

5

Desenvolvimento de Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de modelos para a previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite. Os modelos são estatísticos e semi-empíricos, pois utilizam a atenuação específica obtida a partir de modelos físicos apresentados no capítulo 2, enquanto que a não homogeneidade espacial da chuva é modelada através de fatores de correção obtidos pelo ajuste de expressões empíricas a dados experimentais estatísticos obtidos em medidas de atenuação e taxa de precipitação realizadas em enlaces terrestres e via satélite.

As seguintes premissas foram adotadas no desenvolvimento:

- Os modelos devem ser consistentes, corrigindo a situação atualmente observada em relação aos modelos recomendados pelo UIT-R, em que o modelo para enlaces terrestres e o modelo para enlaces via satélite não guardam qualquer relação entre si. O modelo desenvolvido para enlaces terrestres utiliza um fator de correção horizontal para levar em conta a não homogeneidade da chuva ao longo do percurso. O modelo para enlaces satélite deve incorporar este fator de correção, combinado com um fator de correção vertical para levar em conta a não homogeneidade entre o solo e a altura de chuva.
- Os modelos devem utilizar a distribuição completa da atenuação por chuvas, medida ou estimada na região do enlace, evitando-se a simplificação de realizar o ajuste do modelo para uma única percentagem de tempo e empregar uma fórmula de extrapolação para obter a distribuição completa. Este procedimento, apesar de fornecer bons resultados em termos do erro global de previsão, não tem justificativa física e produz grandes distorções em casos específicos.
- A dependência com a frequência das expressões para cálculo da atenuação deve ser refletida apenas no fator que representa a atenuação

específica, ou seja, nos parâmetros k e α . Os fatores de correção que levam em conta a não homogeneidade espacial da chuva não devem depender da frequência, pois isto não tem qualquer justificativa física.

5.1

Desenvolvimento de Modelos para a Previsão da Atenuação em Enlaces Terrestres

Para a construção do modelo de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres, foi desenvolvida, inicialmente, uma formulação para o fator de correção horizontal que leva em conta a não uniformidade espacial da chuva. A formulação é semelhante à utilizada no modelo do UIT-R, mas é bi-dimensional, ou seja, considera a variação aleatória da posição de uma célula de chuva equivalente não apenas no plano vertical que contém o enlace mas também no plano horizontal.

Como será visto, apesar do grau de liberdade introduzido em relação ao posicionamento da célula, o fator de correção obtido por esta formulação é muito semelhante ao do modelo do UIT-R. Assim, embora este modelo seja interessante do ponto de vista da base física associada, ele não permite obter um bom resultado para o caso de enlaces em que o fator de correção, obtido experimentalmente, é maior do que um, o que é observado em muitos casos práticos. Assim, foi desenvolvido um segundo modelo, com uma expressão empírica mais geral para o fator de correção, que permite um melhor ajuste dos dados experimentais.

Os parâmetros dos modelos desenvolvidos foram ajustados para minimizar o erro de previsão em relação a todos os dados de medidas de atenuação por chuvas disponíveis, que inclui tanto o banco de dados do UIT-R como os resultados obtidos no Brasil, no âmbito deste trabalho e anteriormente, como descrito no capítulo 4.

Quanto às distribuições cumulativas da atenuação por chuvas, os ajustes foram realizados utilizando tanto as distribuições da taxa de precipitação medidas de forma concorre com as medidas de atenuação, como as distribuições obtidas para os locais de medida a partir dos mapas digitais de taxa de precipitação do UIT-R, baseados em dados da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Assim, foram obtidos dois conjuntos de parâmetros para cada modelo. Embora a

modelagem resultante do uso de dados medidos de taxa de precipitação produza melhores previsões, considerou-se que os usuários dos modelos só terão disponíveis, na maioria dos casos, os mapas digitais do UIT-R.

Os modelos desenvolvidos foram testados contra a base de dados de atenuação por chuvas disponível, e os resultados comparados com testes dos demais modelos de previsão apresentados no capítulo 3.

5.1.1

Formulação bi-dimensional para o fator de correção horizontal

Para levar em consideração a não uniformidade da chuva ao longo do enlace, será considerado que a atenuação pode ser calculada utilizando uma célula de chuva equivalente, de formato circular, onde a taxa de precipitação é uniforme e depende da taxa de precipitação pontual, medida em um ponto da região do enlace (normalmente um dos extremos), e do próprio comprimento do enlace. O raio desta célula equivalente dependerá também da taxa de precipitação pontual e do comprimento do enlace.

As diferenças entre a formulação desenvolvida e aquela empregada no modelo do UIT-R, como descrito no capítulo 3, são: (a) a taxa de precipitação equivalente da célula de chuva uniforme é função da taxa de precipitação pontual e também do comprimento do enlace (no modelo do UIT-R ela é a própria taxa de precipitação pontual); (b) a célula de chuva circular equivalente pode estar posicionada em qualquer ponto do plano horizontal, sendo a região de interesse delimitada pela situação em que a célula circular tangencia o enlace, como mostrado na figura 16.

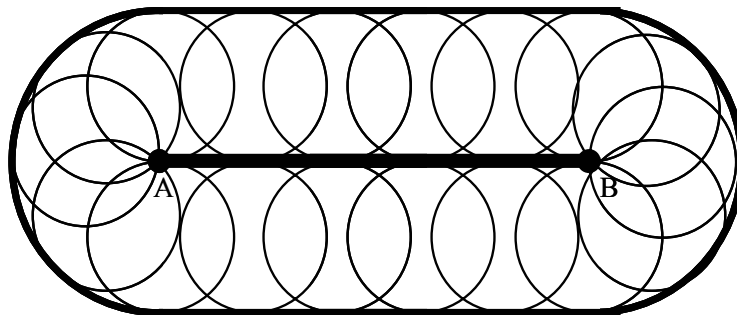


Figura 16 – Região onde a célula provoca atenuação no enlace A-B (vista superior)

O comprimento efetivo (d_{eff}) do enlace é definido como o valor médio da interseção do enlace com uma célula posicionada aleatoriamente nesta região, S. Este comprimento efetivo depende do raio da célula e do comprimento do enlace, e pode ser obtido integrando-se o produto do comprimento desta interseção (d_{int}) à densidade de probabilidade espacial da posição da célula, $p_{xy}(x,y)$, na região indicada na figura 16:

$$d_{eff} = \iint_S d_{int}(x,y) p_{xy}(x,y) dx dy \quad (5.1)$$

Como não há posição preferencial para a célula de chuva, será assumido que esta densidade de probabilidade é uniforme, ou seja:

$$p_{xy}(x,y) = \frac{1}{\text{Área de S}} \quad (5.2)$$

Ainda assim, o cálculo do comprimento efetivo é bastante laborioso, pois deve ser realizado considerando os dois casos em que o raio da célula é menor ou maior que o comprimento do enlace, e as situações em que o enlace intercepta total ou parcialmente a célula de chuva. O cálculo, apresentado em detalhes no Apêndice B, fornece a seguinte expressão para o comprimento efetivo do enlace:

$$d_{eff} = \frac{d}{1 + \frac{2d}{\pi d_0}} \quad (5.3)$$

Considerando $d_{eff} = r \cdot d$, o fator de redução r é dado por:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{2d}{\pi d_0}} \quad (5.4)$$

Verifica-se que esta expressão difere da obtida no caso do modelo do UIT-R apenas por uma constante $\pi/2$ que multiplica o raio da célula.

5.1.2

Modelo de previsão baseado no comprimento efetivo do enlace – modelo 1

O primeiro modelo de previsão foi desenvolvido através do ajuste dos parâmetros de expressões empíricas para o raio e a taxa de precipitação equivalente da célula, considerando a formulação apresentada na seção anterior. Neste modelo, a atenuação excedida durante $p\%$ do tempo é dada por

$$A(p) = kR_{eff}^{\alpha}(p) d_{eff} = kR_{eff}^{\alpha}(p) \frac{d}{1 + \frac{2d}{\pi d_0(p)}} \quad (5.5)$$

A expressão indica que o ajuste foi realizado assumindo, a priori, uma dependência do comprimento e taxa de precipitação efetivos para cálculo da atenuação excedida durante $p\%$ do tempo com o valor de taxa de precipitação pontual excedida na mesma percentagem de tempo.

Para investigar o comportamento das variáveis com parâmetros conhecidos como o comprimento do enlace e a taxa de precipitação, é possível definir um novo fator de correção $r_h(p)$ na forma:

$$r_h = \frac{A(p)}{kR^{\alpha}d} = \frac{R_{eff}^{\alpha}}{R^{\alpha}(1 + 2d / \pi d_0)} \quad (5.6)$$

Na expressão acima foi omitida a dependência de r , A , R e d_0 com a percentagem do tempo, que também fica subentendida nas expressões que se seguem, por uma questão de simplicidade.

A figura 17 mostra o comportamento deste fator de correção com a taxa de precipitação pontual para todos os enlaces do banco de dados utilizado. Nesta figura é possível observar claramente dois grupos de dados nos quais o fator de correção decai com a taxa de precipitação segundo uma lei exponencial ou de potência negativa. O grupo de dados associado a maiores valores do fator de correção corresponde aos enlaces de pequeno comprimento.

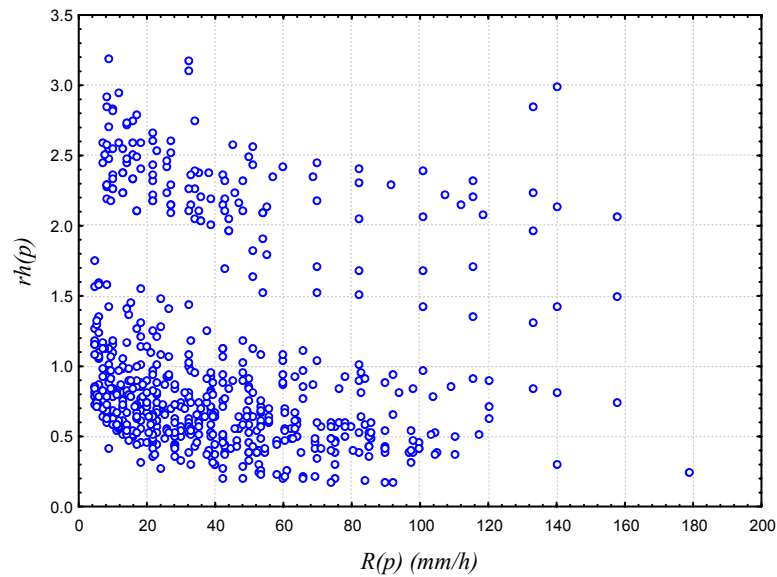


Figura 17 – Dependência do fator de redução horizontal com R – modelo 1

Análise semelhante, ilustrada na figura 18, mostra de forma ainda mais acentuada um decaimento não linear do fator de correção com o comprimento do enlace.

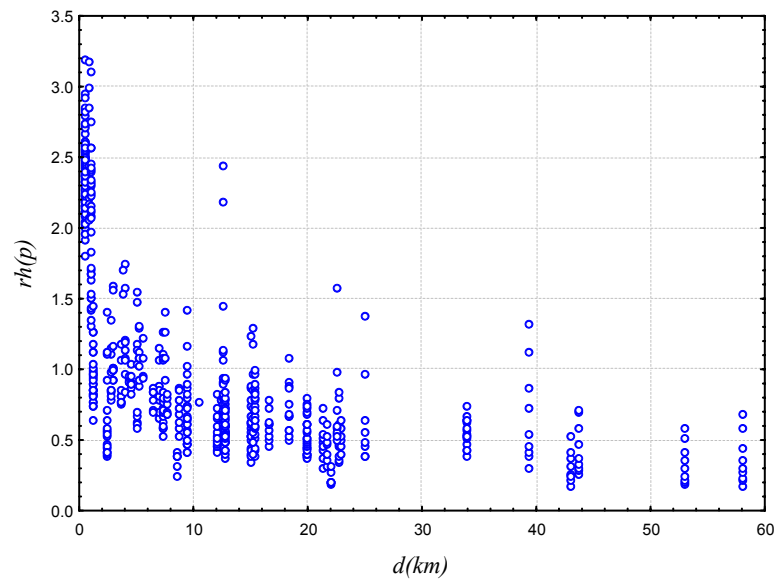


Figura 18 – Dependência do fator de redução horizontal com d – modelo 1

Com base nesta análise, foram escolhidas as seguintes expressões empíricas para o comprimento e a taxa de precipitação efetivos:

$$R_{eff} = \left(a_1 R^{\left(a_2 + \frac{a_3}{d+1} \right)} \right) \quad (5.7)$$

$$d_{eff} = \frac{d}{1 + \frac{2d}{\pi a_4 R^{a_5}}} \quad (5.8)$$

O termo dependente de d no expoente da expressão (5.7) foi incluído, pois verificou-se empiricamente que esta forma funcional fornece resultados bem melhores do que uma simples constante. O mesmo motivo levou à escolha de funções de potência em lugar de uma exponencial negativa.

Os valores dos parâmetros a_1 a a_5 foram obtidos através de uma regressão não linear múltipla, utilizando uma variação do método de Newton (Quasi-Newton). Outros métodos foram testados (Simplex e Hooke-Jeeves) para assegurar a consistência dos resultados. Como função a ser minimizada foi escolhida a variável de teste da Recomendação P.311-10 [71]:

$$V_i = \ln \left(\frac{A_{p,i}}{A_{m,i}} \right) \left(\frac{A_{m,i}}{10} \right)^{0,2} ; \text{ para } A_{m,i} < 10 \text{ dB} \quad (5.9.a)$$

$$V_i = \ln \left(\frac{A_{p,i}}{A_{m,i}} \right) ; \text{ para } A_{m,i} > 10 \text{ dB} \quad (5.9.b)$$

onde $A_{p,i}$ e $A_{m,i}$ são, respectivamente, os valores previsto e medido para a atenuação em dB, na percentagem de tempo p para o i -ésimo enlace.

Esta variável de teste foi desenvolvida pelo UIT-R para reduzir o peso dos altos erros relativos em baixas atenuações, associados ao erro intrínseco de medida. compensar alguns efeitos de superestimação de erros que ocorrem quando se utiliza o erro relativo. Dependendo do radioclima e das características do enlace, valores de atenuação abaixo de 5 dB são obtidos para percentagens de tempo entre 0,1% ou 1%. Assim, os erros de medida típicos, da ordem de 0,5 a 1 dB podem produzir erros relativos elevados em situações de baixa atenuação, prejudicando os resultados do ajuste de modelos empíricos. O fator $(A_{m,i}/10)^{0,2}$ é

introduzido para reduzir este efeito. Embora a expressão seja ainda bastante discutida, é atualmente a metodologia recomendada pelo UIT-R.

A tabela 13 apresenta os dois conjuntos de valores para as constantes a_1 até a_5 que foram obtidas utilizando, como dado de entrada dos modelos, as distribuições de taxa de precipitação medida, existentes no banco de dados do UIT-R (DBSG5) ou obtidas nos experimentos descritos no capítulo 4, assim como as distribuições obtidas dos mapas digitais da Recomendação UIT-R P.837-4, baseados em dados da OMM.

Tabela 13 – Valores das constantes ajustadas para modelo 1

Constante	Taxa de precipitação medida	Taxa de precipitação Rec. UIT-R P.837-4
a_1	2,591	2,544
a_2	-0,391	-0,365
a_3	0,607	0,542
a_4	20,57	16,37
a_5	0,324	0,394

As figuras 19 e 20 mostram o gráfico de espalhamento entre os valores de atenuação observados (medidos) e os previstos pelos modelos. O fator de correlação entre os valores medidos e previstos quando se utiliza os dados de taxa de precipitação medida é 0,87, enquanto que, com o uso dos mapas digitais de taxa de precipitação, um fator de correlação 0,80 é obtido. Apesar disto, erros elevados são observados para alguns enlaces, como pode ser visto nas figuras 21 e 22, que mostram os histogramas dos resíduos (erros de previsão). Como esperado, um maior espalhamento (maiores erros) é observado quando se utilizam valores de taxa de precipitação dos mapas digitais em lugar dos efetivamente medidos.

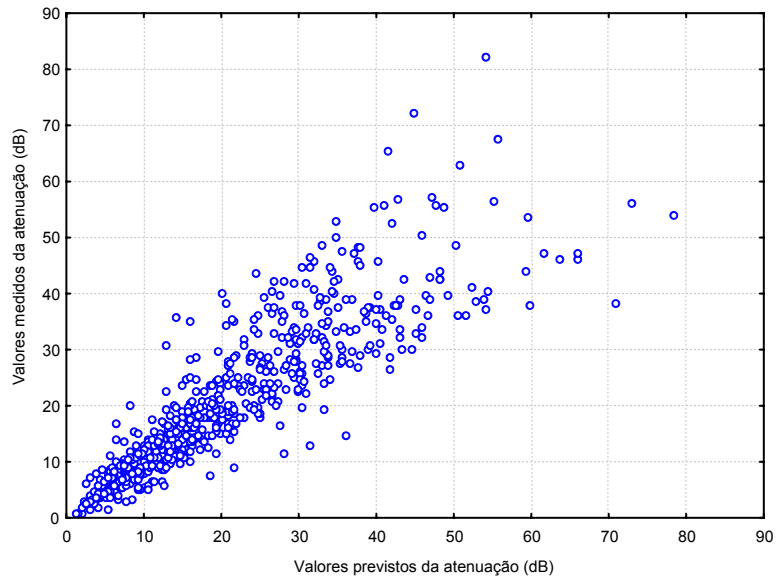


Figura 19 – Valores medidos e previstos pelo modelo 1 (taxa de precipitação medida)

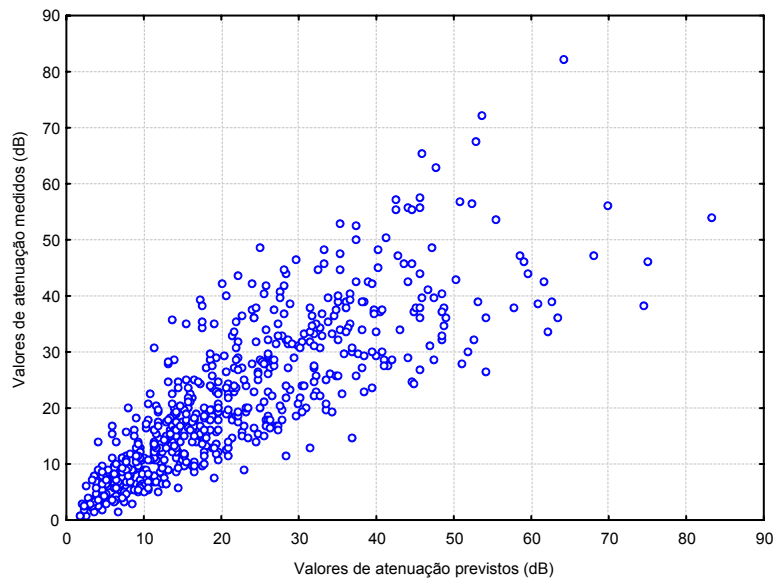


Figura 20 – Valores medidos e previstos pelo modelo 1 (taxa de precipitação Rec. 837)

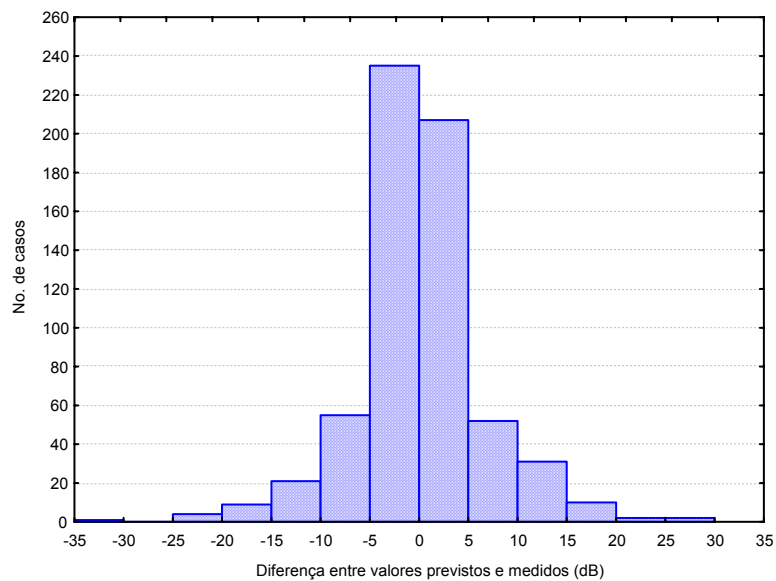


Figura 21 – Distribuição dos resíduos para o modelo 1 (taxa de precipitação medida)

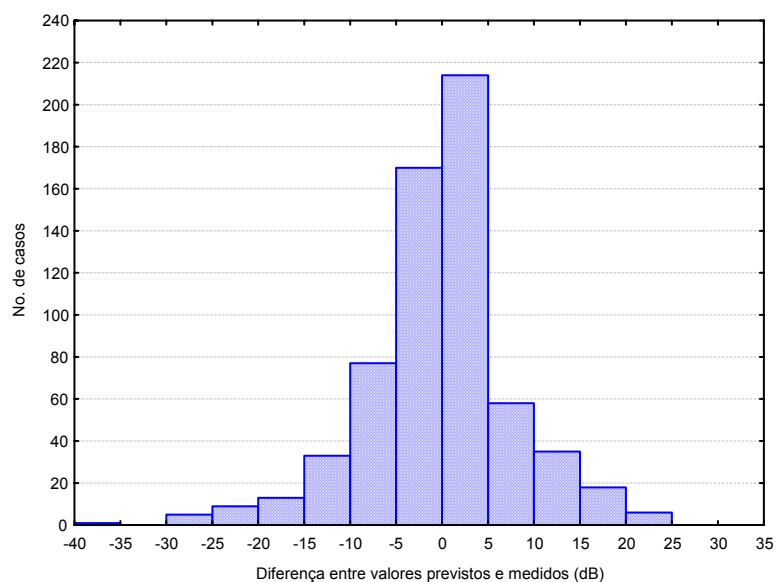


Figura 22 – Distribuição dos resíduos para o modelo 1 (taxa de precipitação Rec. 837)

5.1.3

Modelo de previsão baseado na taxa de precipitação efetiva – modelo 2

Uma vez que os modelos desenvolvidos com base no conceito de um comprimento efetivo do enlace ainda apresentam erros elevados para um número significativo de enlaces, decidiu-se tentar uma segunda abordagem que permite tratar o fator de correção associado à não uniformidade da chuva de forma mais

flexível. Em lugar de considerar uma célula de chuva equivalente, foi desenvolvido um modelo baseado na precipitação equivalente, uniformemente distribuída ao longo de todo o enlace, provoca a mesma atenuação que a chuva real, não uniforme. Neste caso, a expressão geral para a previsão da distribuição cumulativa da taxa de precipitação é dada por:

$$A(p) = kR_{eff}^{\alpha}(p) d \quad (5.10)$$

Cabe ressaltar que, embora seja empregada a mesma notação, a taxa de precipitação efetiva na equação (5.10) é conceitual e numericamente diferente daquela na equação (5.6).

Como será visto, a eliminação do conceito de um comprimento efetivo que, tanto pela formulação uni-dimensional do UIT-R como pela formulação bi-dimensional, apresentada neste trabalho, está limitada a um valor máximo igual ao comprimento do enlace. Isto permite que o ajuste da taxa de precipitação efetiva acomode melhores valores de fator de correção superior à unidade observados na prática.

Neste caso, o fator de correção horizontal é dado simplesmente por

$$r_h = \frac{R_{eff}}{R} = \left[\frac{A(p)}{kR^{\alpha}d} \right]^{1/\alpha} \quad (5.11)$$

As figuras 23 e 24 mostram o comportamento do novo fator de correção com a taxa de precipitação e o comprimento do enlace. Observa-se o mesmo decaimento com uma lei de potência, em ambas as variáveis, verificado no caso anterior. Assim, foi escolhida uma função de ajuste do tipo:

$$r_h = a_1 R^{\left[a_2 + \frac{a_3}{d+1} + a_4(d+1) \right]} d^{\left[a_5 + \frac{a_6}{d+1} + a_7(d+1) \right]} \cdot (1 + a_8 lat) \quad (5.12)$$

As funções escolhidas para permitirem representar diferentes comportamentos dos expoentes de d e R com o comprimento do enlace foram, dentre as diversas testadas, as que forneceram melhores ajustes em relação aos

dados experimentais. A dependência com a latitude absoluta (lat), embora não seja evidente na análise do fator de redução, permitiu refletir diferenças observadas nos dados experimentais de regiões tropicais e temperadas, além de produzir uma melhoria significativa nos ajustes.

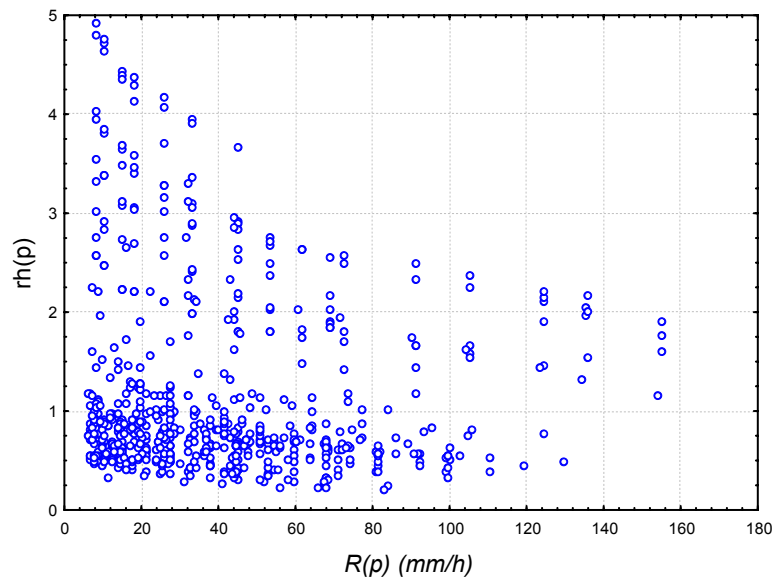


Figura 23 – Dependência do fator de redução horizontal com d – modelo 2

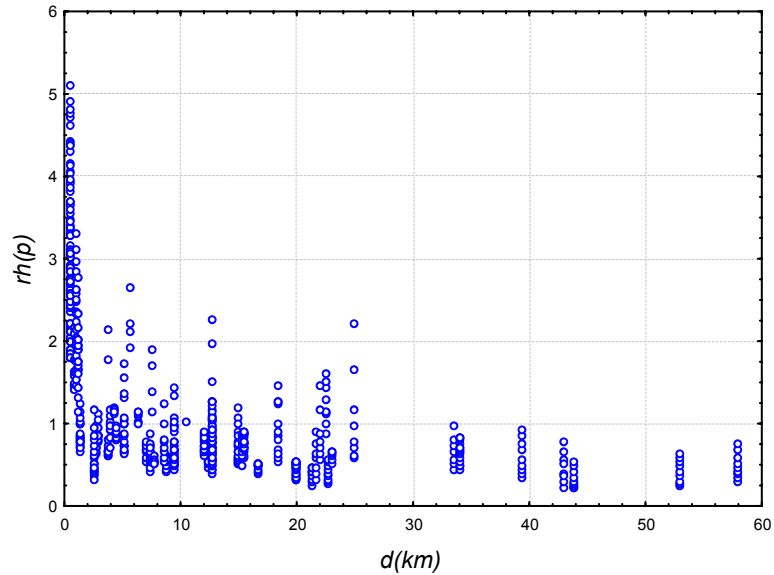


Figura 24 – Dependência do fator de redução horizontal com R – modelo 2

Novamente tem-se, na tabela 14, os valores das constantes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , a_7 e a_8 através de uma regressão não linear, tanto para os dados da taxa de precipitação do banco de dados do UIT-R (DBSG5) quanto para os dados realizados pela Organização Meteorológica Mundial.

A tabela 14 apresenta os dois conjuntos de valores para as constantes a_1 até a_8 que foram obtidas por regressão não linear com múltiplas variáveis, utilizando, como dado de entrada dos modelos, as distribuições de taxa de precipitação medida e dos mapas digitais da Recomendação UIT-R P.837-4.

Tabela 14 – Valores das constantes ajustadas para modelo 2

Constante	Taxa de precipitação medida	Taxa de precipitação Rec. UIT-R P.837-4
a_1	44.21	81.40
a_2	-0.248	-0.195
a_3	0.153	0.0280
a_4	-0.00385	-0.00616
a_5	-0.7162	-0.8213
a_6	-5.318	-6.571
a_7	0.002156	0.00369
a_8	-0.00700	-0.00916

As figuras 25 e 26 mostram gráficos de espalhamento entre os valores de atenuação observados (medidos) e os previstos pelos novos modelos. O fator de correlação entre os valores medidos e previstos, quando se utiliza os dados de taxa de precipitação medida, sobe para 0,90, enquanto que com o uso dos mapas digitais de taxa de precipitação, um fator de correlação 0,85 é obtido. As figuras 27 e 28 mostram os histogramas dos resíduos para o modelo 2 com os dois tipos de taxa de precipitação como dado de entrada.

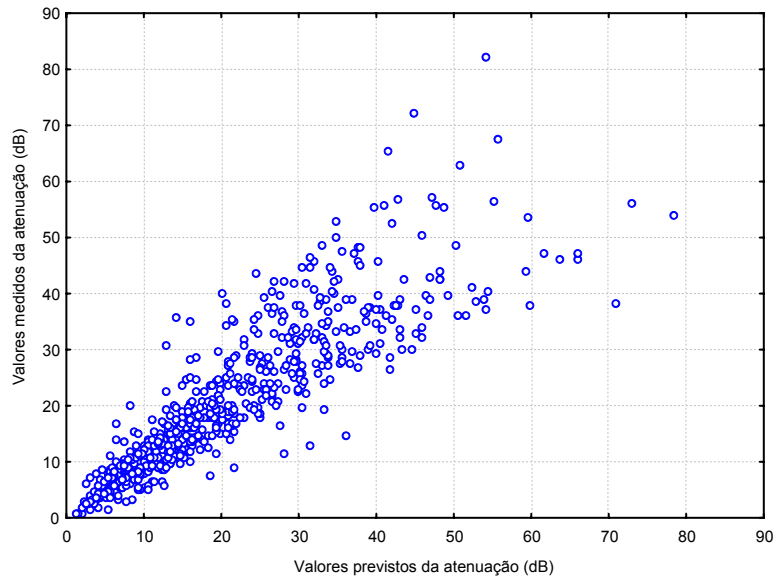


Figura 25 – Valores medidos e previstos pelo modelo 2 (taxa precipitação medida)

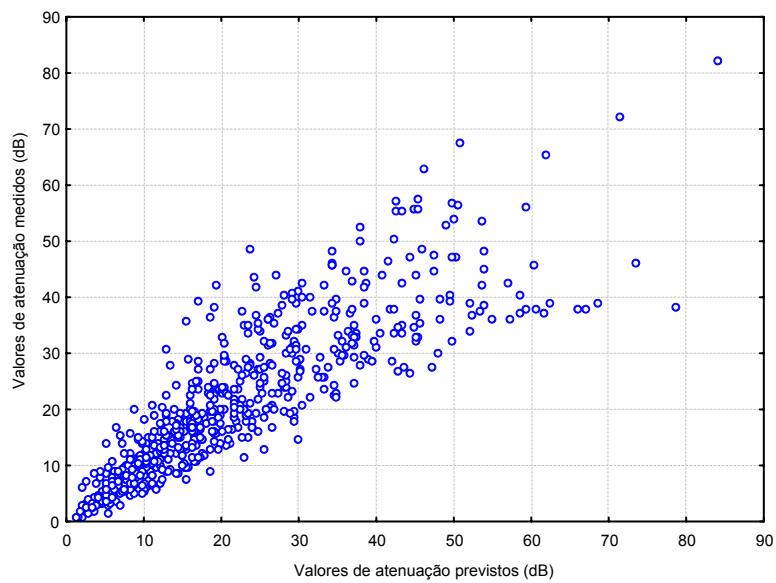


Figura 26 – Valores medidos e previstos pelo modelo 2 (taxa precipitação da Rec. 837)

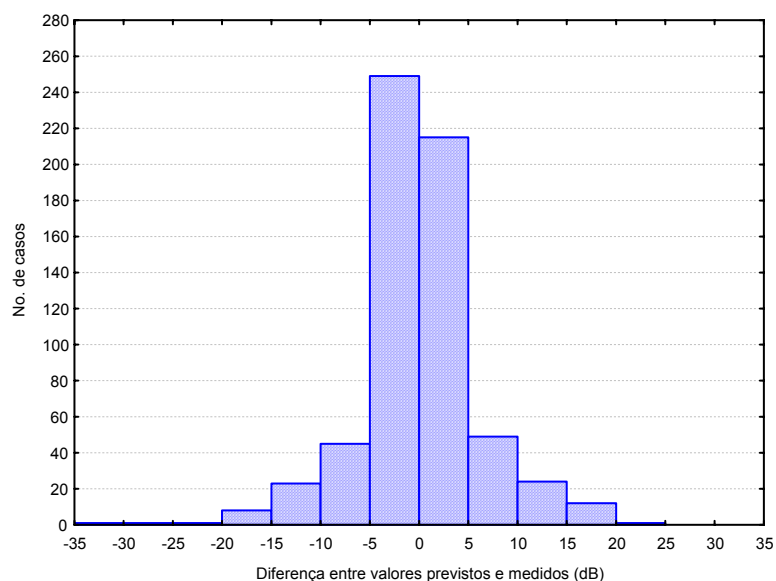


Figura 27 – Distribuição dos resíduos para o modelo 2 (taxa de precipitação medida)

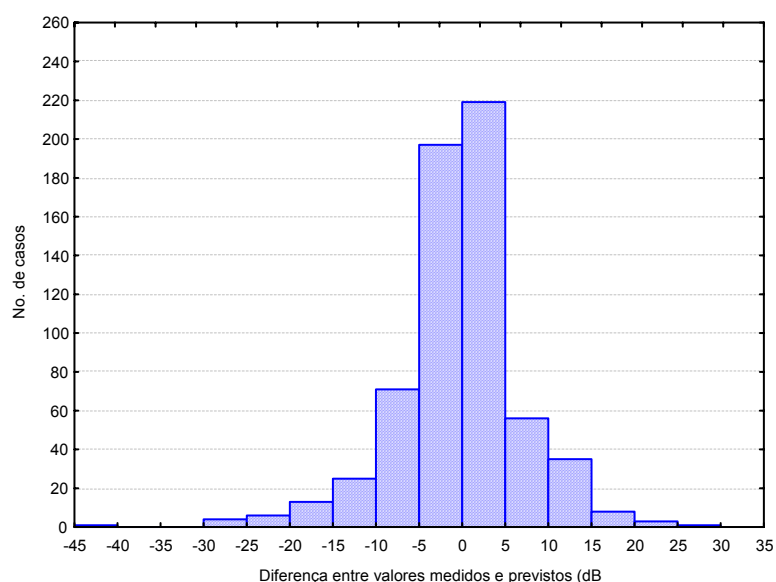


Figura 28 – Distribuição dos resíduos para o modelo 2 (taxa de precipitação da Rec. 837)

Verifica-se que, apesar da melhoria na correlação, o modelo ajustado com base nos dados de taxa de precipitação da Recomendação UIT-R P.837-4 apresenta ainda um número significativo de erros de previsão muito elevados, de até 45 dB. Por este motivo, foi incluído no modelo um fator de correção adicional, dependente da percentagem de tempo. Este expediente, embora utilizado em vários modelos empíricos, não tem justificativa física quando se utilizam dados de taxa de precipitação medidos de forma concorrente com os dados de atenuação. Entretanto, as distribuições cumulativas de taxa de precipitação dadas pela

Recomendação 837 correspondem a estimativas derivadas de médias de múltiplos anos de medidas meteorológicas com 6 horas de tempo de integração. Não só o método de conversão para 1 minuto de tempo de integração envolve um erro elevado, particularmente para baixas percentagens de tempo, como os valores médios podem não ser representativos de anos específicos em que ocorreram as medidas de atenuação. Assim, para este caso, o modelo 2 foi modificado pela inclusão de um fator de correção dependente da percentagem de tempo, assumindo a forma:

$$r_h = a_1 R \left[a_2 + \frac{a_3}{d+1} + a_4(d+1) \right] d \left[a_5 + \frac{a_6}{d+1} + a_7(d+1) \right] \cdot (1 + a_8 lat) \cdot R^{\frac{a_9}{\log(p)}} \quad (5.13)$$

Os valores das constantes ajustadas são mostrados na tabela 15.

Tabela 15 – Valores das constantes ajustadas para modelo 2 modificado

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉
33.31	-0.1182	0.02587	-0.00640	-0.813	-6.554	0.00382	-0.00575	-0.211

As figuras 29 e 30 mostram o gráfico de espalhamento e o histograma dos resíduos, obtidos com o modelo 2, modificado com dados de entrada da Recomendação 837. Observa-se uma redução nos valores extremos de erro pela introdução do fator de correção dependente da percentagem do tempo.

Cabe comentar que, embora o número de nove constantes ajustadas possa parecer excessivo, isto é necessário para se conseguir uma redução significativa dos erros de previsão. Como será verificado na próxima seção, modelos com 5 a 7 parâmetros, como o modelo de Crane, o modelo CETUC 2004 e o próprio modelo do UIT-R, apresentam erros significativamente superiores aos obtidos com os modelos aqui propostos. O único que apresenta desempenho semelhante é o modelo chinês, com 11 parâmetros, mas com outras limitações que serão discutidas a seguir.

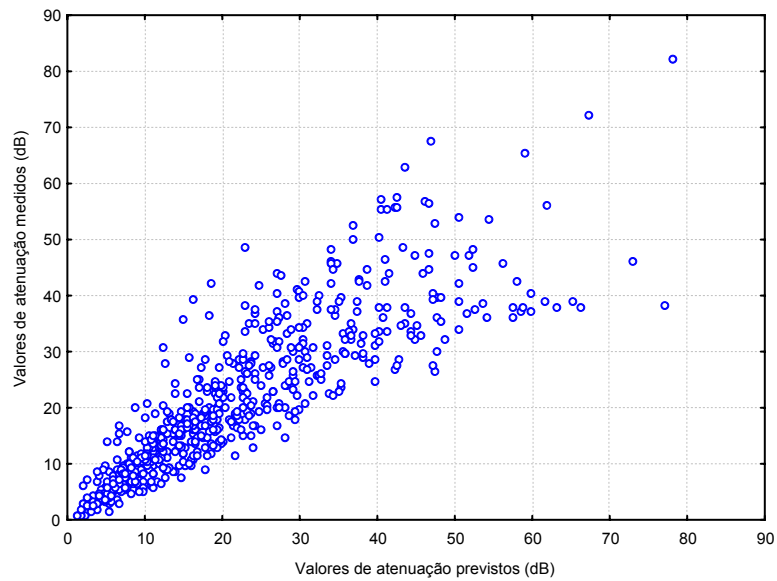


Figura 29 – Valores medidos e previstos para o modelo 2 modificado (Rec. 837)

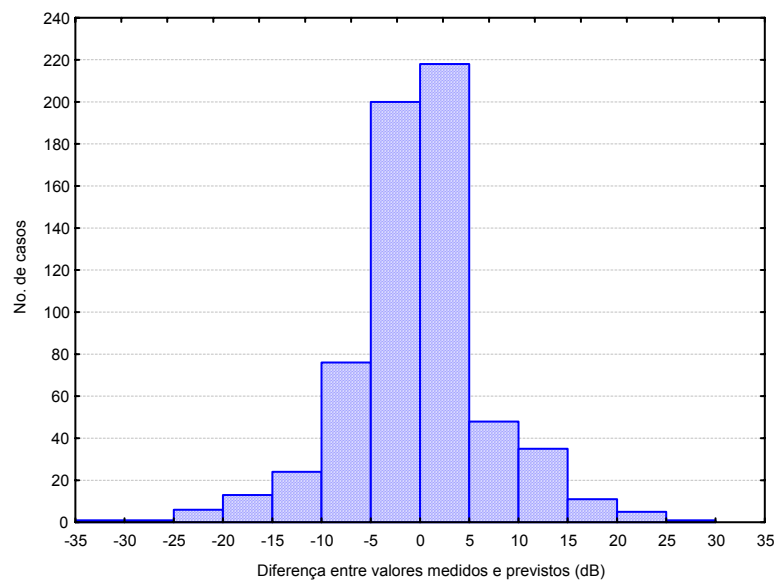


Figura 30 – Distribuição dos resíduos para o modelo 2 terrestre (Rec. 837)

5.1.4

Comparação entre os modelos para enlaces terrestres

As tabelas a seguir mostram uma comparação entre os modelos para previsão da atenuação por chuvas propostos neste trabalho e os modelos descritos no capítulo 3. São apresentados o valor médio, o desvio padrão e o valor r.m.s.

dos erros definidos pela variável de teste da Recomendação UIT-R P.311-10. Para cada indicador são apresentados, em tabelas distintas, os valores obtidos utilizando os dados de taxa de precipitação medida e da Recomendação 837.

Tabela 16 – Erro médio de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)

p %	UK	Crane	Rec.530	3M/38	Pérez-Mello	China2005	Modelo 1	Modelo 2
0,001	-15.6	3.8	-13.6	4.8	5.9	5.6	11.9	2.6
0,002	-16.9	1.9	-15.7	-3.9	5.5	3.9	8.4	2.1
0,003	-17.9	-0.1	-17.4	-6.3	2.7	4.7	5.8	2.3
0,006	-16.2	0.8	-17.3	-6.3	1.4	3.0	5.3	3.8
0,01	-15.2	1.9	-17.2	-5.6	0.6	2.0	4.3	4.2
0,02	-15.4	1.6	-19.4	-7.0	1.6	-0.1	2.1	3.9
0,03	-15.4	1.7	-20.5	-7.3	2.7	0.0	1.3	4.5
0,06	-20.2	-2.3	-25.8	-11.5	5.2	-2.5	-4.5	1.1
0,1	-23.3	-4.7	-29.6	-14.0	6.5	-1.3	-7.8	0.2

Tabela 17 – Erro médio de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação da Rec.837)

p %	UK	Crane	Rec.530	3M/38	Pérez-Mello	China2005	Modelo 1	Modelo 2
0,001	-10.8	9.0	-11.2	5.9	10.0	6.2	20.5	4.4
0,002	-14.8	4.1	-15.5	2.1	5.2	2.4	13.6	1.7
0,003	-17.2	0.6	-18.3	1.1	4.0	2.3	10.0	1.7
0,006	-17.1	-0.1	-18.8	1.4	3.6	0.1	7.4	2.5
0,01	-16.6	0.3	-18.8	1.9	4.1	-0.7	5.6	2.5
0,02	-17.9	-1.0	-21.1	-0.2	3.3	-3.1	1.3	1.6
0,03	-17.9	-0.4	-22.0	-0.4	4.9	-3.0	0.3	3.2
0,06	-18.6	-1.2	-25.7	-4.2	6.3	-3.9	-2.9	4.9
0,1	-19.3	-0.8	-28.5	-7.1	8.4	-1.8	-4.2	8.5

A análise do erro médio mostra que o modelo do UIT-R, bem como o modelo UK, subestima a atenuação em toda a faixa de percentagens de tempo, refletindo sua inadequação para a previsão da atenuação por chuvas em regiões tropicais, em função de ter sido ajustado com dados, predominantemente, de climas temperados. Os modelos de Crane, australiano (3M/38), o modelo chinês e o modelo 2 superestimam a atenuação para percentagens de tempo mais baixas e

passam a subestimá-la para percentagens de tempo acima de 0,01%. Já o modelo Pérez-Mello e os modelos propostos tendem a superestimar a atenuação, ainda que com baixos erros.

Tabela 18 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)

p %	UK	Crane	Rec.530	3M/38	Pérez-Mello	China2005	Modelo 1	Modelo 2
0,001	38.8	48.6	35.6	42.7	30.4	23.2	23.0	25.5
0,002	39.4	48.7	35.7	43.1	29.3	22.2	24.0	24.3
0,003	38.6	47.5	36.8	44.8	27.1	23.7	23.3	23.8
0,006	36.7	45.3	37.0	44.2	24.5	22.0	22.7	24.6
0,01	36.3	45.0	37.5	44.6	26.4	22.0	22.8	25.6
0,02	37.2	46.0	39.6	45.0	28.8	24.2	23.9	28.0
0,03	37.3	46.4	40.9	46.1	28.7	25.8	24.2	28.6
0,06	36.4	46.0	44.4	47.9	30.0	29.6	25.9	29.1
0,1	39.1	49.1	48.7	50.2	33.0	32.3	27.9	31.6

Tabela 19 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação da Rec.837)

P %	UK	Crane	Rec.530	3M/38	Pérez-Mello	China2005	Modelo 1	Modelo 2
0,001	37.0	45.1	38.7	44.5	33.5	30.2	31.3	29.6
0,002	37.4	45.1	37.4	42.8	32.7	27.7	30.0	29.0
0,003	38.0	45.9	38.9	44.9	31.0	28.3	29.3	28.6
0,006	37.9	45.5	39.3	44.8	28.7	26.8	29.4	27.9
0,01	38.8	46.7	40.2	45.6	30.6	26.9	31.1	28.2
0,02	40.8	48.2	41.8	45.9	34.4	29.4	34.5	29.0
0,03	41.5	49.1	42.9	46.8	35.4	30.5	35.9	29.1
0,06	44.1	51.8	46.0	49.0	39.0	33.4	38.5	31.5
0,1	48.4	55.9	50.7	52.5	42.7	36.3	42.5	34.1

As tabelas de desvio padrão mostram claramente dois grupos de modelos, com China2005, Pérez-Mello, e os modelos 1 e 2 apresentando desempenho muito superior aos demais. Cabe ressaltar que os três últimos utilizam a distribuição completa da taxa de precipitação. O modelo chinês, embora utilize apenas a taxa de precipitação excedida em 0,01% do tempo como dado de entrada, utiliza uma fórmula de extrapolação bastante complexa (e artificial) para conseguir um bom desempenho.

Tabela 20 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)

p %	UK	Crane	Rec.530	3M/38	Pérez-Mello	China2005	Modelo 1	Modelo 2
0,001	41.8	38.1	48.7	43.0	30.9	23.8	28.2	23.2
0,002	42.5	40.7	47.5	45.0	27.4	24.2	24.5	23.4
0,003	39.4	41.3	45.0	44.9	27.0	22.1	26.0	23.2
0,006	40.4	45.8	46.4	46.2	29.6	25.8	28.6	24.7
0,01	45.5	57.0	49.3	50.5	33.3	32.3	32.5	27.9
0,02	41.8	38.1	48.7	43.0	30.9	23.8	28.2	23.2
0,03	42.5	40.7	47.5	45.0	27.4	24.2	24.5	23.4
0,06	39.4	41.3	45.0	44.9	27.0	22.1	26.0	23.2
0,1	40.4	45.8	46.4	46.2	29.6	25.8	28.6	24.7

Tabela 21 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces terrestres (taxa de precipitação da Rec.837)

p %	UK	Crane	Rec.530	3M/38	Pérez-Mello	China2005	Modelo 1	Modelo 2
0,001	38.5	46.0	40.3	44.9	34.9	30.9	37.4	30.0
0,002	40.2	45.3	40.5	42.8	33.1	27.8	32.9	29.0
0,003	41.8	45.9	43.0	45.0	31.3	28.4	31.0	28.6
0,006	41.6	45.5	43.5	44.8	28.9	26.8	30.4	28.0
0,01	42.2	46.7	44.4	45.6	30.9	26.9	31.6	28.4
0,02	44.5	48.2	46.8	45.9	34.5	29.6	34.6	29.1
0,03	45.2	49.1	48.2	46.8	35.8	30.6	35.9	29.2
0,06	47.9	51.8	52.7	49.2	39.5	33.6	38.6	31.8
0,1	52.1	55.9	58.2	53.0	43.5	36.3	42.7	35.2

Para uma análise global do desempenho dos modelos, devem ser consideradas as tabelas de erro r.m.s., mostradas acima, e representadas graficamente nas figuras abaixo.

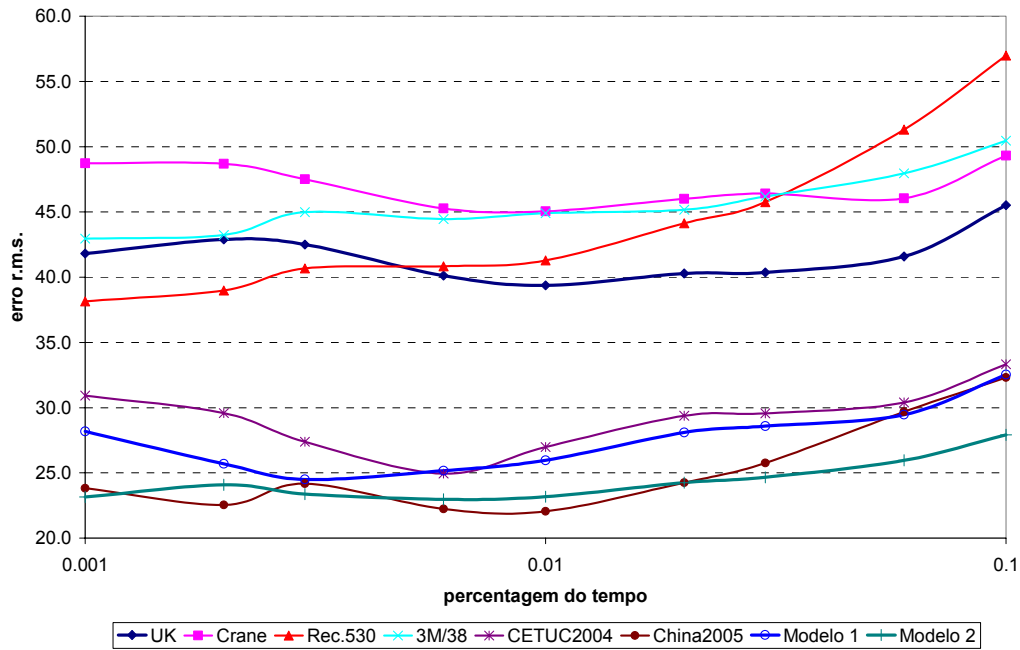


Figura 31 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres (taxa de precipitação medida)

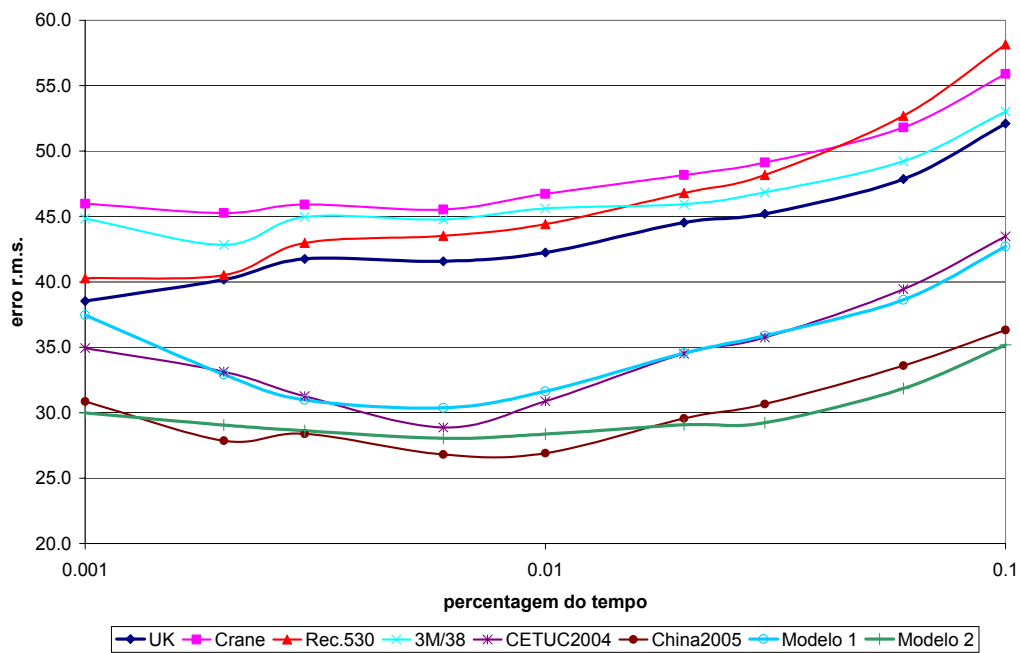


Figura 32 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres (taxa de precipitação Rec. 837)

Uma observação importante é que os valores de erro obtidos, quando se utiliza os mapas digitais da Recomendação 837, são cerca de 5 a 8 dB superiores aos obtidos com os dados de taxa de precipitação medida. Uma vez que estes mapas são obtidos pela conversão de dados meteorológicos e são para uso, quando não há disponibilidade de medidas locais de taxa de precipitação, este desempenho pode ser considerado aceitável, especialmente levando em conta que os mapas representam valores médios de longo prazo, enquanto que parte das distribuições medidas pode estar associada a anos atípicos.

A análise do erro r.m.s. mostra reflete, como esperado, o mesmo agrupamento de modelos, em termos de desempenho, observado na análise do desvio padrão. O modelo Pérez-Mello e o modelo 1 apresentam um bom desempenho e são aproximadamente equivalentes. Os modelos com melhor desempenho no teste são o modelo chinês e o modelo 2, que alternam erros ligeiramente menores dependendo da percentagem do tempo.

Com relação ao modelo chinês cabem duas críticas. A primeira diz respeito ao uso de apenas um ponto da distribuição de taxa de precipitação como dado de entrada, a taxa excedida em 0,01% do tempo ($R_{0,01}$) e uma fórmula de extrapolação para as demais percentagens de tempo. Ainda que, para um conjunto específico de dados, seja possível obter um bom ajuste para a fórmula de extrapolação, o uso da distribuição completa da taxa de precipitação reflete melhor a dependência da atenuação com o efeito do qual ela resulta. A segunda, talvez mais grave, diz respeito ao uso da frequência como variável da função de ajuste. Isto corresponde, na prática, a alterar a dependência da atenuação com a frequência, o que não tem qualquer justificativa. Na verdade, a atenuação específica é o elemento mais bem fundamentado, do ponto de vista físico, de qualquer modelo.

Finalmente cabe comentar que, embora apresentando maiores erros, o modelo Pérez-Mello e o modelo 1, que incluem um número menor de constantes ajustadas são, não apenas mais elegantes, como podem vir a ser mais robustos quando aplicados a novas distribuições medidas.

5.2

Desenvolvimento de Modelos para a Previsão da Atenuação em Enlaces Satélite

5.2.1

Formulação do modelo para enlaces satélite

Para o desenvolvimento de um modelo para previsão da atenuação por chuvas em enlaces satélite, que seja consistente com o modelo terrestre, utilizou-se também o conceito de taxa de precipitação efetiva. Neste caso, o comprimento do enlace sujeito à ação desta precipitação uniforme equivalente é o comprimento do enlace com ângulo de elevação θ entre a estação terrena e a altura de chuva. Assim, a atenuação será dada por

$$A(p) = kR_{eff}^{\alpha}(p)L_s \quad (5.14)$$

L_s dado pela expressão (3.27). Para garantir a consistência entre os modelos terrestre e satélite, a taxa de precipitação efetiva será modelado na forma

$$R_{eff}(p) = r_v \cdot r_h \cdot R(p) \quad (5.15)$$

O fator r_v é um fator de correção vertical que leva em conta a não homogeneidade da chuva entre o solo e a altura máxima de chuva, enquanto que r_h é o mesmo fator de correção horizontal, desenvolvido para o caso terrestre. Na formulação que se segue foram utilizados os fatores correspondentes ao modelo 2, sempre de acordo com o tipo de taxa de precipitação empregada (medida ou obtida da Recomendação 837).

5.2.1

Ajuste do fator de correção vertical com a taxa de precipitação medida

A partir de (5.14) e (5.15), o fator de correção vertical pode ser escrito na forma

$$r_v = \frac{1}{r_h R} \left(\frac{A}{L_s} \right)^{1/\alpha} \quad (5.16)$$

Para a escolha de uma forma funcional para o ajuste, o comportamento de r_v com diferentes variáveis foi investigado da mesma forma que no caso terrestre. Por inspeção destes comportamentos e, considerando os aspectos físicos do problema, as variáveis escolhidas foram a taxa de precipitação, altura de chuva ($h=h_R - h_S$), e a latitude absoluta (lat). As figuras 33 a 35 mostram o comportamento de r_v com estas variáveis para todos os enlaces do banco de dados de atenuação em enlaces satélite, considerando a taxa de precipitação medida.

Novamente foram escolhidas funções de potência destas variáveis, que mostraram o bom desempenho nos processos de ajuste. Verificou-se ainda, empiricamente, que a inclusão de termos dependentes do complemento do ângulo de elevação ($\beta = 90 - \theta$) nos expoentes das funções de R e h permitia reduzir o erro observado nas regressões. A melhor expressão obtida para r_v utilizando valores de taxa de precipitação e atenuação, medidos concorrentemente, tem a forma:

$$r_v = a_1 R^{(a_2+a_3\beta)} h^{(a_4+a_5/\beta)} \cdot lat^{a_6} \quad (5.17)$$

Quando foram usados os dados de atenuação medida com os valores de taxa de precipitação, obtidos da Recomendação 837, foi necessário incluir um termo adicional em β para obter um boa correlação no ajuste. Neste caso, a expressão para para r_v assume a forma:

$$r_v = a_1 R^{(a_2+a_3\beta)} h^{(a_4+a_5/\beta)} \cdot lat^{a_6} \beta^{a_7} \tag{5.18}$$

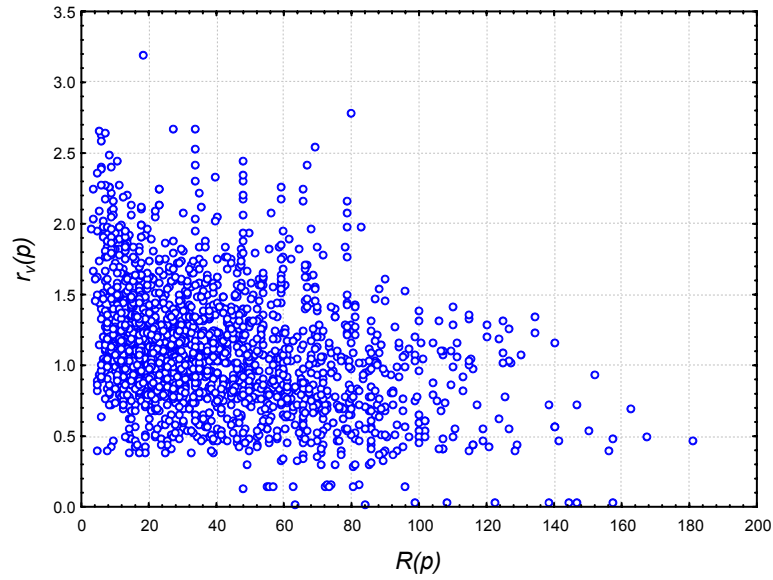


Figura 33 – Dependência do fator de redução vertical com R

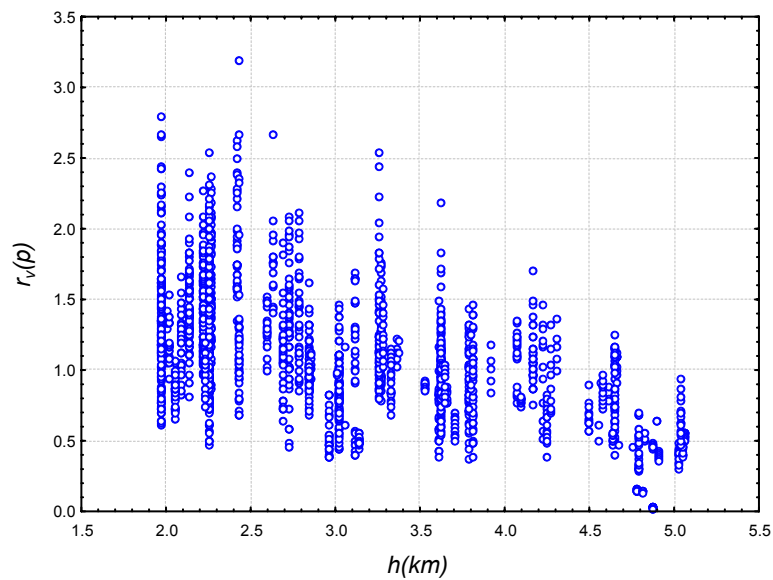


Figura 34 – Dependência do fator de redução vertical com h

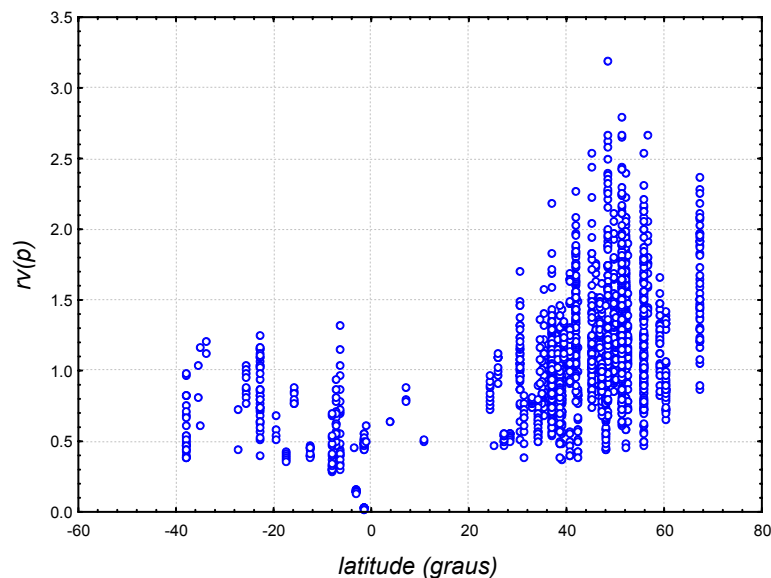


Figura 35 – Dependência do fator de redução vertical com a latitude

Os coeficientes ajustados para estes modelos são mostrados na tabela 22. As grandes diferenças nas constantes ajustadas deve-se à inclusão do termo em β que torna o segundo modelo bastante diferente do primeiro. As figuras 36 e 37 mostram os gráficos de espalhamento entre os valores de atenuação medidos e os previstos por estes modelos. Os histogramas de resíduos correspondentes são mostrados nas figuras 38 e 39.

Tabela 22 – Valores das constantes ajustadas para os modelos para enlaces satélite

Taxa de precipitação	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Medida	0.942	-0.00445	-0.000969	-0.409	-1.710	0.2146	-
Rec. 837	133.8	-0.340	-0.3970	0.04780	-15.660	0.13710	-0.9500

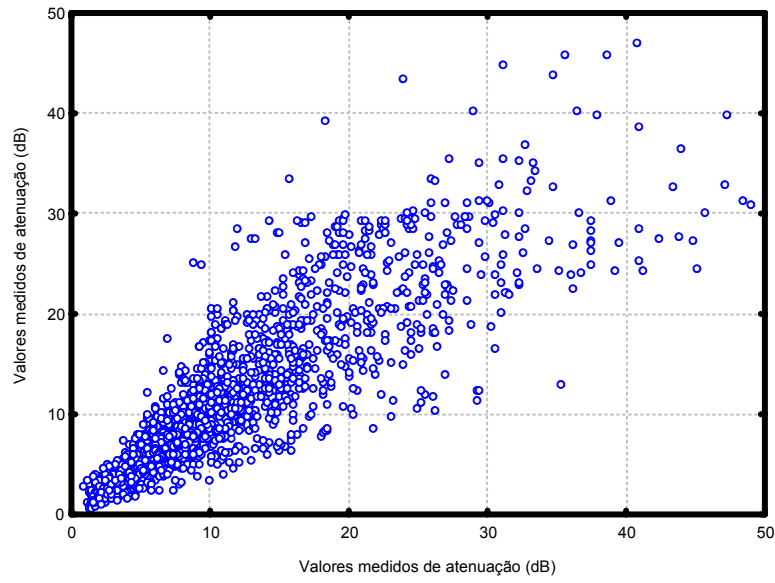


Figura 36 – Valores medidos e previstos para o modelo satélite (precipitação medida)

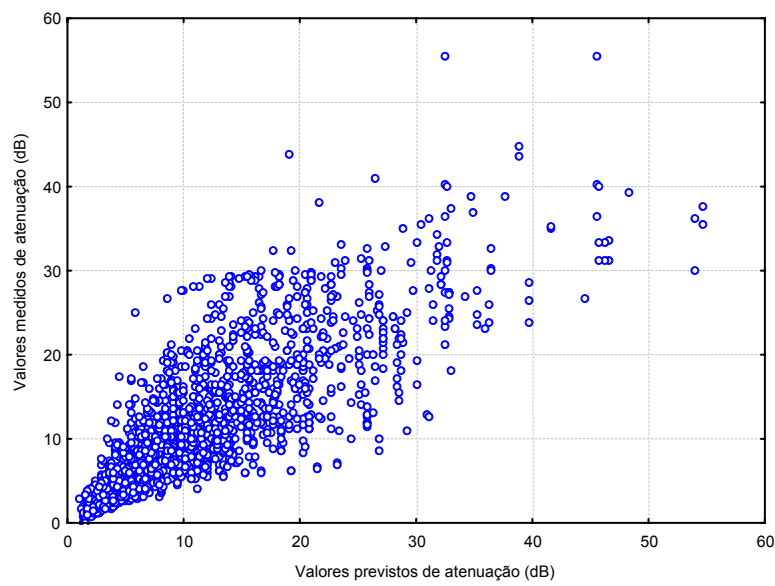


Figura 37 – Valores medidos e previstos para o satélite (Rec. 837)

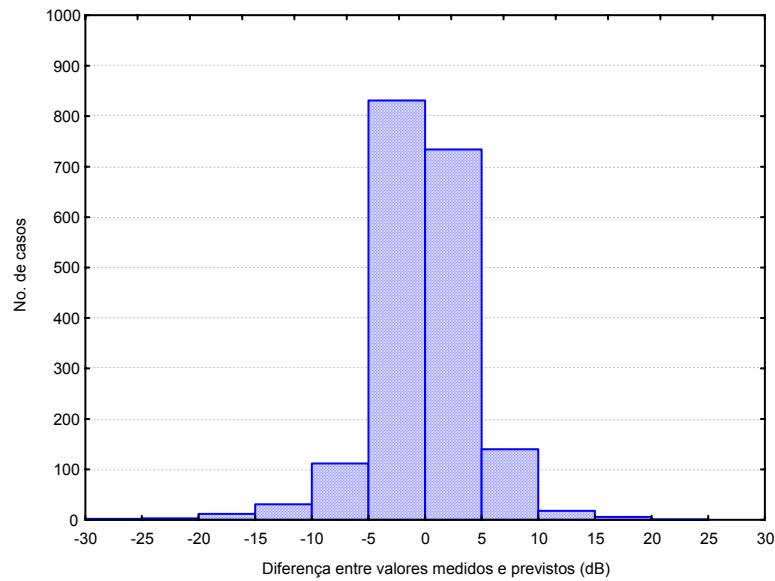


Figura 38 – Distribuição dos resíduos para o modelo satélite (precipitação medida)

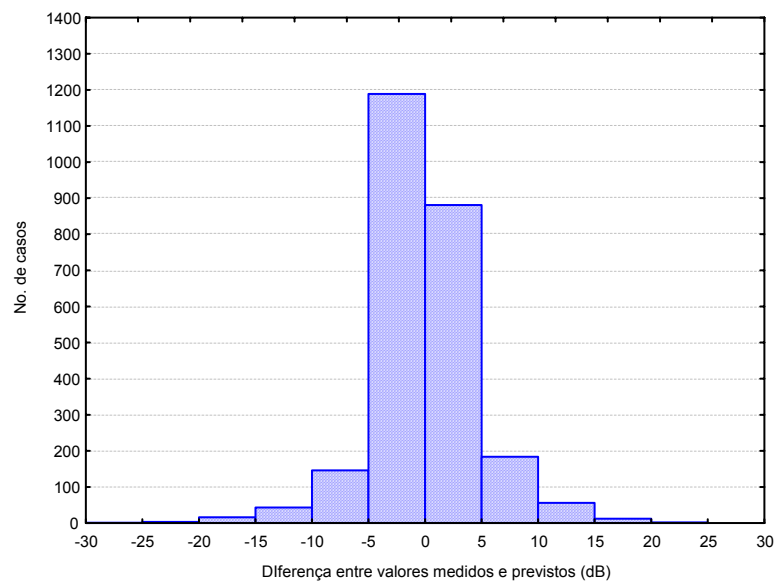


Figura 39 – Distribuição dos resíduos para o modelo satélite (Rec. 837)

5.2.3

Comparação entre os modelos para enlaces via satélite

As tabelas a seguir mostram uma comparação entre os modelos para previsão da atenuação por chuvas em enlaces satélite propostos neste trabalho e os modelos descritos no capítulo 3. A exemplo do caso terrestre, são apresentados os

valor médio, o desvio padrão e o valor r.m.s. dos erros definidos pela variável de teste da Recomendação UIT-R P.311-10.

Tabela 23 – Erro médio de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação medida)

p %	Rec 618	Brasil	Australiano	UK	Rec618-8	China	Proposto
0,001	-7.04	4.16	37.62	40.62	9.34	10.64	0.70
0,003	-43.99	3.35	37.55	39.54	1.21	-0.22	-1.01
0,006	-62.74	1.23	31.17	38.17	-1.55	-2.36	-2.25
0,01	-20.11	3.75	31.03	40.02	-3.51	-4.65	-0.01
0,03	-17.34	-2.70	21.96	40.78	-4.15	-0.72	2.55
0,06	-15.16	-5.24	18.43	41.07	-3.55	2.30	4.47
0,1	-13.02	-7.75	15.40	41.42	-5.10	2.74	5.79

Tabela 24 – Erro médio de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação Rec.837)

p %	Rec 618	Brasil	Australiano	UK	Rec618-8	China	Proposto
0,001	-10.40	14.43	59.59	51.41	11.34	11.81	3.64
0,003	-46.48	8.96	42.03	47.76	3.85	2.87	0.11
0,006	-65.63	4.81	32.87	44.85	0.82	0.45	-0.48
0,01	-23.00	0.93	25.80	41.87	-3.21	-1.73	-0.36
0,03	-24.37	-10.14	13.42	38.37	-7.06	-1.74	2.51
0,06	-23.06	-13.86	9.03	37.97	-8.01	-0.22	5.41
0,1	-23.51	-21.01	1.55	34.15	-12.34	-1.82	7.64

Os modelos Australiano e UK superestimam fortemente a atenuação, enquanto que o antigo modelo do UIT-R (Rec. 618) apresenta forte subestimação. Os demais modelos, incluindo o atual modelo do UIT-R (Rec, 618-8), apresentam comportamento variável, dependendo da percentagem de tempo e, de um modo geral, um bom desempenho no que diz respeito ao erro médio.

Tabela 25 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação medida)

p %	Rec 618	Brasil	Australiano	UK	Rec618_8	China	Proposto
0,001	44.96	32.17	81.89	31.53	33.68	35.58	32.20
0,003	40.91	33.59	42.37	31.31	33.15	33.01	31.62
0,006	38.58	34.03	40.85	30.60	30.21	29.95	30.41
0,01	34.69	34.48	40.80	29.34	29.59	29.10	29.74
0,03	32.70	34.49	37.48	28.45	27.85	26.61	27.93
0,06	38.73	38.98	37.79	31.92	26.45	25.59	29.26
0,1	40.83	43.60	41.41	34.63	29.03	29.04	31.97

Tabela 26 – Desvio padrão do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação Rec.837)

p %	Rec 618	Brasil	Australiano	UK	Rec618_8	China	Proposto
0,001	45.92	39.98	49.08	41.43	39.53	42.64	41.98
0,003	44.16	40.94	48.46	40.49	39.42	41.30	40.17
0,006	45.39	42.03	48.58	40.33	38.52	40.39	39.72
0,01	42.27	45.04	51.80	41.25	37.88	40.08	39.05
0,03	39.68	43.22	47.98	38.25	33.81	37.02	33.70
0,06	40.09	43.39	47.16	39.54	32.48	35.44	32.15
0,1	40.73	48.75	52.22	44.35	33.75	38.65	32.93

No que diz respeito ao desvio padrão dos erros, as diferenças entre os modelos são menos pronunciadas, mas é possível observar que o modelo proposto, o modelo chinês e o modelo atual do UIT-R apresentam melhor desempenho que os demais.

Tabela 27 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação medida)

p %	Rec 618	Brasil	Australiano	UK	Rec618_8	China	Proposto
0,001	32.09	45.51	32.43	90.11	51.42	34.95	37.14
0,003	31.46	60.08	33.76	56.61	50.44	33.18	33.01
0,006	30.30	73.65	34.05	51.38	48.92	30.25	30.04
0,01	29.94	40.10	34.68	51.26	49.63	29.80	29.47
0,03	28.02	37.89	34.55	43.88	48.57	28.21	26.74
0,06	28.89	41.60	39.33	42.04	52.01	26.68	25.69
0,1	31.02	42.85	44.28	44.18	53.99	29.47	29.17

Tabela 28 – Valor r.m.s. do erro de previsão para enlaces satélite (taxa de precipitação Rec.837)

p %	Rec 618	Brasil	Australiano	UK	Rec618_8	China	Proposto
0,001	47.09	42.50	77.20	66.02	41.12	44.25	42.14
0,003	64.12	41.91	64.15	62.62	39.61	41.40	40.17
0,006	79.80	42.31	58.65	60.32	38.52	40.39	39.72
0,01	48.12	45.05	57.87	58.78	38.02	40.11	39.05
0,03	46.57	44.40	49.82	54.18	34.54	37.06	33.79
0,06	46.25	45.55	48.02	54.82	33.45	35.44	32.60
0,1	47.03	53.08	52.25	55.97	35.93	38.69	33.81

No caso dos modelos satélite, os valores de erro obtidos com os mapas digitais da Recomendação 837 são cerca de 10 dB superiores aos obtidos com os dados de taxa de precipitação medida.

Os modelos com melhor desempenho são o proposto neste trabalho, o modelo chinês e o atual modelo do UIT-R (Rec. 618-8). No caso da aplicação com dados medidos de taxa de precipitação, os dois últimos apresentam desempenho muito semelhante, enquanto que o modelo proposto é ligeiramente melhor nas percentagens de tempo mais baixas, e ligeiramente pior nas percentagens mais altas. No caso dos dados da Recomendação 837, os três modelos apresentam comportamento similar ao longo de toda a faixa de percentagens de tempo.

No caso satélite, as críticas apresentadas ao modelo chinês para o caso terrestre permanecem válidas e aplicam-se também ao modelo da Recomendação 618-8. Além disto, embora os três modelos sejam aproximadamente equivalentes, com relação aos valores do erro r.m.s, o modelo proposto é consistente com o modelo terrestre, o que não ocorre com o modelo do UIT-R.

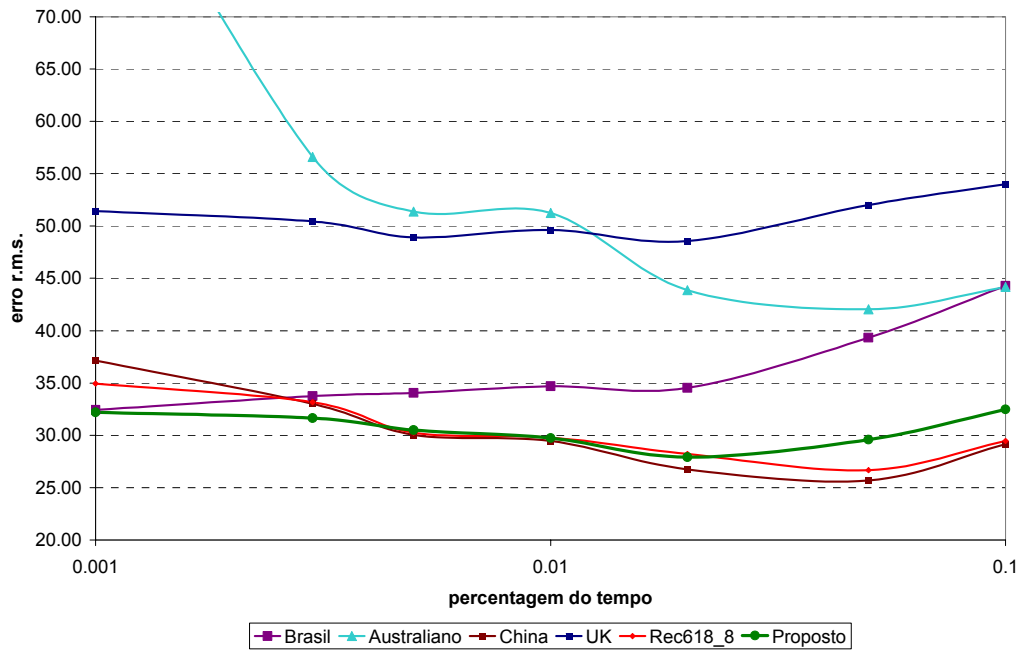


Figura 40 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces satélite (taxa de precipitação medida)

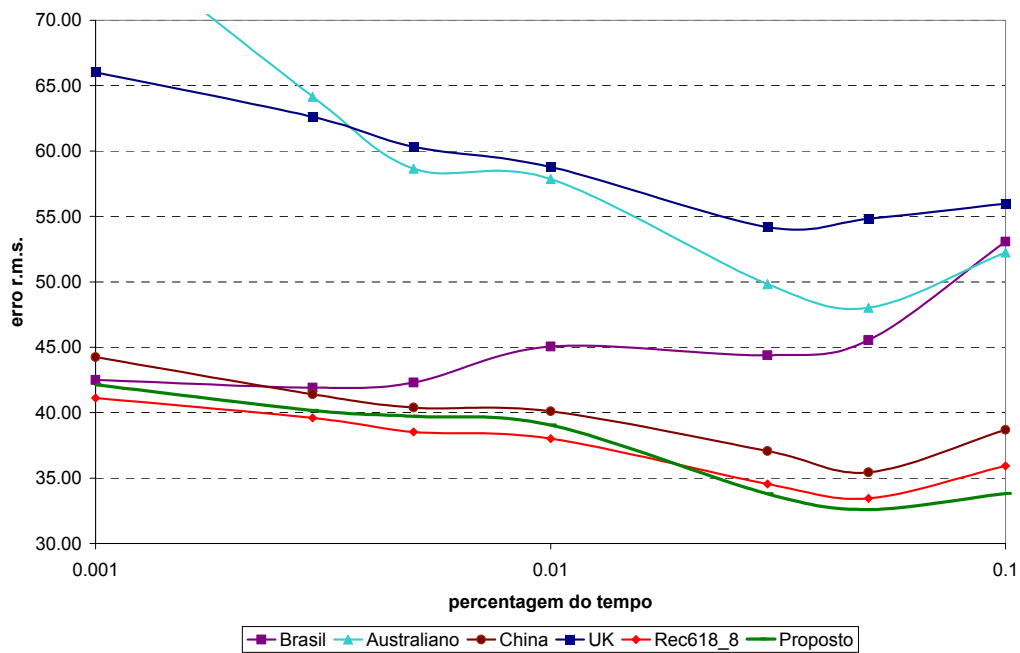


Figura 41 – Comparação entre os erros (Rec.311) dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces satélite (taxa de precipitação Rec. 837)

5.3

Modelos para a Previsão da Atenuação Diferencial em Enlaces Terrestres

5.3.1

O conceito de atenuação diferencial

Os sinais de enlaces convergentes, mesmo quando de comprimentos próximos, podem ser submetidos a atenuações de diferentes intensidades nas situações em que a precipitação é predominante no percurso de um deles, como ilustrado na figura. Esta diferença de atenuações é definida como atenuação diferencial.

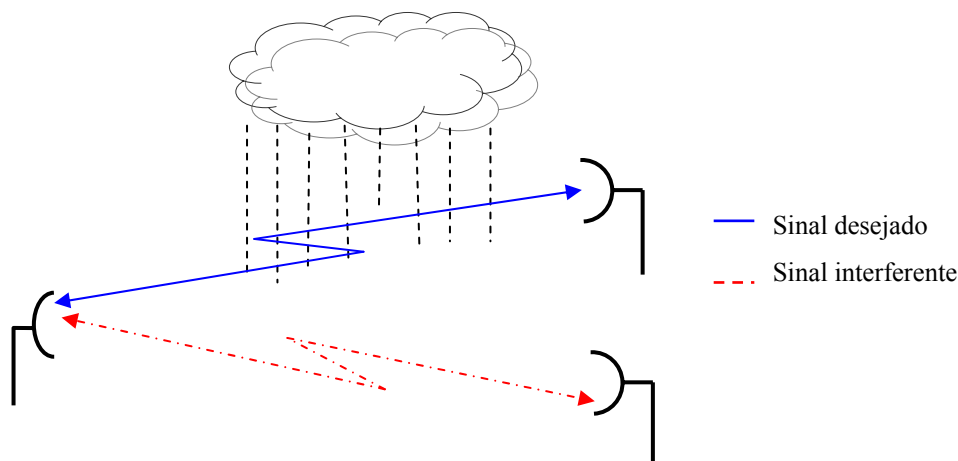


Figura 42 – Situação de atenuação diferencial por chuvas

Quando ocorrem atenuações diferenciais elevadas, em enlaces convergentes ou em sistemas ponto-multiponto, a discriminação das antenas pode ser insuficiente para garantir uma relação sinal interferência adequada na recepção. O efeito da atenuação diferencial por chuvas tem sido pouco estudado na literatura. Os resultados disponíveis são iniciais e exploratórios [49-52], mas o problema é de grande importância no dimensionamento de enlaces ponto-multiponto utilizados em sistemas de rádio acesso.

Para dois enlaces convergentes 1 e 2 sujeitos a atenuações A_1 e A_2 , a relação S/I no receptor comum em condições de chuva será dada por [48]:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{chuva} = \frac{S}{I} - (A_1 - A_2) = \frac{S}{I} - A_{12} \quad (5.22)$$

onde S/I é a relação sinal-interferência no enlace no receptor do enlace 1 durante condições de céu claro, e A_{12} é atenuação diferencial de chuva do enlace 1 em relação ao 2, sendo todas as quantidades dadas em dB.

Desta forma, as distribuições acumulativas da atenuação diferencial podem ser calculadas por:

$$P_{12}(A_{12}) = \int_{-\infty}^{A_{12}} p_{12}(x) dx \quad (5.23)$$

$$P_{21}(A_{21}) = \int_{-\infty}^{A_{21}} p_{21}(x) dx$$

onde p_{12} e p_{21} são as funções de densidade de probabilidade das atenuações diferenciais. Caso as densidades de probabilidade não sejam simétricas, $p_{12} \neq p_{21}$.

Nas figuras 43 e 44, obtidas a partir dos dados experimentais, pode-se observar que há uma forte correlação da atenuação diferencial com a atenuação individual do enlace 1 e, embora de forma menos pronunciada, com a atenuação no enlace 2. Além disso é de se esperar uma dependência da atenuação diferencial com a diferença entre os comprimentos e o ângulo entre os enlaces.

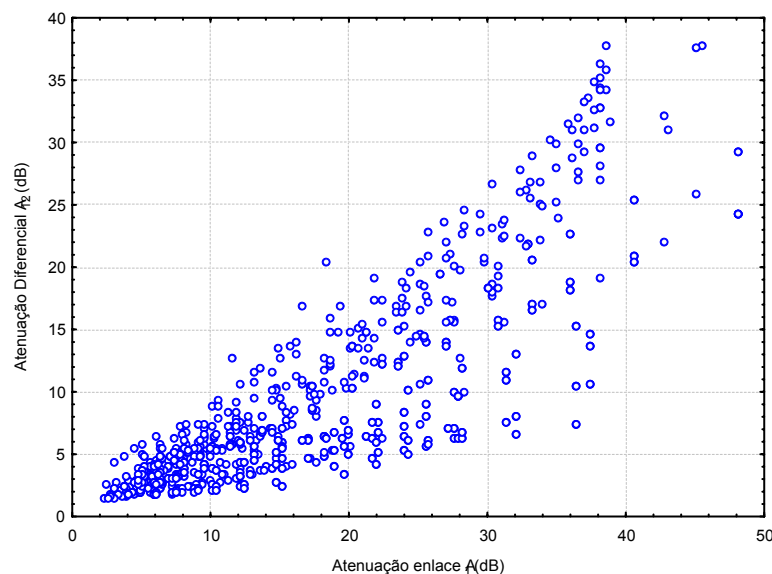


Figura 43 – Atenuação diferencial vs atenuação no enlace 1

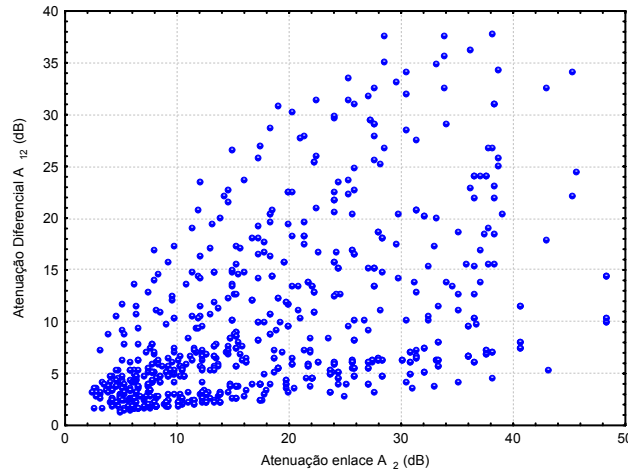


Figura 44 – Atenuação diferencial vs atenuação no enlace 2

5.3.2

Revisão do modelo para previsão da atenuação diferencial

Em trabalhos anteriores do CETUC [77] foi proposto um modelo, adotado pelo UIT-R, para previsão da distribuição cumulativa de probabilidades da atenuação diferencial. A partir de resultados de medidas em 36 pares de enlaces convergentes, foi obtida uma expressão empírica para o cálculo da atenuação diferencial na forma

$$A_{12}(dB) = (A_1 - a_1 A_2) \left(a_2 |\theta|^{a_3} + a_4 |\Delta d|^{a_5} \right) f^{a_6} \quad (5.40)$$

onde o ângulo entre os enlaces (θ) é dado em radianos, a diferença de comprimentos entre os enlaces (Δd) em quilômetros, e a frequência (f), em GHz.

No presente trabalho foram realizadas medidas em enlaces convergentes que permitem acrescentar 16 pares de enlaces ao banco de dados de atenuação diferencial, como descrito no capítulo 4 e anexo 1. A partir deste conjunto ampliado de dados, que inclui novas faixas de frequência e valores de comprimento de enlaces, procedeu-se a um novo ajuste de coeficientes, mantida a forma funcional dada pela equação 5.40.

O fator de correlação obtido no novo ajuste foi igual a 0,95. O gráfico de espalhamento entre os valores previstos e medidos é mostrado na figura 45. O histograma dos resíduos na figura 46.

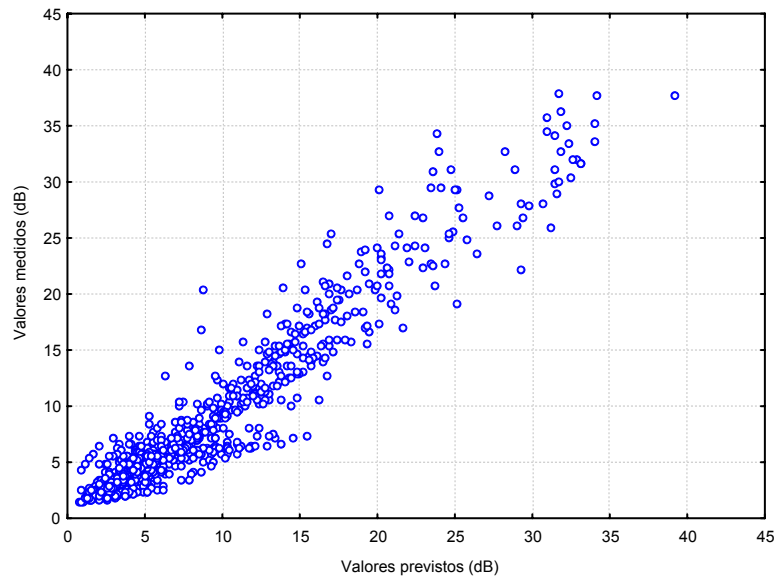


Figura 45 – Valores medidos vs previstos da atenuação diferencial

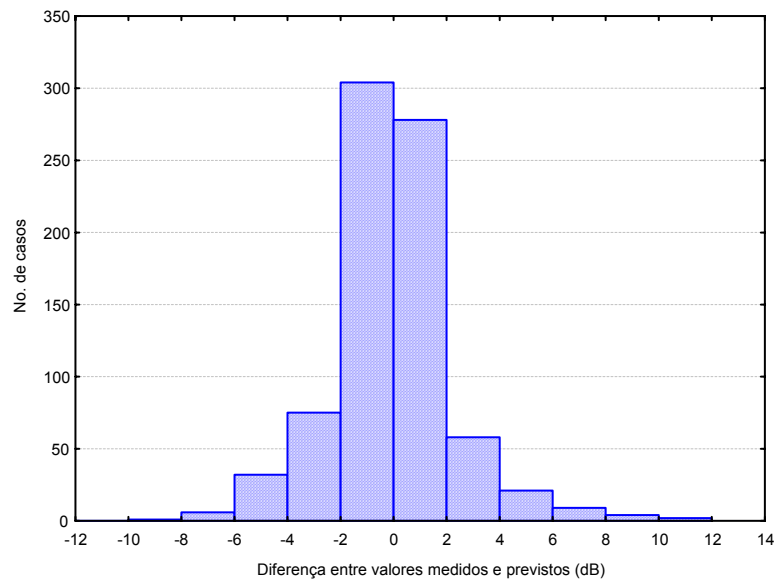


Figura 46 – Histograma de resíduos do modelo da atenuação diferencial

Os valores dos coeficientes obtidos com o novo ajuste, bem como os coeficientes do modelo original, são mostrados na tabela 29.

Tabela 29 – Coeficientes do para previsão da atenuação diferencial

Coeficiente	Valor original [77]	Valor revisto
a ₁	0,34	0,16
a ₂	2,65	0,03
a ₃	0,23	2,33
a ₄	0,004	0,68
a ₅	2,25	0,12
a ₆	-0,4	-0,07