these purpose can be found in the technical literature, the ones developed in this work present some important features that are not found, as a whole, in any of those models: they use the full rainfall rate distribution over the entire range of time percentages of interest; the terrestrial and satellite models are consistent, that is, the elements used in the terrestrial prediction model are kept in the satellite prediction model that involves a more complex geometry. Besides that, the models proposed show an excellent performance in terms of prediction error, when compared with measured data.

## Keywords

Rain Attenuation, Radio Links, Satellite Communications, Radiometeorology, Telecommunications

# Sumário

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introdução  | 15 |
| 1.1   | Motivação   | 15 |
| 1.2   | Resumo do Problema  | 16 |
| 1.3   | Objetivos do Trabalho   | 17 |
| 1.4   | Organização do Trabalho   | 18 |
| 2     | Conceitos Básicos   | 20 |
| 2.1   | Atenuação por Chuvas em enlaces Rádio                               | 20 |
| 2.2   | Cálculo da Atenuação Epecífica                                      | 22 |
| 2.2.1 | Método Teórico Rigoroso   | 22 |
| 2.2.2 | Características dos Espalhadores                                    | 24 |
| 2.2.3 | Método empírico   | 25 |
| 2.2.4 | Recomendação do UIT-R para o cálculo dos valores de a(f) e b(f)     | 29 |
| 2.3   | Distribuições Cumulativas de Taxa de Precipitação                   | 31 |
| 3     | Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas                       | 33 |
| 3.1   | Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres | 34 |
| 3.1.1 | Recomendação P.530-10 (Modelo do UIT-R)                             | 35 |
| 3.1.2 | Modelo de Crane   | 38 |
| 3.1.3 | Modelo Australiano (DOCUMENTO 3M/38-E, DE UIT-R)                    | 39 |
| 3.1.4 | Modelo Reino Unido (UK)   | 40 |
| 3.1.5 | Modelo Pérez-Mello (CETUC 2004)                                     | 40 |
| 3.1.6 | Modelo Chinês 2005  | 42 |
| 3.2   | Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas em Enlaces Satélite   | 42 |
| 3.2.1 | Modelo da Recomendação 618-8  | 44 |
| 3.2.2 | Modelo Brasil [73]  | 46 |
| 3.2.3 | Modelo Australiano  | 47 |
| 3.2.4 | Modelo Reino Unido (UK)   | 48 |
| 3.2.5 | Modelo Chinês 2005  | 49 |
| 4     | Resultados Experimentais  | 50 |
| 4.1   | Descrição do Experimento  | 53 |
| 4.2   | Pré-Processamento de Séries Temporais [62]                          | 56 |
| 4.3   | Análise de Dados  | 57 |
| 4.3.1 | Distribuição Cumulativa da Taxa de Precipitação                     | 58 |
| 4.3.2 | Distribuição Cumulativa da Atenuação por Chuva                      | 59 |
| 4.3.3 | Distribuição Cumulativa da Atenuação Diferencial                    | 60 |
| 4.4   | Resultados das Medidas Realizadas                                   | 60 |
| 4.5   | Banco de Dados de Medidas Existentes                                | 62 |
| 4.4.1 | Base de Dados de Uit-R [60]   | 62 |
| 4.4.2 | Experimentos Realizados Anteriormente no Brasil [60]                | 64 |



|  |     |
|--|-----|
| 5 Desenvolvimento de Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas                     | 65  |
| 5.1 Desenvolvimento de Modelos para a Previsão da Atenuação em Enlaces Terrestres      | 66  |
| 5.1.1 Formulação Bi-Dimensional para o Fator de Correção Horizontal                    | 67  |
| 5.1.2 Modelo de Previsão Baseado no Comprimento Efetivo do Enlace – Modelo 1           | 69  |
| 5.1.3 Modelo de Previsão Baseado na Taxa de Precipitação Efetiva – Modelo 2            | 74  |
| 5.1.4 Comparação entre os Modelos para Enlaces Terrestres                              | 81  |
| 5.2 Desenvolvimento de Modelos para a Previsão da Atenuação em Enlaces Satélite        | 87  |
| 5.2.1 Formulação do Modelo para Enlaces Satélite                                       | 87  |
| 5.2.1 Ajuste do Fator de Correção Vertical com a Taxa de Precipitação Medida           | 88  |
| 5.2.3 Comparação entre os Modelos para Enlaces Via Satélite                            | 92  |
| 5.3 Modelos para a Previsão da Atenuação Diferencial em Enlaces Terrestres             | 97  |
| 5.3.1 O Conceito de Atenuação Diferencial  | 97  |
| 5.3.2 Revisão do Modelo para Previsão da Atenuação Diferencial                         | 99  |
| <br>   |     |
| 6 Conclusões e Sugestões   | 102 |
| 6.1 Conclusões   | 102 |
| 6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos   | 104 |
| <br>   |     |
| 7 Referências bibliográficas   | 105 |
| <br>   |     |
| Apêndice A – Resultados das Medições Realizadas  | 111 |
| <br>   |     |
| Apêndice B – Cálculo do Comprimento Efetivo para Células Bi-Dimensionais               | 122 |
| B1 Modelagem da Célula de Chuva Circular   | 122 |
| B1.1 Situação I : Círculo intercepta o enlace em dois pontos (E e F)                   | 122 |
| B1.2 Situação II : Círculo intercepta o enlace em apenas um ponto (F)                  | 124 |
| B1.3 Cálculo do fator de redução para células de chuva bidimensionais                  | 126 |
| B1.3.1 Limites de Integração   | 127 |
| <br>   |     |
| Anexo 1 – Conceitos  | 135 |
| AN 1 Seção Reta  | 135 |
| AN 1.1 Seção Reta Diferencial de Espalhamento ( $\sigma_d$ )                           | 135 |
| AN 1.2 Seção Reta de Espalhamento ( $\sigma_s$ )                                       | 136 |
| AN 1.3 Seção Reta de Absorção ( $\sigma_a$ )   | 136 |
| AN 1.4 Seção Reta Total ou de Extinção ( $\sigma_t$ )                                  | 136 |
| AN 1.5 Albedo ( $W_0$ )  | 137 |
| AN 1.6 Relação entre Seção Reta Total e Seção Reta Geométrica para $D \gg \lambda$     | 137 |
| AN 1.7 Teorema Avançado de Espalhamento ou Teorema Ótico                               | 138 |
| AN 1.8 Representação Integral da Amplitude de Espalhamento e da Seção Reta de Absorção | 139 |
| AN 1.9 Teoria de Mie   | 142 |

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 2 – Validação da Relação $A = aR^b$                              | 145 |
| AN 2 Validação da Relação  | 145 |
| AN 2.1 Validação da relação empírica $\gamma = aR^b$                   | 145 |
| AN 2.2 Validação da relação para frequência baixa                      | 145 |
| AN2.3 Validação da relação para frequência alta                        | 149 |
| AN 2.4 Validação da relação para frequência intermediária              | 150 |
| <br>   |     |
| Anexo 3 – Características dos Enlaces em Bancos de Dados da Literatura | 151 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Atenuação por chuvas (A), fog (B) e gases atmosféricos (C)   | 21 |
| Figura 2 – Comparação entre o cálculo da atenuação usando Teoria de Mie e Aproximação Analítica. [5]                                | 27 |
| Figura 3 – Antigas regiões climáticas de chuva definidas pelo UIT-R – América do Sul  | 32 |
| Figura 4 – Taxa de precipitação excedida durante 0,01% do tempo   | 32 |
| Figura 5 – Geometria para a determinação do fator de redução do modelo da UIT-R   | 37 |
| Figura 6 – Distribuição cumulativa da atenuação por chuva no enlace Barueri-RIS   | 41 |
| Figura 7 – Principais parâmetros de um enlace terra – satélite [72]   | 43 |
| Figura 8 – Distribuição geográfica dos enlaces convergentes de Brasília: (a) primeiro ano de medições; (b) segundo ano de medições. | 52 |
| Figura 9 – Distribuição geográfica dos 4 (quatro) enlaces convergentes do Rio de Janeiro  | 53 |
| Figura 10 – <i>Set-up</i> experimental das medidas da atenuação por chuvas nos enlaces convergentes de Brasília e Rio de Janeiro    | 54 |
| Figura 11 – Esquema básico da UAD   | 55 |
| Figura 12 – Série temporal da potência recebida e da taxa de precipitação, gerada pelo programa TSEDIT                              | 57 |
| Figura 13 – Distribuições cumulativas da atenuação medida em Brasília   | 61 |
| Figura 14 – Distribuições cumulativas da atenuação medida no Rio de Janeiro   | 61 |
| Figura 15 – Distribuições cumulativas da taxa de precipitação medida  | 62 |
| Figura 16 – Região onde a célula provoca atenuação no enlace A-B (vista superior)   | 67 |
| Figura 17 – Dependência do fator de redução horizontal com R – modelo 1   | 70 |
| Figura 18 – Dependência do fator de redução horizontal com d – modelo 1   | 70 |
| Figura 19 – Valores medidos e previstos pelo modelo 1 (taxa de precipitação medida)   | 73 |
| Figura 20 – Valores medidos e previstos pelo modelo 1 (taxa de precipitação Rec. 837)   | 73 |
| Figura 21 – Distribuição dos resíduos para o modelo 1 (taxa de precipitação medida)   | 74 |
| Figura 22 – Distribuição dos resíduos para o modelo 1 (taxa de precipitação Rec. 837)   | 74 |
| Figura 23 – Dependência do fator de redução horizontal com d – modelo 2   | 76 |
| Figura 24 – Dependência do fator de redução horizontal com R – modelo 2   | 76 |
| Figura 25 – Valores medidos e previstos pelo modelo 2 (taxa de precipitação medida)   | 78 |
| Figura 26 – Valores medidos e previstos pelo modelo 2 (taxa de precipitação da Rec. 837)  | 78 |
| Figura 27 – Distribuição dos resíduos para o modelo 2 (taxa de precipitação medida)   | 79 |
| Figura 28 – Distribuição dos resíduos para o modelo 2 (taxa de precipitação da Rec. 837)  | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 29 – Valores medidos e previstos para o modelo 2 modificado (Rec. 837)  | 81  |
| Figura 30 – Distribuição dos resíduos para o modelo 2 terrestre (Rec. 837)   | 81  |
| Figura 31 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)                                  | 85  |
| Figura 32 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres (taxa de precipitação Rec. 837)                                | 85  |
| Figura 33 – Dependência do fator de redução vertical com $R$   | 89  |
| Figura 34 – Dependência do fator de redução vertical com $h$   | 89  |
| Figura 35 – Dependência do fator de redução vertical com $a$ latitude  | 90  |
| Figura 36 – Valores medidos e previstos para o modelo satélite (precipitação medida)   | 91  |
| Figura 37 – Valores medidos e previstos para o satélite (Rec. 837)   | 91  |
| Figura 38 – Distribuição dos resíduos para o modelo satélite (precipitação medida)   | 92  |
| Figura 39 – Distribuição dos resíduos para o modelo satélite (Rec. 837)  | 92  |
| Figura 40 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces satélite (taxa de precipitação medida)                                    | 96  |
| Figura 41 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces satélite (taxa de precipitação Rec. 837)                                  | 96  |
| Figura 42 – Situação de atenuação diferencial por chuvas   | 97  |
| Figura 43 – Atenuação diferencial vs atenuação no enlace 1   | 98  |
| Figura 44 – Atenuação diferencial vs atenuação no enlace 2   | 99  |
| Figura 45 – Valores medidos vs previstos da atenuação diferencial  | 100 |
| Figura 46 – Histograma de resíduos do modelo da atenuação diferencial  | 100 |
| Figura 47 – Célula de chuva intercepta dois pontos do enlace   | 122 |
| Figura 48 – Célula de chuva intercepta um ponto próximo à extremidade A do enlace  | 124 |
| Figura 49 – Célula de chuva intercepta um ponto próximo à extremidade B do enlace  | 125 |
| Figura 50 – (a) Região no espaço bidimensional onde a célula de chuva pode interferir no enlace AB; (b) As três posições para integração do segmento de reta que intercepta o enlace | 126 |
| Figura 51 – Região de integração   | 127 |
| Figura 52 – Relação entre seção reta total e seção reta geométrica.  | 137 |
| Figura 53 – Geometria para Teoria de Mie   | 142 |

## Lista de tabelas

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 – Parâmetros a e b   | 28  |
| Tabela 2 – Coeficiente k  | 30  |
| Tabela 3 – Coeficiente $\alpha$ .   | 30  |
| Tabela 4 – Regiões climáticas de UIT-R  | 31  |
| Tabela 5 – Parâmetros dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres             | 35  |
| Tabela 6 – Parâmetros dos modelos para previsão da atenuação em enlaces via satélite                    | 43  |
| Tabela 7 – Dados dos enlaces terrestres convergentes de Brasília  | 51  |
| Tabela 8 – Dados dos enlaces terrestres convergentes do Rio de Janeiro                                  | 52  |
| Tabela 9 – Frequências de operação dos enlaces terrestres da base de dados de UIT-R                     | 63  |
| Tabela 10 – Comprimento dos enlaces terrestres da base de dados de UIT-R                                | 63  |
| Tabela 11 – Comprimento dos enlaces satélite da base de dados de UIT-R                                  | 64  |
| Tabela 12 – Frequência de operação dos enlaces satélite da base de dados de UIT-R                       | 64  |
| Tabela 13 – Valores das constantes ajustadas para modelo 1  | 72  |
| Tabela 14 – Valores das constantes ajustadas para modelo 2  | 77  |
| Tabela 15 – Valores das constantes ajustadas para modelo 2 modificado                                   | 80  |
| Tabela 16 – Erro médio de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)                | 82  |
| Tabela 17 – Erro médio de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação da Rec.837)            | 82  |
| Tabela 18 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)     | 83  |
| Tabela 19 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação da Rec.837) | 83  |
| Tabela 20 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)      | 84  |
| Tabela 21 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação da Rec.837)  | 84  |
| Tabela 22 – Valores das constantes ajustadas para os modelos para enlaces satélite                      | 90  |
| Tabela 23 – Erro médio de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação medida)                  | 93  |
| Tabela 24 – Erro médio de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação Rec.837)                 | 93  |
| Tabela 25 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação medida)       | 94  |
| Tabela 26 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação Rec.837)      | 94  |
| Tabela 27 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação medida)        | 94  |
| Tabela 28 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação Rec.837)       | 95  |
| Tabela 29 – Coeficientes para previsão da atenuação diferencial   | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 30 – Dados de localização dos enlaces de Brasília   | 111 |
| Tabela 31 – Dados de localização dos enlaces do Rio de Janeiro   | 112 |
| Tabela 32 – Medidas de atenuações e taxas de precipitação de chuva realizadas no Rio de Janeiro e em Brasília. | 112 |
| Tabela 33 – Medidas de atenuações diferenciais e taxas de precipitação de chuva realizadas em Brasília         | 116 |
| Tabela 33 – Características dos enlaces terrestres   | 151 |
| Tabela 34 – Características dos enlaces satélite   | 153 |