2
Modelagem da previsão de atenuação por chuvas em enlaces GEO

A caracterização adequada da influência da chuva em enlaces de comunicação via satélite que operam na faixa de freqüência de microondas é fundamental no projeto de sistemas de comunicações devido à aleatoriedade deste fenômeno atmosférico no meio de propagação. Este imperativo move a busca por novos modelos de previsão, que se tornam mais realistas quanto mais diversificada for a base de dados disponível de medidas de longo termo, pois nelas está expressa a variabilidade dos fenômenos que se deseja modelar.

Neste capítulo foram implementados dois tipos de métodos de previsão de atenuação em enlaces fixos com satélites geoestacionários ou simplesmente enlaces GEO. O primeiro método é uma extensão do método atualmente adotado pelo CETUC, anteriormente formulado com base nos dados obtidos na campanha de medidas em regiões tropicais [18] obtidos até aquela época. Nesta modelagem foram incluídos os dados obtidos a partir das medidas com receptores de *beacons* de satélite.

O segundo método de previsão tem o objetivo de ser um modelo global, ou seja, aplicável em qualquer região. Para esta modelagem foi utilizado o banco de dados de medidas de atenuação e chuva da UIT-R DBSG5 [19] atualizado com os dados brasileiros.

Nas duas modelagens foi mantida a representação da célula de chuva que se desloca uniformemente sobre o enlace satélite. Isto corresponde a modelar as variáveis L_o e h_r, que determinam as dimensões da célula de chuva, conforme apresentado no Capítulo 1.

A primeira etapa do trabalho consistiu no tratamento do banco de dados, de onde foram utilizados somente os dados com medidas simultâneas de atenuação e taxa de precipitação. A segunda etapa foi a redução do banco de dados, que resultou no uso de valores médios de atenuação e chuva dos experimentos de cada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

local, categorizados por freqüência e ângulo de elevação, conforme será apresentado.

Na segunda etapa obteve-se então a modelagem de L_o e h_r. A primeira forma, denominada Modelo Cetuc/BR, consistiu em utilizar a equação (1.21) da atenuação A com as expressões desejadas de L_o e h_r com os dados brasileiros existentes no banco de dados mundial. O objetivo é obter um modelo adequado aos diversos regimes de chuvas do Brasil, que reflita com precisão a atenuação medida. Esta necessidade ficará evidente quando for mencionado o método de previsão para sistemas LEO no Capítulo 5, que dependerá da atenuação prevista por um modelo GEO para o local onde se deseja fazer a previsão de atenuação de um sistema LEO.

Na segunda forma, denominada Modelo Cetuc/Global foram utilizadas três expressões para L_o. O objetivo é retratar o comportamento de L_o com mais liberdade do que permitiria o uso de somente uma expressão.

As modelagens foram implementadas na faixa de percentagem de tempo de 0.001 a 1%, faixa de interesse para cálculo de disponibilidade dos enlaces satélite. Esta faixa está longe da saturação observada na curva da distribuição cumulativa de atenuação nas percentagens de tempo mais baixas. Nesta região ocorrem os maiores valores de atenuação, que freqüentemente atingem a saturação do equipamento de medida, fato que pode ser observado na quebra ou mudança da inclinação da curva de distribuição de atenuação. Na parte superior do intervalo, entre 0.1% e 1%, estão as maiores percentagens de tempo, onde ocorrem os menores valores de atenuação, onde a previsão da atenuação pode ser comprometida pelos erros de medida que são da mesma ordem de grandeza destas. Tipicamente se o valor medido é de 0.5dB e o método de previsão calcula aproximadamente 1dB, o erro relativo é de cerca de 100%.

Por fim fez-se a comparação do modelo Cetuc/Global e os modelos da UIT-R [1,2] através da verificação dos erros relativos médios por percentagem de tempo, desvio padrão e valor RMS, e também através do procedimento para cálculo de erro da Recomendação 311 [20].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

2.1. Preparação do Banco de Dados

A modelagem foi feita com base no banco de dados de distribuições cumulativas de atenuação e de taxa de precipitação medidas em enlaces satélite da UIT-R, DBSG5, *Database for Study Group 3*, disponível na página da instituição [19]. Este banco de dados é organizado por local de medida e contém vários experimentos de medidas de atenuação e chuva em diferentes frequências e ângulo de elevação.

Inicialmente tentou-se a modelagem com todas as distribuições deste conjunto, porém a existência de vários anos de medidas com as mesmas características de freqüência e ângulo de elevação em muitos locais não permitiu a identificação clara do comportamento das variáveis L_o e h_r. O espalhamento observado nestas variáveis acabou por mascarar sua verdadeira natureza. A solução foi efetuar uma filtragem, substituindo-se cada grupo de medidas no mesmo local que possuía as mesmas características de freqüência e ângulo de elevação pela distribuição média. Obteve-se assim um número reduzido de distribuições cumulativas de atenuação e de chuva por local. O conjunto final deste banco de dados reduzido possui 154 experimentos.

2.2. Métodos utilizados na estimação dos parâmetros de L_o e h_r

A determinação dos parâmetros de L_o e h_r, equações (1.25) e (1.24) respectivamente, foi feita dentro da expressão da atenuação A (1.21). O objetivo é minimizar a função de perda LF (*Loss Function*). Ela é definida como a soma das diferenças ao quadrado dos valores observados da variável dependente A para os valores previstos pelo modelo.

$$LF = \sum \ (Observados - Previstos)^2 \tag{2.1}$$

O software *Statistica* [21] oferece vários métodos de estimativa ou algoritmos para minimizar a LF e calcular os erros deste processo. O módulo de estimativa não linear utiliza o algoritmo *quasi-Newton* [22] na busca pelo mínimo,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

e como complemento usa os algoritmos *Simplex* [22], *Hooke Jeeves* [22] ou *Rosenbrook* [22]. Estas diferentes estratégias de busca são extremamente necessárias quando a *LF* possui mínimos locais [22].

2.3. Procedimento de modelagem dos parâmetros de L_o e h_r

A modelagem da atenuação medida A conforme a equação (1.21) envolve a escolha adequada das expressões da altura efetiva h_R e comprimento L_o.da célula de chuva equivalente.

$$A = \gamma . \frac{(h_r - hs)/sen\theta}{1 + \frac{(h_r - hs)\cos\theta}{L_o \cdot sen\theta}} \tag{2.2}$$

As formas escolhidas para o comprimento da célula de chuva L_o e altura de chuva h_r são:

$$L_o = a\exp(-|b|R) \tag{2.3}$$

$$h_r = c|lat| + d \tag{2.4}$$

onde a, b, c e d são os parâmetros que serão ajustados, R é a taxa de precipitação e *lat* a latitude do local de medida.

Na Modelagem 1 foi utilizada a equação (2.2) com as expressões (2.3) e (2.4) para o ajuste com o banco de dados. Obteve-se o ajuste dos parâmetros através dos algoritmos referidos e os resultados são apresentados na Tabela 1, onde é apresentada o valor da correlação entre os valores medidos e os valores obtidos com o ajuste.

	Valores
a	12.069
b	0.0056
c	0.133
d	3.228
correlação	0.94

Tabela 1 – Valores dos parâmetros da Modelagem Cetuc/BR

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

A análise dos resíduos reflete a precisão do modelo. A distribuição dos resíduos aparentemente segue a distribuição normal [23], observada no gráfico da Figura 8. Verifica-se que existe um pequeno grupo de medidas com os valores de resíduos altos, conforme a Figura 9, indicando que o modelo não está representando bem estes pontos. Eles correspondem a medidas realizadas no Rio de Janeiro, cuja curva de distribuição cumulativa de atenuação apresentou no período 1 uma inclinação na faixa entre 0.01 e 0.1% diferenciada da inclinação em outras faixas de percentagem de tempo. O gráfico da distribuição cumulativa do Rio está na Seção 2.4. Ressalta-se que este comportamento já foi observado em períodos anteriores de medidas no Rio de Janeiro [35], devendo-se à característica peculiar do local de medida de ser cercado por montanhas que interferem no deslocamento das células de chuva.

A Figura 9 apresenta a plotagem dos valores previstos versus observados.

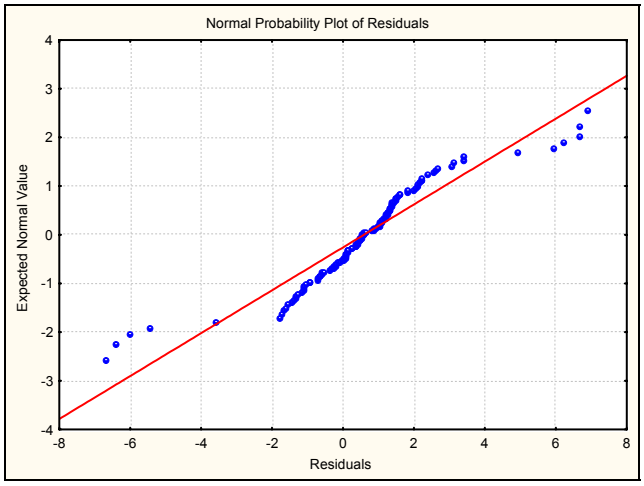

Figura 8 – Plotagem dos resíduos do Modelo Cetuc/BR segundo valores da distribuição normal

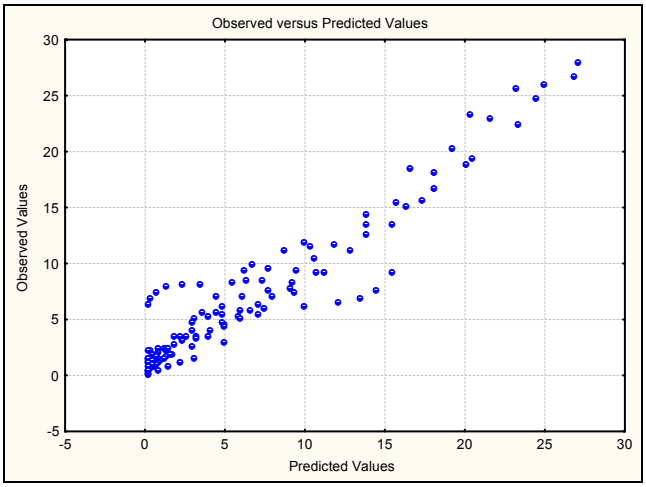

Figura 9 – Valores previstos versus observados

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

O Modelo Cetuc/BR então possui as seguintes expressões para L_o e h_r:

$$\begin{aligned} h_r &= 3.228 + 0.133|lat| \\ L_o &= 12.069\exp(-0.0056R) \end{aligned} \tag{2.5}$$

A expressão de h_r apresenta crescimento com o módulo da latitude, comportamento distinto do apresentado pelo modelo de previsão da UIT, onde a modelagem da altura de chuva h_r com dados mundiais de atenuação apresenta decréscimo com o aumento do módulo da latitude. Esta diferença deve-se ao fato da modelagem de L_o e h_r ter sido feita simultaneamente, resultando em valores de altos de hr que tendem a compensar os baixos valores de L_o, decorrentes de altas taxas de precipitação registradas.

No Modelo Cetuc/Global utilizou-se para L_o três expressões. Como a modelagem foi feita sobre o banco de dados mundial, entende-se que podem ser observadas discrepâncias quando se deseja usar uma única expressão de L_o para acomodar os diversos regimes de chuva. Duas expressões são exponenciais que decrescem com a taxa de precipitação R, e a terceira é uma reta para L_o constante. O valor R = R_o escolhido como limitante entre as duas exponenciais foi R_o = 50 mm/h, por apresentar o ajuste com a melhor correlação, 90%, entre aqueles testados. A faixa de valores válidos de taxa de precipitação vai até 100 mm/h, a partir do qual o valor de L_o é mantido constante.

A expressão para L_o utilizada na modelagem no *Statistica* [21] foi:

$$L_o = a_1(1 - a_o W)\exp(-|b_1(1 - b_o W)|R) \tag{2.6}$$

onde

$$W = \begin{cases} 0 => R \le R_o \\ 1 => R > R_o \end{cases} \tag{2.7}$$

A utilização do parâmetro W permite que na faixa $R \le R_o$ seja válida somente a expressão L_{o1}, e acima de R_o é válida L_{o2}, conforme apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} L_{o1} &= a_1\exp(-|b_1|R) && R \le R_o \\ L_{o2} &= a_1(1 - a_o)\exp(-|b_1(1 - b_o)|R) = a_2\exp(-|b_2|R) && R > R_o \end{aligned} \tag{2.8}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

A condição de contorno em R = R_o foi determinada em função dos parâmetros de cada exponencial, para $L_{o1}(R_o)=L_{o2}(R_o)$. Igualando as duas expressões obtém-se

$$|b_o| = \frac{\ln(a_1/a_2)}{|50b_1|} = \frac{\ln(1/(1-a_o))}{|50b_1|} \tag{2.9}$$

Como resultado da aplicação de b_0 de (2.9) em L_o (2.8) na equação da atenuação de (2.2), foi feito o ajuste através de 2 métodos diferentes. Os valores encontrados são muito similares e foi obtida a correlação de 91%. Os valores são apresentados na Tabela 2.

Fazendo-se a análise dos resíduos observa-se que a sua distribuição segue aproximadamente a distribuição normal, à exceção de alguns valores cujo resíduo é maior, que não são bem representados por este modelo.

	Valores
c	4.94
d	0.0427
a_1	41.44
a_0	0.470
b_1	0.0282
correlação	0.91

Tabela 2 – Parâmetros para o Modelo Cetuc/Global

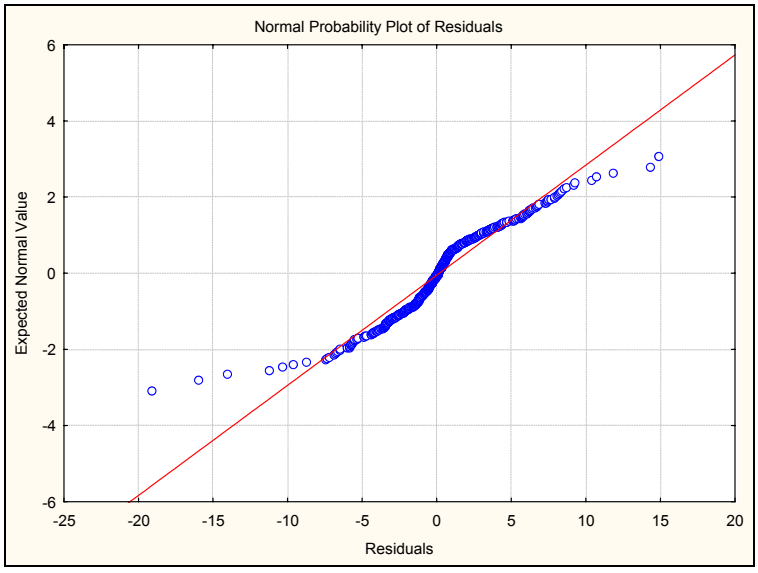

Figura 10 – Distribuição dos resíduos do Modelo Cetuc/Global

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

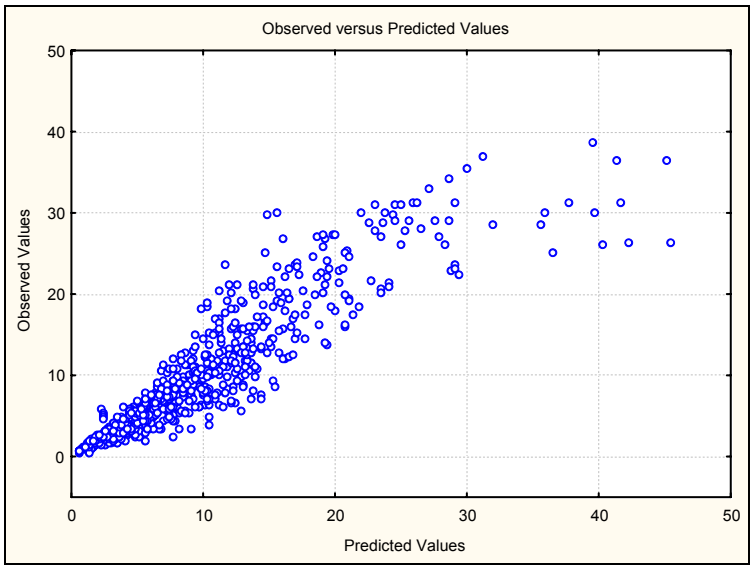

Figura 11 – Valores previstos versus observados

O Modelo Cetuc/Global possui as seguintes expressões para L_o e h_r, ambos expressos em quilômetros:

$$h_r = 4.94 - 0.0427|lat|$$
$$L_o = \begin{cases} 41.44\exp(-0.0282R) & R \le 50mm/h \\ 21.95\exp(-0.0155R) & 50 < R \le 100mm/h \\ 21.95\exp(-0.0155*100) & R > 100mm/h \end{cases} \quad (2.10)$$

2.4. Aplicação dos modelos de previsão Cetuc/BR e Cetuc/Global no Brasil

Nesta seção será apresentada a previsão de atenuação através dos modelos desenvolvidos na seção anterior para alguns locais de medida no Brasil que estão sendo utilizados em todo este trabalho, a saber: Mosqueiro (PA), Rio de Janeiro (RJ), Curitiba (PR) e Porto Alegre (RS). A análise qualitativa dos dois modelos mostra que o modelo Cetuc/BR retrata melhor a atenuação medida que o modelo Cetuc/Global. O Modelo LEO que será desenvolvido no Capítulo 5 necessitará de um modelo GEO de previsão e este modelo Cetuc/BR mostrou-se o mais adequado para a representação das medidas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

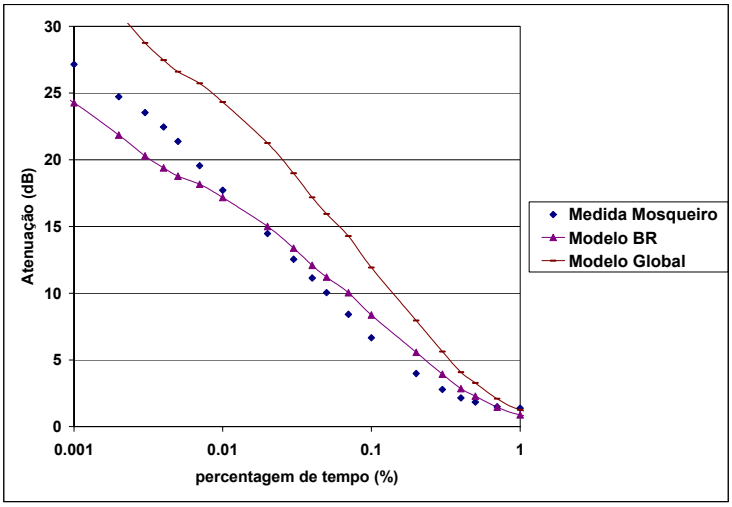

Figura 12 – Previsão de atenuação por dois modelos em Mosqueiro (PA)

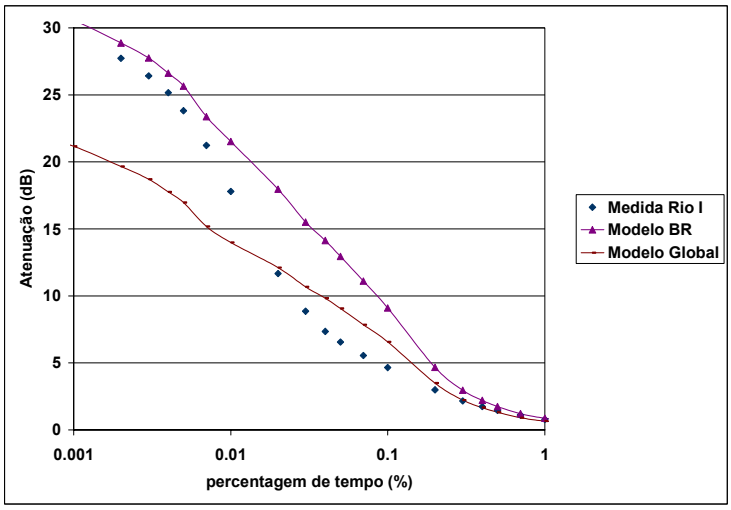

Figura 13 – Previsão de atenuação por dois modelos no Rio de Janeiro (RJ), período 1

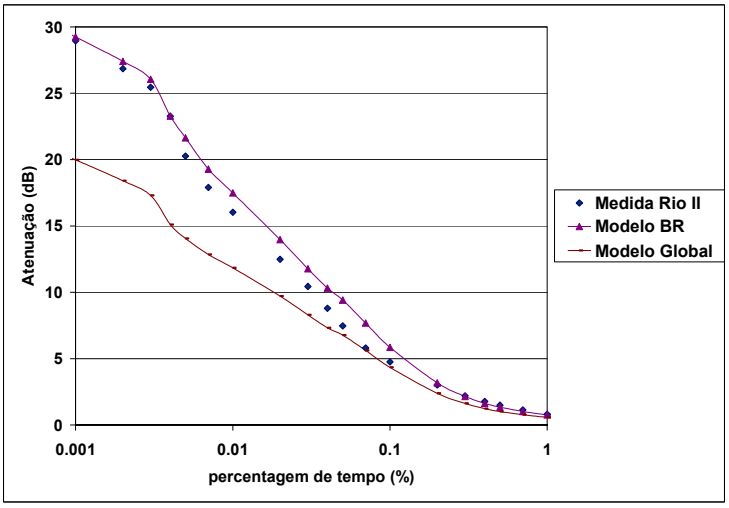

Figura 14 – Previsão de atenuação por dois modelos no Rio de Janeiro (RJ), período 2

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

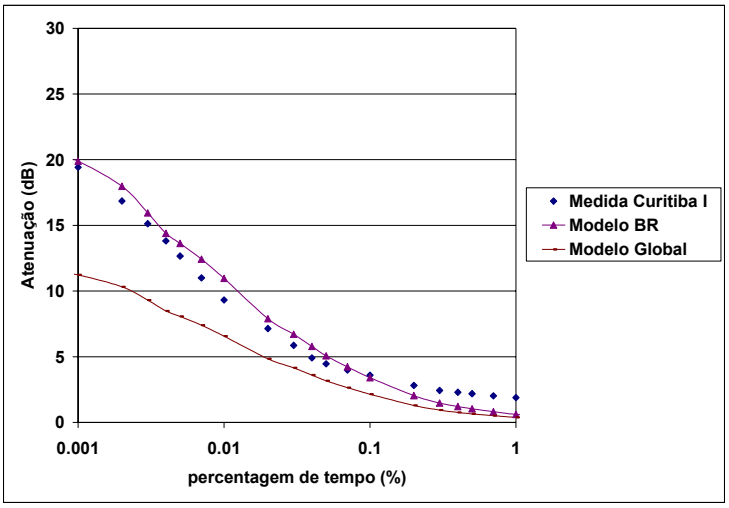

Figura 15 – Previsão de atenuação por dois modelos em Curitiba (PR), período 1

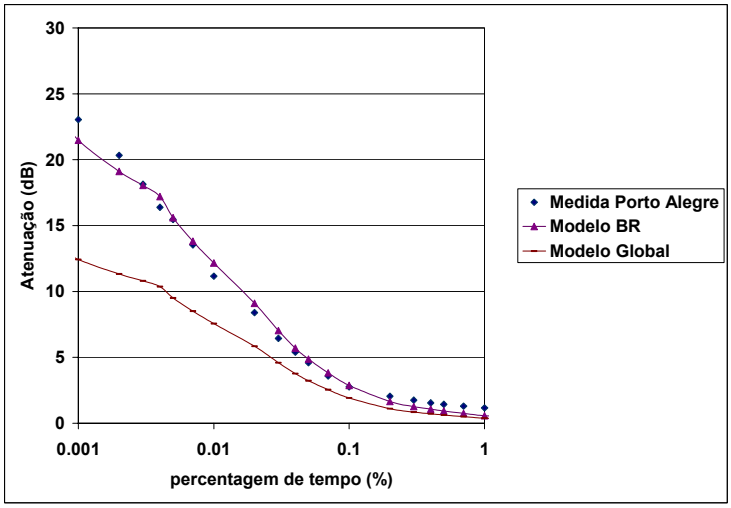

Figura 16 – Previsão de atenuação por dois modelos em Porto Alegre (RS)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

2.5. Comparação entre o modelo desenvolvido e o modelo UIT-R

Nesta seção é feita a comparação entre o Modelo Cetuc/Global desenvolvido e os modelos da UIT-R Recomendação 618-7 [1] atualmente em vigor, aqui denominado de ITU-R novo, e UIT-R Recomendação 618-4 [2], denominado ITU-R antigo. A comparação é feita através da aplicação destes ao banco de dados da atenuação medida (A_{obs}) e através do cálculo do erro relativo médio por percentagem de tempo, desvio padrão e valor RMS. Também é utilizado o procedimento de cálculo de erro da Recomendação UIT-R P311 [20], descrito no Apêndice IV, que determina a verificação da variável de teste Vi para

o cálculo do valor de erro médio por percentagem de tempo, desvio padrão e valor RMS.

O cálculo do erro relativo é dado pela equação (2.13), sendo obtida a média do erro por percentagem de tempo.

$$E_{rel} = \frac{A_{obs} - A_{prev}}{A_{obs}}(\%) \tag{2.13}$$

Os resultados são apresentados nas Figuras 17 a 19. Os valores de erro médio por percentagem de tempo, desvio padrão e valor RMS segundo a Recomendação 311 são apresentados nas Figuras 20, 21 e 22.

O cálculo do erro relativo apresenta para o Modelo Cetuc/Global melhor desempenho que os outros métodos, através da observação do gráfico do desvio padrão e valor RMS. O procedimento de cálculo de erro através da Recomendação UIT-R 311 utiliza um fator de escala para as atenuações medidas abaixo de 10 dB para compensar efeitos que afetam principalmente os baixos valores de atenuação, como as imprecisões de medida e a contribuição de outras causas de atenuação diferentes da chuva. Com esta correção o cálculo se torna mais realista. A inspeção visual dos gráficos de desvio padrão e valor RMS mostra que o desempenho do modelo proposto fica mais próximo dos outros métodos.

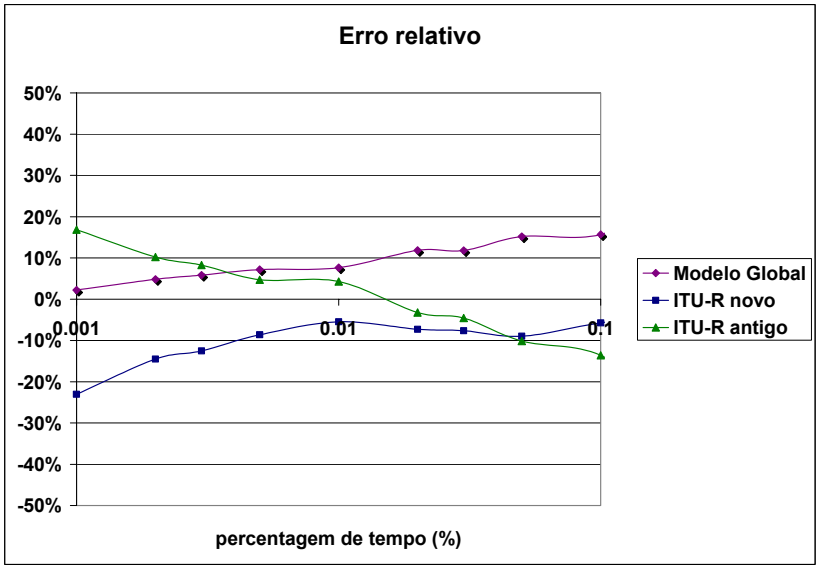

Figura 17 – Erro relativo médio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

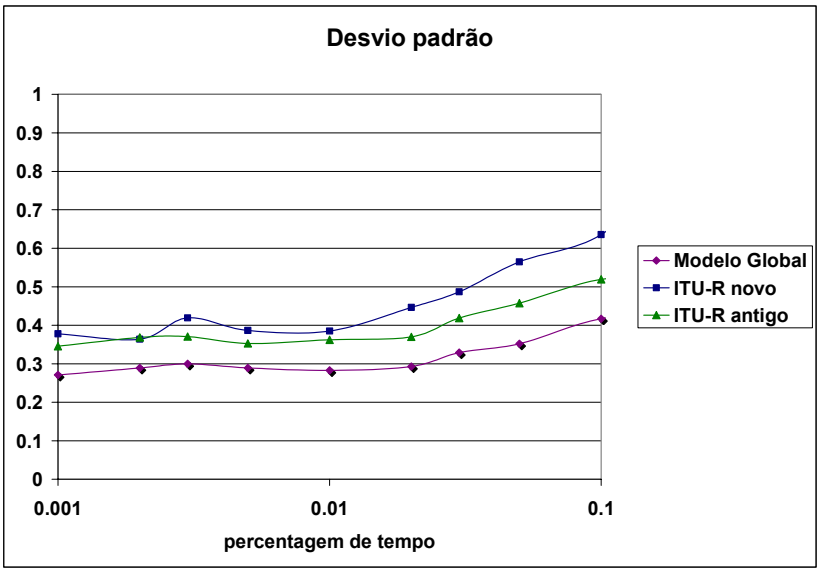

Figura 18 – Desvio padrão

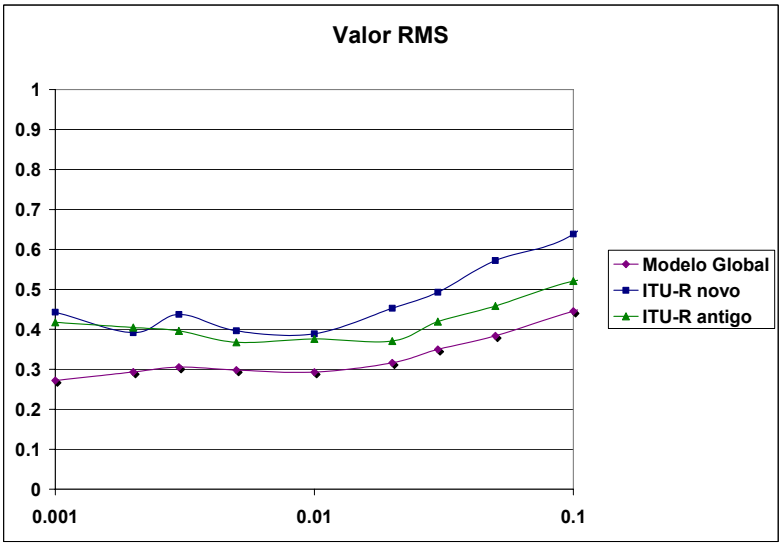

Figura 19 – Erro RMS

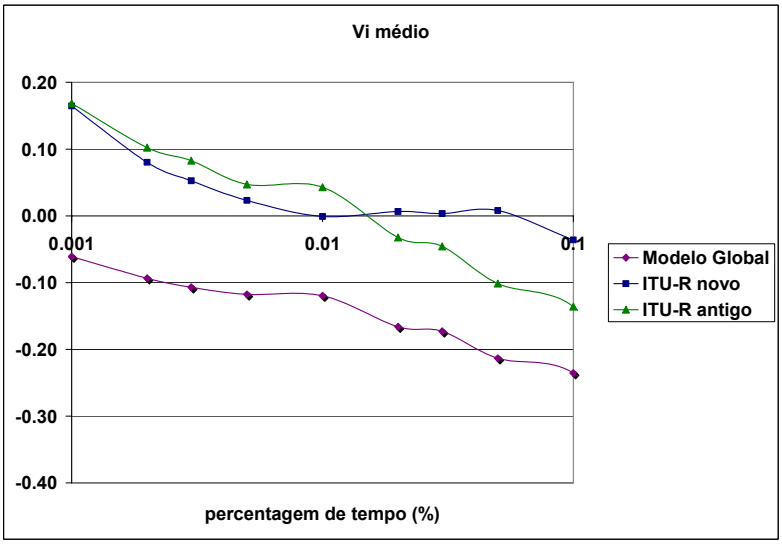

Figura 20 – Valor de Vi médio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

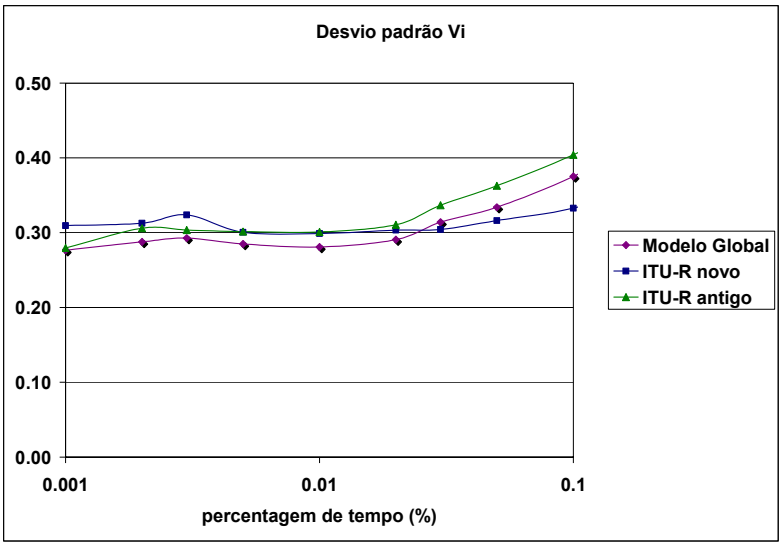

Figura 21 – Desvio padrão de Vi

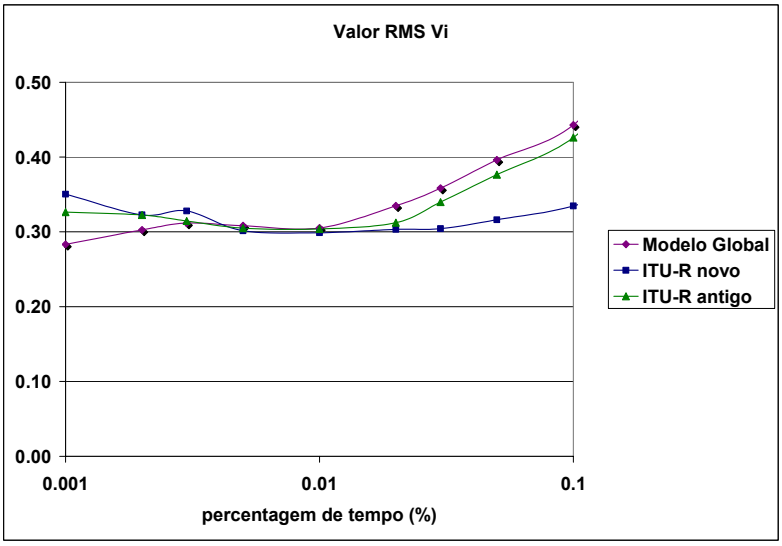

Figura 22 – Valor RMS de Vi

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA

2.6. Conclusão

Neste capítulo foi feita uma modelagem para o banco de dados mundial de atenuação, chamado Modelo Cetuc/Global, que utiliza três expressões para o comprimento da célula de chuva L_o. Na comparação com os modelos de previsão do UIT-R, Recomendação 618-7, denominado ITU-R novo, e Recomendação 618-4, denominado ITU-R antigo, verificou-se que pelo cálculo do erro relativo seu desempenho é melhor. Com o procedimento de cálculo da Recomendação

311, onde é usada uma variável de teste Vi e um fator de escala nas atenuações medidas abaixo de 10 dB para compensar os efeitos da imprecisão da medida, verifica-se que seu desempenho está melhor que o ITU-R antigo e ainda inferior à ITU-R novo.

A modelagem realizada com os dados brasileiros de atenuação apresentou uma previsão para o Brasil com boa precisão. Sua aplicação será feita no desenvolvimento da modelagem de sistemas LEO, que será apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916926/CA