

4

PREVISÃO E MODELAGEM DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS EM FREQUÊNCIAS SUPERIORES A 10 GHz

4.1.

TESTES DE MODELOS EXISTENTES PARA A PREVISÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes dos modelos de previsão da atenuação por chuvas citados no capítulo 2, utilizando a base de dados formada pelo banco de dados de medidas da atenuação por chuvas do ITU-R (DBSG5), acrescida dos dados de 7 enlaces convergentes em São Paulo, referidos no capítulo 3. Além do modelo anteriormente desenvolvido no CETUC para aplicação local no Brasil, os métodos selecionados são aqueles que tem mostrado melhor desempenho na previsão da atenuação por chuvas em testes realizados em outros trabalhos.

4.1.1.

Resultados dos Testes

Para o teste dos modelos de previsão de atenuação por chuvas apresentados nesta seção, foram utilizadas duas variáveis de teste: a variável de teste da Recomendação P.311-10 [45] e o erro relativo.

a) Variável de teste da Recomendação P.311-10:

$$V_i = \ln\left(\frac{A_{p,i}}{A_{m,i}}\right) \cdot \left(\frac{A_{m,i}}{10}\right)^{0,2}; \quad \text{para } A_{m,i} < 10 \text{ dB} \quad (4.1.a)$$

$$V_i = \ln\left(\frac{A_{p,i}}{A_{m,i}}\right); \quad \text{para } A_{m,i} \geq 10 \text{ dB} \quad (4.1.b)$$

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

Esta variável de teste foi desenvolvida para compensar efeitos de superestimação de erros que ocorrem quando se utiliza o tradicional erro relativo. Para valores de atenuação abaixo de 5 dB, normalmente correspondentes a percentagens de tempo entre 0,1% ou 1% dependendo do clima e das características do enlace, os erros de medidas da ordem de 0,5 a 1 dB podem se tornar próximos dos erros de previsão e produzir erros combinados elevados. O fator de peso representado por $(A_{m,i}/10)^{0,2}$ é introduzido para reduzir este efeito. Entretanto, esta variável tem a desvantagem de eventualmente mascarar a sobrestimação ou superestimação do método para um conjunto de enlaces quando se observa o erro médio.

b) Erro relativo:

$$E_i = \frac{(A_{p,i} - A_{m,i})}{A_{m,i}} \quad (4.2)$$

Os erros da previsão são calculados para cada enlace, em todas as percentagens de tempo existentes no banco de dados, desde 0,001 a 0,1%. Determinam-se a seguir seu valor médio, o desvio padrão e valor RMS, para cada percentagem.

Com o objetivo de representar por um único número a combinação do valor médio (μ_E) e do desvio padrão (σ_E) e assim facilitar comparações entre métodos, utiliza-se o erro RMS, dado por

$$\rho_E = \sqrt{\mu_E^2 + \sigma_E^2}$$

Deve-se observar que o desvio padrão do erro é o fator mais relevante na avaliação do desempenho de um método empírico. Isto porque, em se tratando deste tipo de método, um erro médio elevado pode ser corrigido até mesmo pela

adição de uma constante. O grande desafio no desenvolvimento de métodos empíricos é a identificação das variáveis relevantes e da função apropriada envolvendo estas variáveis que produza erros de previsão com baixo desvio padrão.

Os resultados dos testes para os modelos considerados, obtidos utilizando-se a variável de erro da Recomendação P.311-10, são dados nas Tabelas 16, 17 e 18, assim como nas Figuras 21, 22 e 23.

Tabela 16 Média dos erros (Recomendação P.311).

p (%)	Média dos erros (%)			
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98
0,001	-20,05	3,25	-1,90	34,58
0,002	-22,83	-0,04	-3,22	33,13
0,003	-26,66	-4,43	-5,87	30,70
0,006	-25,66	-4,73	-4,27	32,73
0,01	-26,59	-4,56	-4,69	33,99
0,02	-27,45	-4,60	-4,61	35,63
0,03	-28,31	-5,89	-4,69	36,86
0,06	-31,96	-12,21	-8,66	36,88
0,1	-35,59	-13,52	-12,66	36,89

Tabela 17 Desvio padrão dos erros (Recomendação P.311).

p (%)	Desvio padrão dos erros (%)			
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98
0,001	35,11	45,64	42,60	29,10
0,002	33,79	45,07	41,85	28,33
0,003	35,15	45,40	42,82	27,96
0,006	36,04	43,68	43,06	28,19
0,01	36,92	43,28	42,98	28,80
0,02	38,74	45,13	43,78	31,22
0,03	40,23	46,05	44,86	31,89
0,06	42,66	46,38	46,60	34,27
0,1	45,76	47,09	47,84	37,13

Tabela 18 Valor RMS dos erros (Recomendação P.311).

p (%)	Valor RMS dos erros (%)			
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98
0,001	40,43	45,75	42,64	45,19
0,002	40,78	45,07	41,98	43,60
0,003	44,12	45,62	43,22	41,52
0,006	44,24	43,94	43,27	43,20
0,01	45,49	43,52	43,24	44,55
0,02	47,48	45,36	44,02	47,37
0,03	49,19	46,42	45,10	48,74
0,06	53,30	47,96	47,39	50,35
0,1	57,97	48,99	49,49	52,34

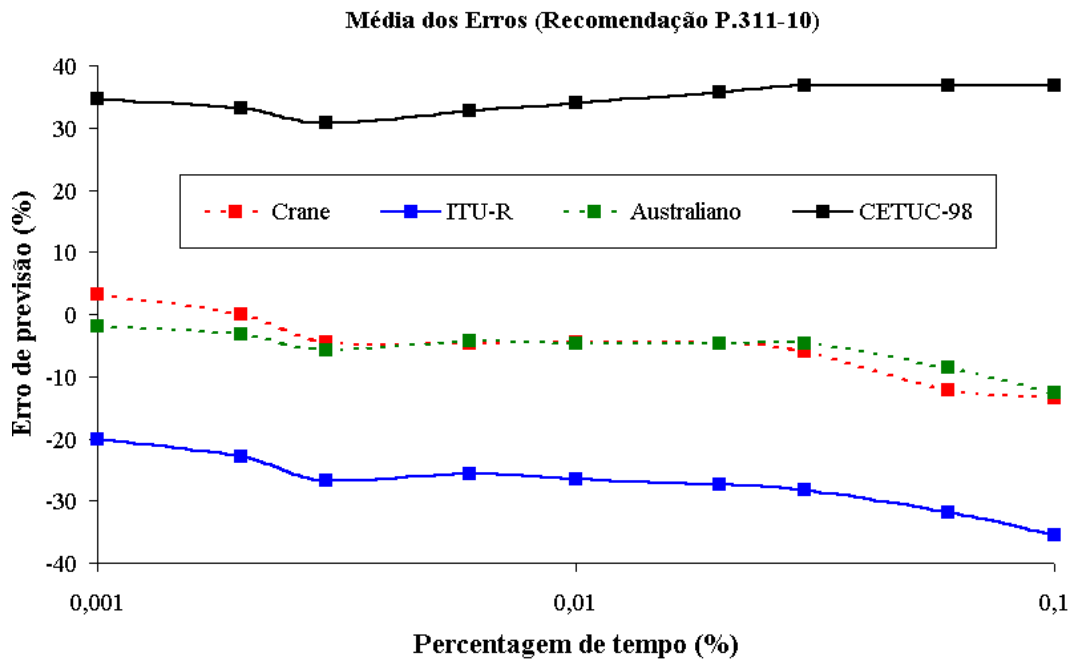


Figura 21 Média dos erros (Recomendação P.311-10).

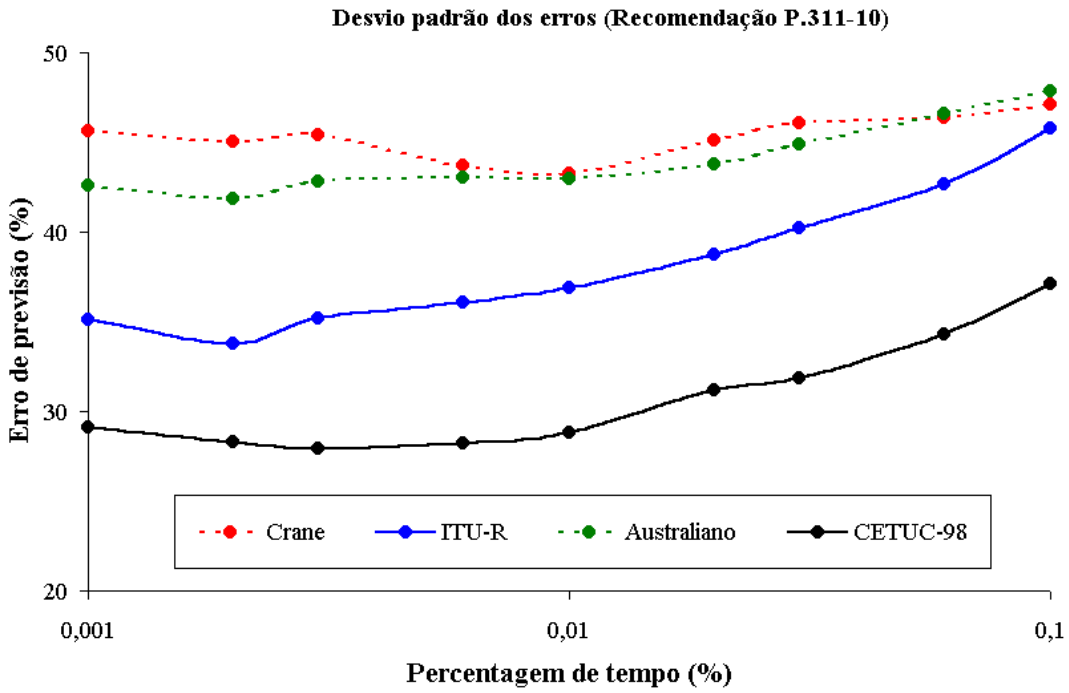


Figura 22 Desvio padrão dos erros (Recomendação P.311-10).

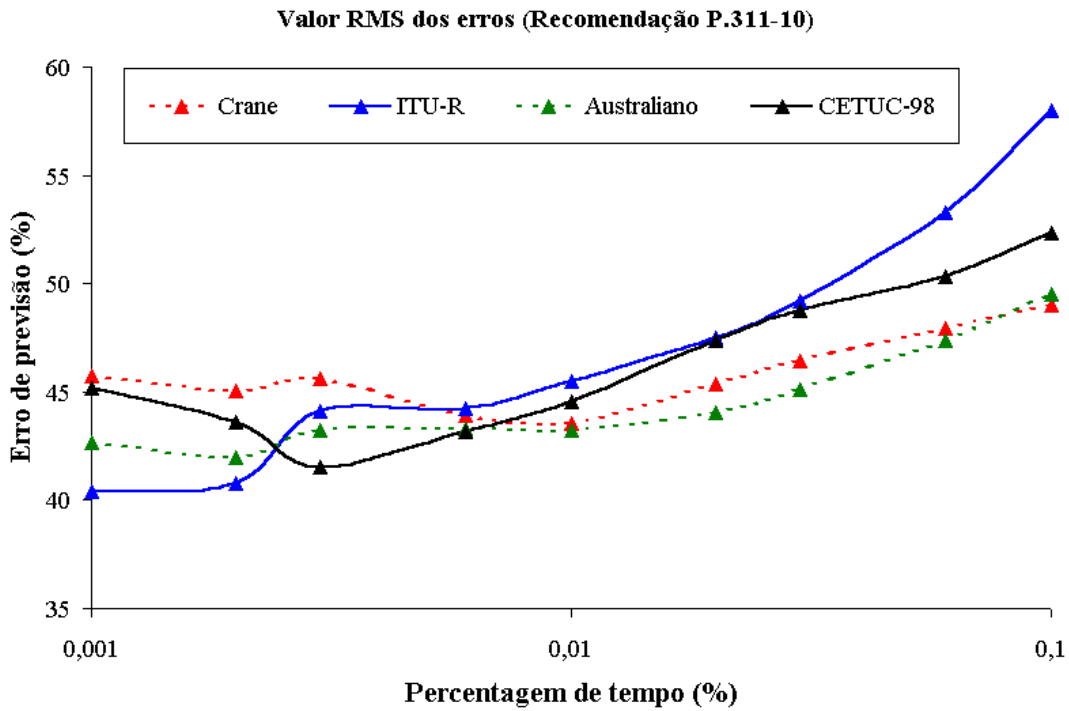


Figura 23 Valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10).

A análise do erro médio indica uma forte superestimação pelo modelo CETUC-98 (o pior desempenho sob o aspecto da média dos erros) e uma forte subestimação por parte do modelo do ITU-R. Deve-se ressaltar que o primeiro foi desenvolvido especificamente com um pequeno conjunto de dados de climas tropicais enquanto que o segundo foi desenvolvido utilizando, predominantemente, dados de climas temperados. Já os modelos de Crane e Australiano apresentam desempenho bastante bom no que diz respeito à média dos erros.

Quando se analisa o desvio padrão, o modelo do CETUC apresenta um desempenho bem superior aos demais. Este resultado, à primeira vista paradoxal considerado o desempenho do modelo com relação ao erro médio, explica-se pelo emprego neste método da distribuição completa da taxa de precipitação como dado de entrada, sem o artifício de funções de extrapolação.

Se considerado o erro RMS como indicador final, os métodos podem ser considerados aproximadamente equivalentes em seu fraco desempenho, com ligeira vantagem para o método do ITU-R nas baixas percentagens de tempo (atenuações elevadas) e para os métodos de Crane e Australiano nas percentagens de tempos mais elevadas (atenuações baixas).

Os resultados dos testes, para o erro relativo, são dados nas Tabelas 19, 20 e 21, assim como nas Figuras 24, 25 e 26.

Tabela 19 Média dos erros (Erro relativo).

p (%)	Média dos erros (%)			
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98
0,001	-12,66	13,56	6,96	47,57
0,002	-15,52	10,55	5,07	45,12
0,003	-18,29	5,86	2,60	41,75
0,006	-17,51	4,39	4,04	45,48
0,01	-18,25	3,38	3,23	47,61
0,02	-18,64	3,80	3,59	51,48
0,03	-18,64	3,46	4,07	53,92
0,06	-20,47	-1,84	1,70	54,36
0,1	-20,67	-3,77	0,43	60,20

Tabela 20 Desvio padrão dos erros (Erro relativo).

p (%)	Desvio padrão dos erros (%)			
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98
0,001	31,16	45,11	40,91	48,63
0,002	27,57	42,98	37,59	45,73
0,003	26,90	40,39	36,37	44,14
0,006	27,33	37,77	35,98	46,05
0,01	27,20	37,41	35,20	45,93
0,02	29,09	39,50	36,88	47,87
0,03	30,97	40,73	38,45	48,99
0,06	35,74	41,21	42,99	57,81
0,1	48,85	45,01	54,33	74,82

Tabela 21 Valor RMS dos erros (Erro relativo).

p (%)	Valor RMS dos erros (%)			
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98
0,001	33,63	47,11	41,50	68,03
0,002	31,64	44,25	37,93	64,24
0,003	32,53	40,82	36,46	60,76
0,006	32,45	38,03	36,21	64,72
0,01	32,76	37,57	35,35	66,15
0,02	34,55	39,68	37,06	70,29
0,03	36,14	40,88	38,66	72,85
0,06	41,19	41,25	43,03	79,35
0,1	53,04	45,17	54,33	96,03

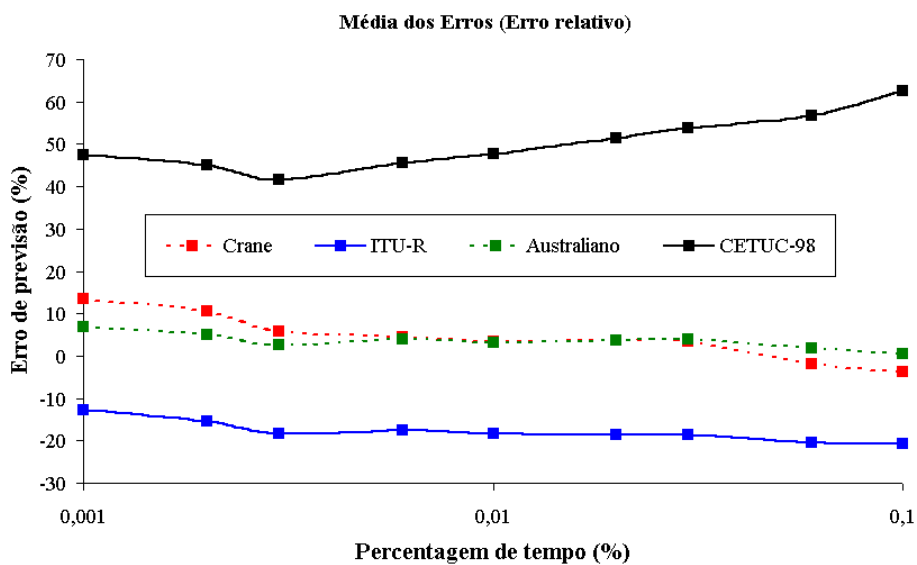


Figura 24 Média dos erros (Erro relativo).

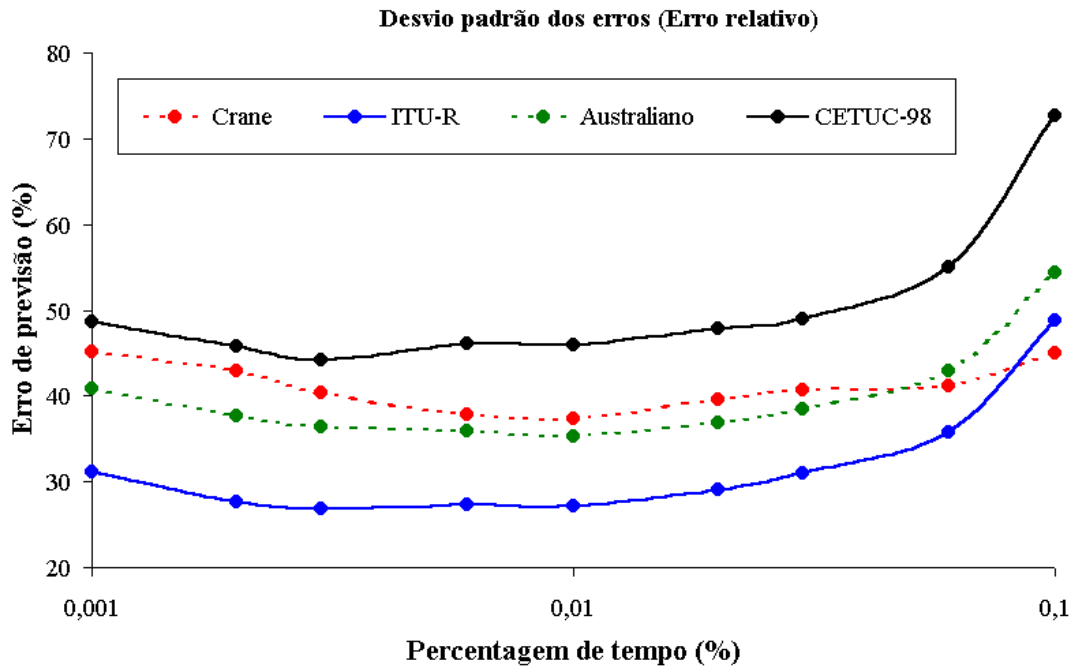


Figura 25 Desvio padrão dos erros (Erro relativo).

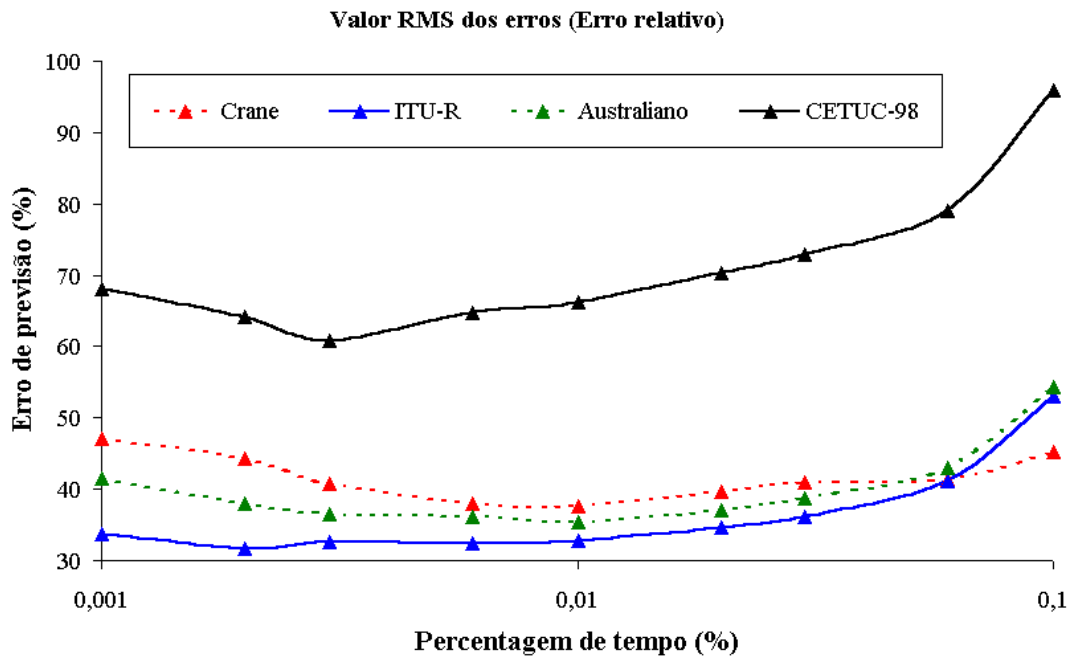


Figura 26 Valor RMS dos erros (Erro relativo).

Os testes de erro relativo indicam que o modelo de ITU-R, na média, subestima as atenuações por chuvas medidas entre aproximadamente 12 e 21 % (Tabela 19), para percentagens de tempo entre 0,001 e 0,1%, respectivamente.

Por sua vez, o modelo de Crane superestima de 3,5 a 14 %, para percentagens de tempo entre 0,001 e 0,03%, e subestima de 2 a 4 %, para percentagens de tempo entre 0,06 e 0,1%. O desvio padrão dos erros é significativamente maior para o modelo de Crane do que para o modelo de ITU-R, exceto para a percentagem de tempo de 0,1 %.

O modelo Australiano introduz uma melhoria nos erros médios, com uma superestimação de 0,5 a 7 %, para percentagens de tempo entre 0,001 e 0,1%, o que configura um excelente desempenho sob este aspecto. Todavia, o desvio padrão dos erros se deteriora quando comparado ao resultado do modelo de ITU-R.

O modelo do CETUC-98 novamente superestima de forma acentuada as atenuações por chuvas medidas, com erros médios entre 44 e 60 % no intervalo todo de percentagens de tempo aqui considerado, apresentando também um desvio padrão de erros maior do que o modelo do ITU-R. Isso se explica pelo fato deste modelo ter sido desenvolvido com base em dados de uma localidade específica (São Paulo) e não para utilização global.

No que diz respeito ao desvio padrão, o método do ITU-R apresenta o melhor desempenho e o CETUC-98, ajustado sobre um pequeno conjunto de dados para minimizar a variável de erro da recomendação P.311, o pior.

Analisando o valor RMS dos erros, conclui-se que o modelo de ITU-R ainda apresenta um melhor desempenho que os outros modelos considerados, exceto para a percentagem de tempo de 0,1%, na qual o modelo de Crane comporta-se melhor.

4.2. MODELAMENTO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

Na seção 4.1 observa-se que, independentemente da variável de erro considerada, todos os métodos propostos apresentam um desempenho bastante insatisfatório. Se considerado o valor RMS do erro relativo como indicador de qualidade, o modelo atualmente proposto pelo ITU-R é ainda o que apresenta

melhor desempenho. Por sua vez, o modelo Australiano melhora consideravelmente a média dos erros, mas o desvio padrão é pobre quando comparado com o modelo de ITU-R.

Esses resultados motivam a procura de um novo modelo para previsão da distribuição cumulativa da atenuação por chuvas que se ajuste melhor às base de dados disponíveis. Nesta seção será apresentado o desenvolvimento de um modelo de aplicação global, com melhor desempenho que o apresentado pelos modelos até agora analisados. Além do melhor desempenho objetivou-se no desenvolvimento deste novo modelo, que será chamado **modelo Pérez-Mello**, a fácil implementação e o uso de distribuições cumulativas de taxa de precipitação completas para determinação da distribuição da atenuação por chuvas de forma equiprobabilística, sem o uso de funções de extrapolação.

Para o modelamento tomou-se por base o conjunto total de medidas de atenuação por chuvas (DBSG5 mais os 7 enlaces de São Paulo) e foram utilizadas técnicas de múltipla regressão não linear [46-47], de modo a obter uma expressão matemática empírica mas baseada no comportamento estatístico das distribuições cumulativas da atenuação. Adicionalmente, esta expressão deve estar relacionada com os parâmetros dos enlaces e a taxa de precipitação.

Os passos a seguir para o modelamento em questão são:

- a) Determinam-se os valores do fator de redução de percurso (r_p), que será definido adiante (seção 4.2.1), para todos os enlaces. Essa é a variável a ser ajustada.
- b) Determinam-se as correlações entre esta variável e as possíveis variáveis independentes e plotam-se os gráficos que a fim de visualizar a dependência do fator de redução com cada uma delas e inferir possíveis funções de ajuste.
- c) Realiza-se um ajuste, mediante uma estimação não linear [46-47], de possíveis expressões matemáticas que relacionam o fator de redução com as variáveis independentes. A fim de otimizar o ajuste, caso seja necessário são excluídos aqueles enlaces cujo comportamento se afaste excessivamente do comportamento geral da população total de dados considerados, indicando erros de medida.

- d) É escolhida a função, ou grupo de funções (se os dados precisarem ser divididos em intervalos de acordo com uma variável, como por exemplo, segundo o comprimento do enlace) que ofereça a melhor correlação entre os valores medidos e previstos, assim como o menor erro. Adicionalmente, a função, ou grupo de funções escolhidas, deve satisfazer aos propósitos definidos inicialmente para o modelo e não gerar inconsistências do ponto de vista físico. Essas inconsistências, observadas em alguns modelos, são, por exemplo, efeitos de *roll-over* (atenuação decrescente com aumento de taxa de precipitação) e a previsão de atenuação elevada ou não nula quando a taxa de precipitação tende a zero.

4.2.1.

Determinação da Expressão Empírica para a Previsão da Atenuação por Chuvas

Parte-se do mesmo princípio inicial dos modelos de ITU-R, CETUC-98 e Australiano [14,17-18], ou seja, considera-se que a atenuação por chuvas pode ser calculada por:

$$A(\text{dB}) = \gamma L_{\text{ef}} \quad (4.3)$$

onde:

γ = Atenuação específica determinada da mesma forma que nos modelos do capítulo 2.

L_{ef} = Comprimento efetivo da chuva, igual ao produto de “ $r_p d$ ”, sendo r_p o fator de redução que considera a característica de não uniformidade das chuvas ao longo do percurso do enlace.

Portanto, a atenuação por chuvas será dada por:

$$A(\text{dB}) = k R_p^\alpha L_{\text{ef}} = k R_p^\alpha r_p d \quad (4.4)$$

onde R_p corresponde à taxa de precipitação pontual para a percentagem de tempo “ p ”.

De (4.4), tem-se que o fator de redução é dado por:

$$r_p = \frac{A(\text{dB})}{kR_p^\alpha d} \quad (4.5)$$

É esse fator r_p o que será ajustado a fim de obter a expressão geral do novo modelo.

As Figs. 27, 28 e 29, correspondem aos gráficos de espalhamento do fator r_p em função da taxa de precipitação, os comprimentos dos enlace e a sua latitude (em radianos), respectivamente.

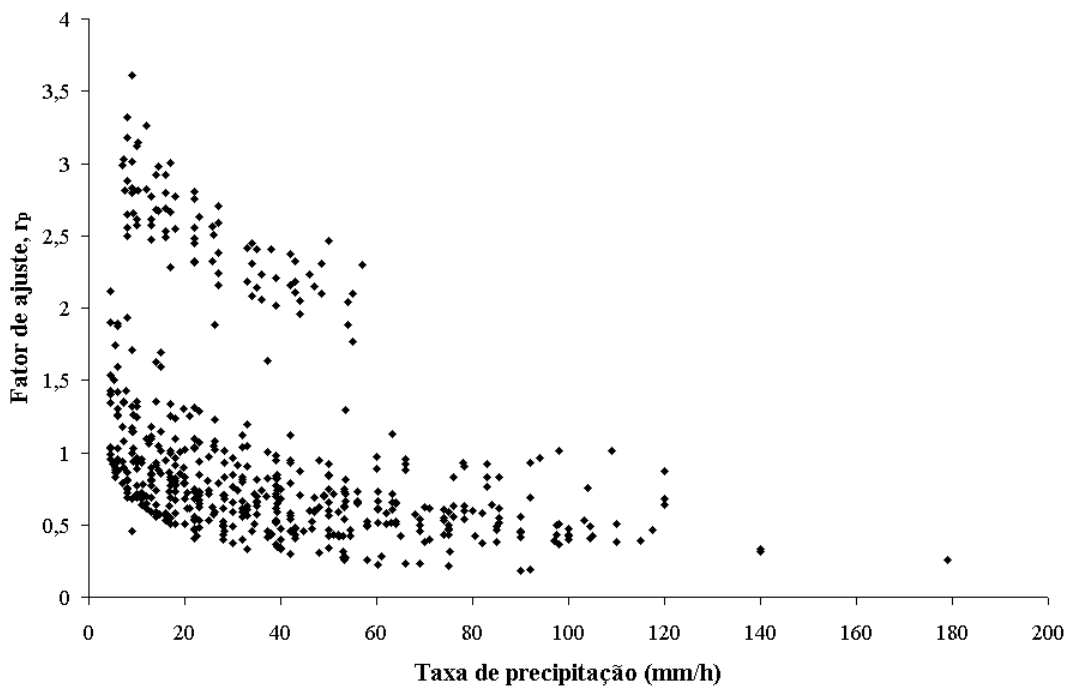


Figura 27 Gráfico de espalhamento de r_p vs. R_p .

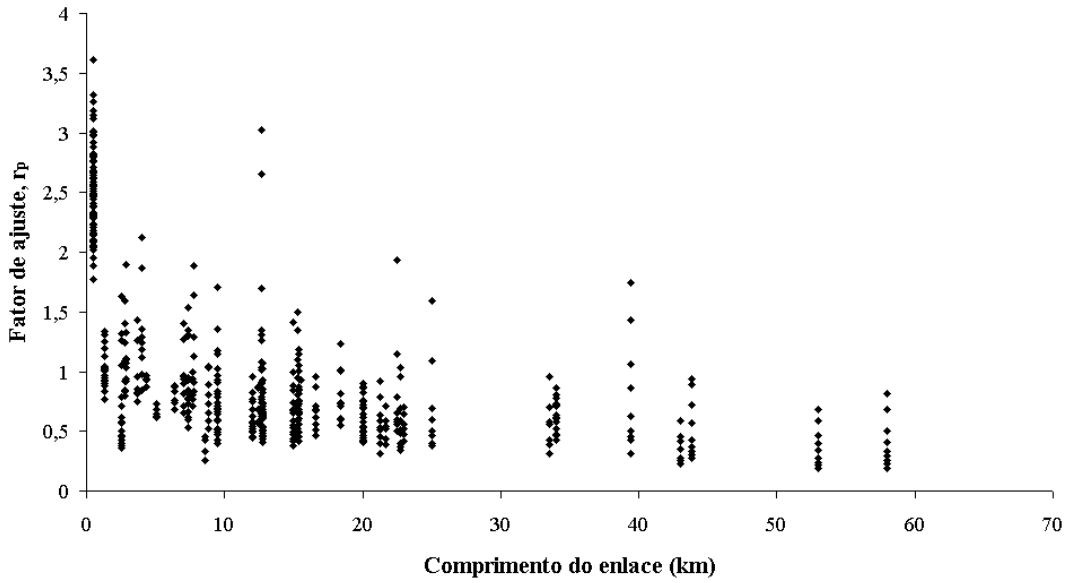


Figura 28 Gráfico de espalhamento de r_p vs. d.

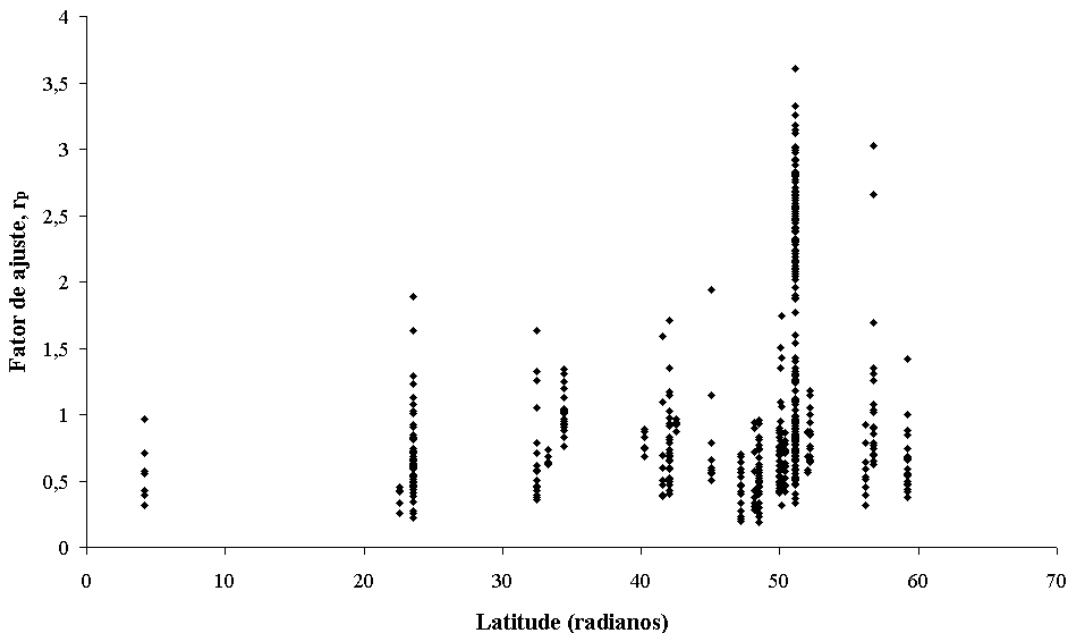


Figura 29 Gráfico de espalhamento de r_p vs. Latitude.

Nas Figs. 27, 28 e 29 observa-se que existe uma boa correlação do fator r_p com a taxa de precipitação e o comprimento do enlace. Por outro lado, a correlação entre r_p e a latitude é baixa.

Portanto, a expressão matemática a ser ajustada deve relacionar a fator r_p com as variáveis independentes R_p e d . Assume-se que a dependência com a frequência está totalmente incluída no fator de atenuação específica.

Observa-se que fator r_p varia com a taxa de precipitação de acordo à lei de potência, cujo expoente, de acordo ao modelo do CETUC-98 [18], varia com o comprimento do enlace. Por sua vez, a forma matemática da influência do comprimento do enlace no fator r_p não pode ser estimada a partir da simples visualização da Fig. 28.

Para a análise de múltipla regressão, testaram-se vários métodos [48-52], implementados no programa Statistica, obtendo-se melhores resultados com os métodos *Quase-Newton* [48] e *Simplex-Quase Newton* [49].

Diversas funções foram testadas, sendo os detalhes omitidos aqui por pouco relevantes. O melhor ajuste foi obtido com uma função da forma:

$$r_p = a_1 \times d^{a_2} R_p \left(a_3 + \frac{a_4}{d} \right) \quad (4.6)$$

Os valores obtidos para as constantes a_1 , a_2 , a_3 e a_4 , que otimizam o ajuste, são resumidos na Tabela 22.

Tabela 22 Valores das constantes de ajuste para o fator r_p .

a_1	a_2	a_3	a_4
3,386	-0,178	-0,356	0,107

Observa-se, na Fig. 30, uma boa concordância entre os valores previstos e medidos do fator r_p . A Fig. 31 mostra a distribuição de resíduos (erros absolutos) dos valores estimados do fator r_p em relação aos medidos e a distribuição gaussiana ideal.

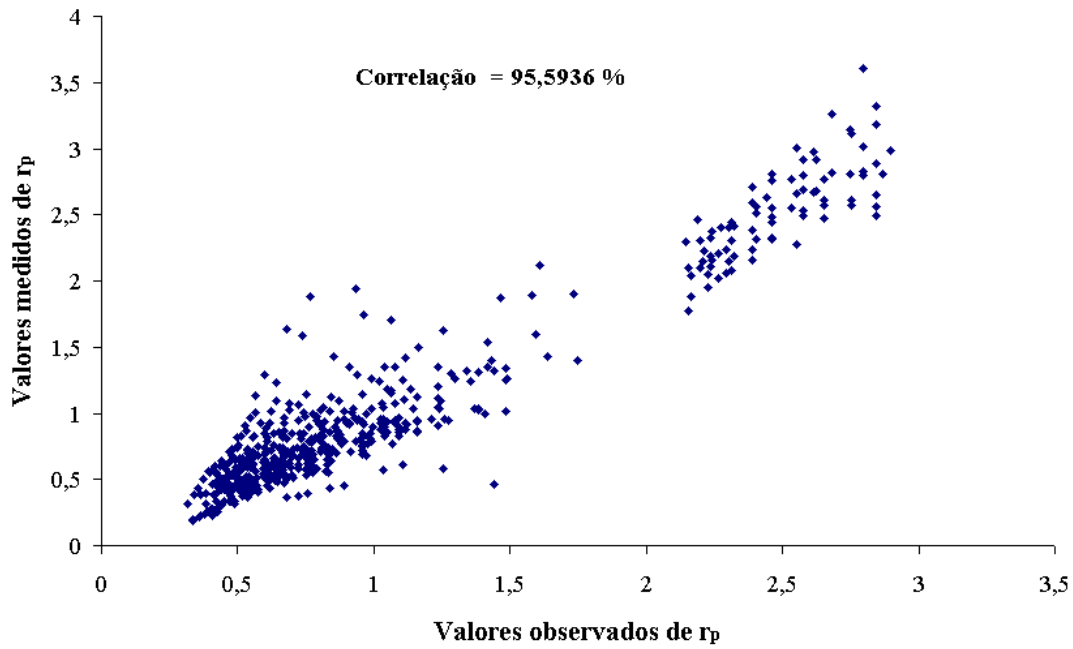


Figura 30 Valores previstos versus valores medidos, do fator r_p .

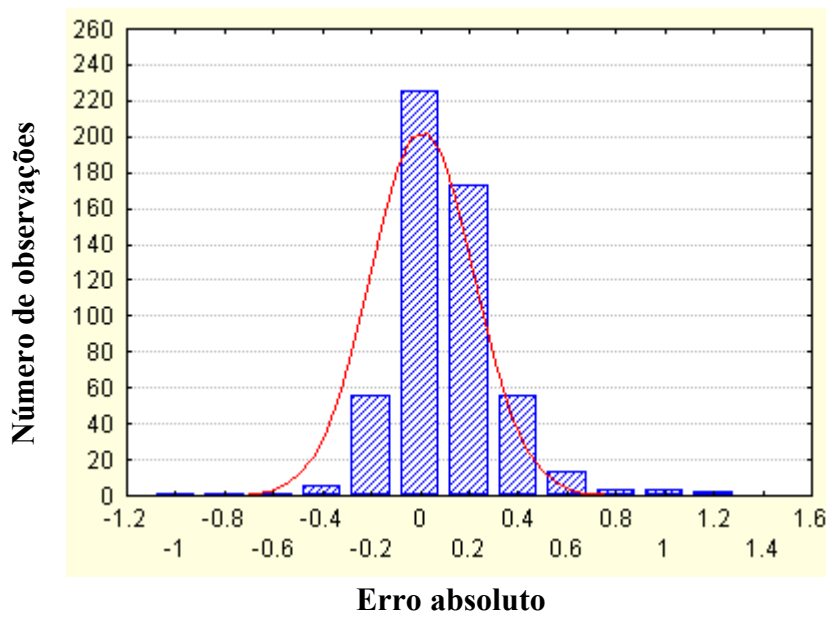


Figura 31 Distribuição dos resíduos do fator r_p .

De (4.4) e (4.6), tem-se que a expressão empírica para a previsão da atenuação por chuva é dada por:

$$A(\text{dB}) = 3,39 \text{ kR}_p \left(\alpha - 0,356 + \frac{0,107}{d} \right) d^{0,821} \quad (4.7)$$

É importante ressaltar que a taxa de precipitação deve ser extraída, preferivelmente, desde medidas realizadas no local de interesse. Caso não se disponha de medidas da taxa de precipitação no local, seus valores podem ser obtidos a partir da Recomendação PN.837-3 de ITU-R [20]

4.2.2. Comparação com as Medidas

As Tabelas 23, 24 e 25, resumem os resultados dos testes, neste caso utilizando o erro relativo, da comparação do modelo aqui desenvolvido e os modelos da seção 4.1. Os resultados também podem ser visualizados nas Figs. 32, 33 e 34.

Tabela 23 Média dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.

P (%)	Média dos erros (%)				
	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98	Perez-Mello
0,001	-12,66	13,56	6,96	47,57	10,53
0,002	-15,52	10,55	5,07	45,12	7,38
0,003	-18,29	5,86	2,60	41,75	3,76
0,006	-17,51	4,39	4,04	45,48	2,88
0,01	-18,25	3,38	3,23	47,61	2,08
0,02	-18,64	3,80	3,59	51,48	2,58
0,03	-18,64	3,46	4,07	53,92	2,54
0,06	-20,47	-1,84	1,70	54,36	-0,60
0,1	-20,67	-3,77	0,43	60,20	-1,26

Tabela 24 Desvio padrão dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.

Desvio padrão dos erros (%)					
p (%)	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98	Perez-Mello
0,001	31,16	45,11	40,91	31,16	29,26
0,002	27,57	42,98	37,59	27,57	25,64
0,003	26,90	40,39	36,37	26,90	23,66
0,006	27,33	37,77	35,98	27,33	21,88
0,01	27,20	37,41	35,20	27,20	21,64
0,02	29,09	39,50	36,88	29,09	25,04
0,03	30,97	40,73	38,45	30,97	25,63
0,06	35,74	41,21	42,99	35,74	27,90
0,1	48,85	45,01	54,33	48,85	36,80

Tabela 25 Valor RMS dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.

Valor RMS dos erros (%)					
p (%)	ITU-R	Crane	Australiano	CETUC-98	Perez-Mello
0,001	33,63	47,11	41,50	33,63	31,10
0,002	31,64	44,25	37,93	31,64	26,68
0,003	32,53	40,82	36,46	32,53	23,95
0,006	32,45	38,03	36,21	32,45	22,07
0,01	32,76	37,57	35,35	32,76	21,74
0,02	34,55	39,68	37,06	34,55	25,18
0,03	36,14	40,88	38,66	36,14	25,76
0,06	41,19	41,25	43,03	41,19	27,91
0,1	53,04	45,17	54,33	53,04	36,82

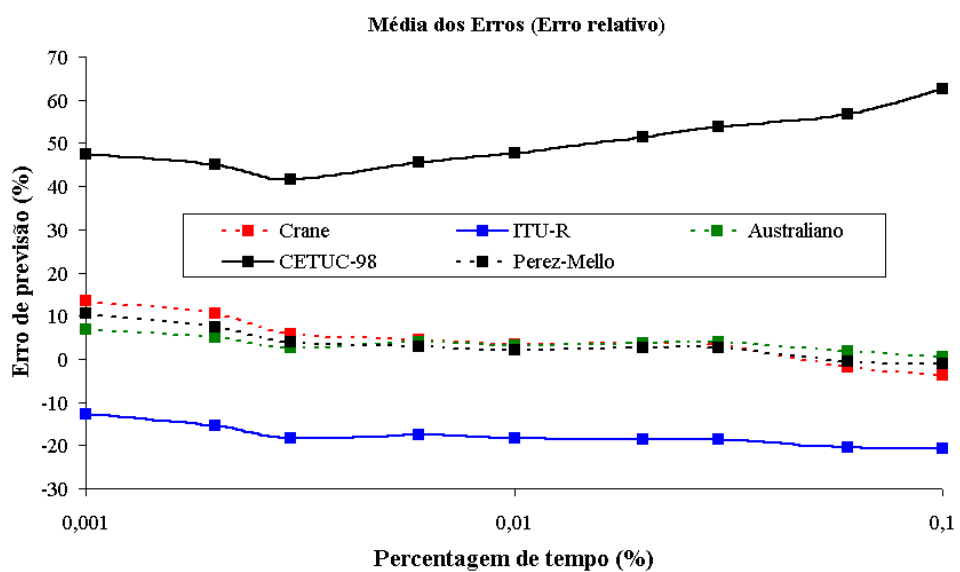


Figura 32 Média dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.

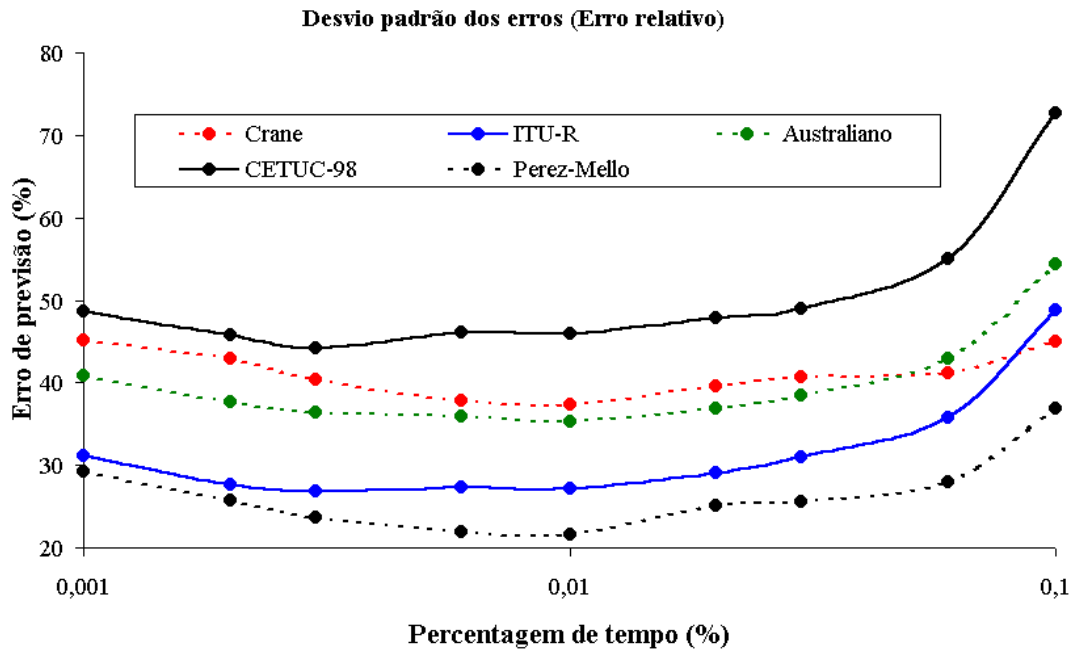


Figura 33 Desvio padrão dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.

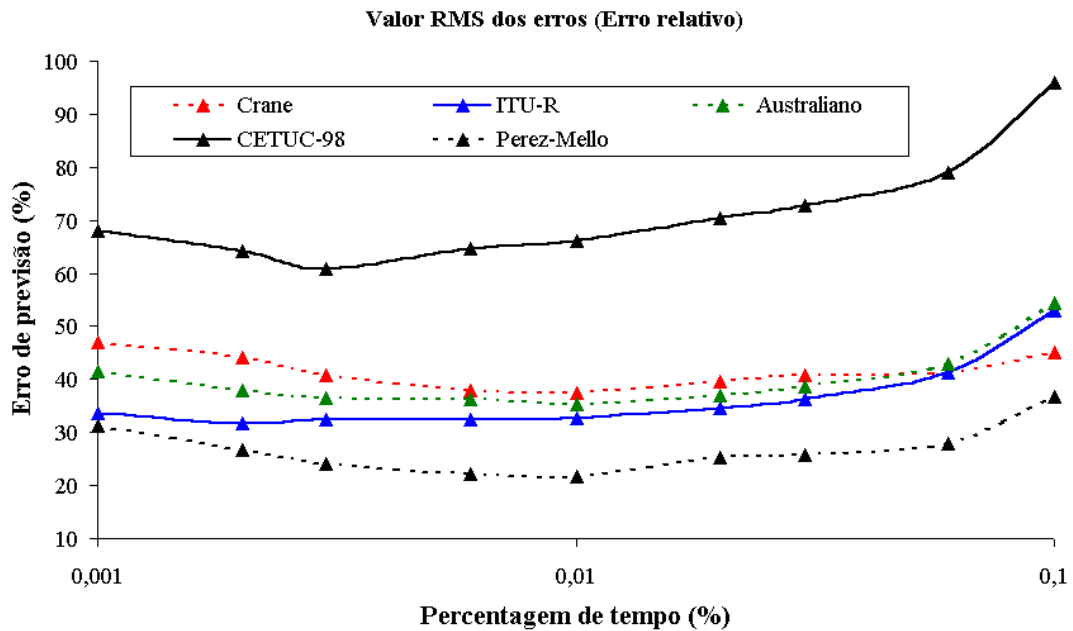


Figura 34 Valor RMS dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.

Das Figs. 32, 33 e 34, pode-se concluir que o modelo aqui desenvolvido para a previsão da distribuição cumulativa da atenuação por chuvas apresenta um melhor desempenho que o dos demais modelos considerados.

A média dos erros é comparável com a do melhor dos modelos testados, ou seja, o modelo Australiano, sendo marginalmente melhor para percentagens de tempo entre 0,006 e 0,06% e marginalmente pior para as percentagens de tempo restantes.

O desvio padrão dos erros é significativamente inferior ao obtido com todos os modelos testados, inclusive o modelo do ITU-R. Como resultado valor RMS dos erros indicam o melhor desempenho do modelo proposto para todas as percentagens de tempo consideradas ficando abaixo de 30% exceto para entre 0,001 e 0,1 % do tempo.

É importante ressaltar que a variabilidade ano a ano do comportamento da distribuição de chuvas é considerada como responsável por cerca de 20 % dos erros de previsão, sendo este valor considerado um limitante inferior para o desempenho possível de métodos de de previsão.

Finalmente, nas Figs. 35 e 36, se compara a distribuição cumulativa medida da atenuação por chuvas com as distribuições cumulativas previstas pelos modelos comparados (incluindo o modelo Pérez-Mello), para o enlace Chibolton e CENESP15, respetivamente.

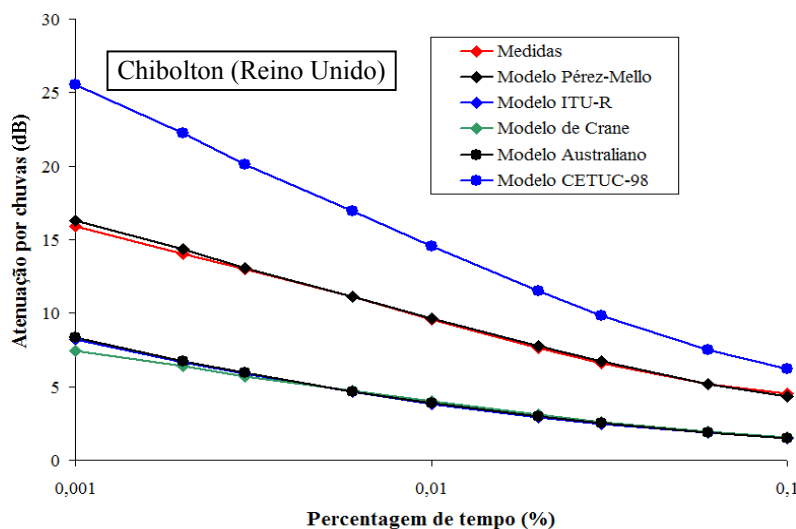


Figura 35 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação por chuva, no enlace Chibolton.

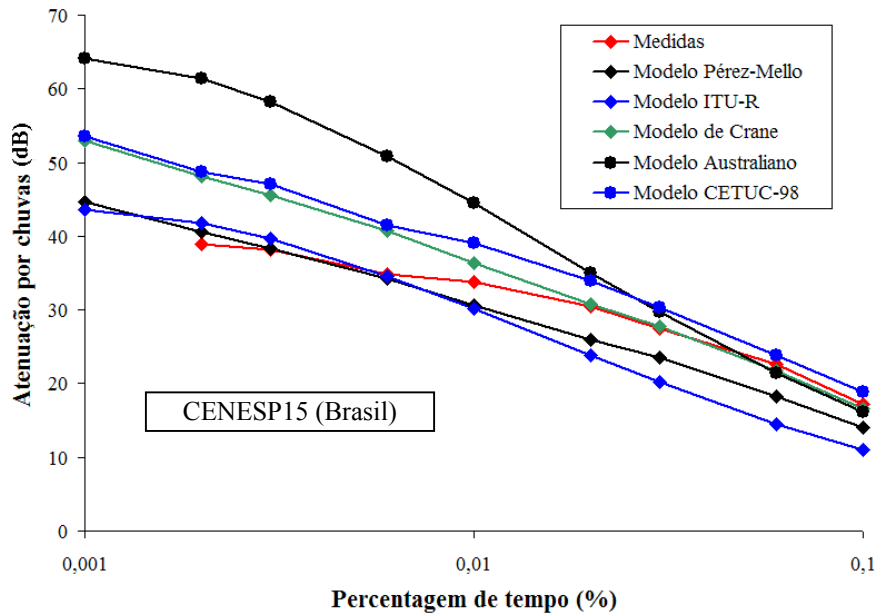


Figura 36 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação por chuva, no enlace CENESP15.

Nas Figs. 35 y 36, observa-se que o modelo Pérez-Mello se ajusta com significativa precisão às medidas para o enlace Chibolton, enquanto que para o enlace CENESP15, a concordância entre os valores medidos e os previstos pelo modelo Pérez-Mello, só ocorre para as baixas percentagens. No caso de CENESP15, são os modelos do CETUC-98 e de Crane os que melhor se ajustam conforme aumenta a percentagem de tempo.

4.2.3. Teste de Validade

Nesta seção, o conjunto de dados é subdividido em subconjuntos, segundo o comprimento de enlace, a frequência de operação e a latitude, com o objetivo de comparar o comportamento do modelo Pérez-Mello com os modelos da literatura, nesses subconjuntos de dados. Para a comparação se escolhe erro RMS, utilizando o erro relativo.

As Figs. 37, 38 e 39, ilustram o valor RMS dos erros (Erro relativo), para comprimentos de enlaces até 5 km, entre 5 e 20 km, e acima de 20 km, respectivamente.

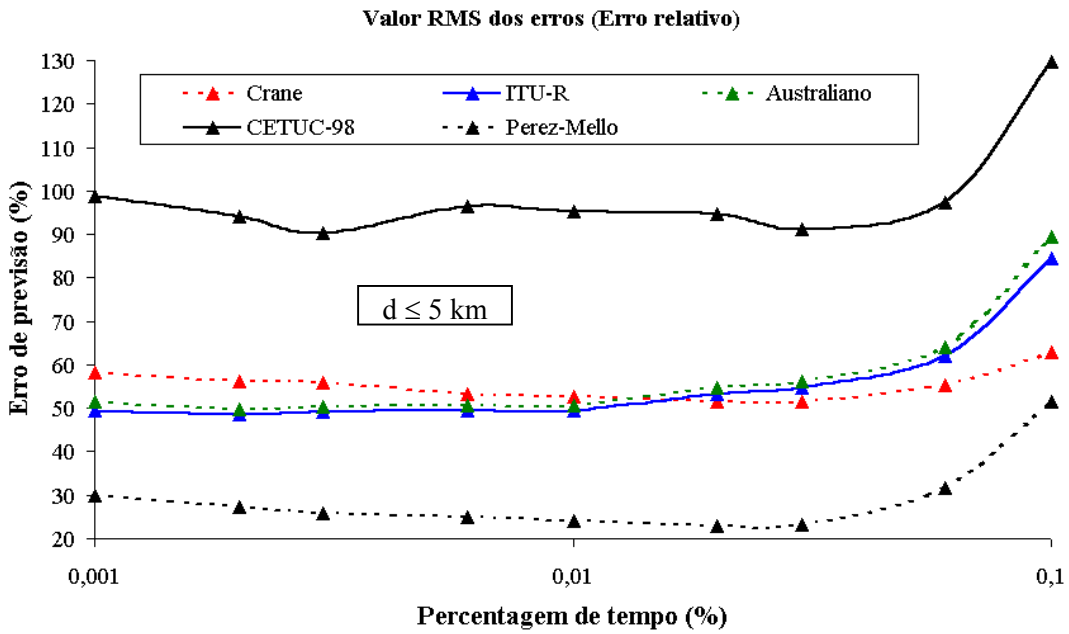


Figura 37 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para $d \leq 5 \text{ km}$.

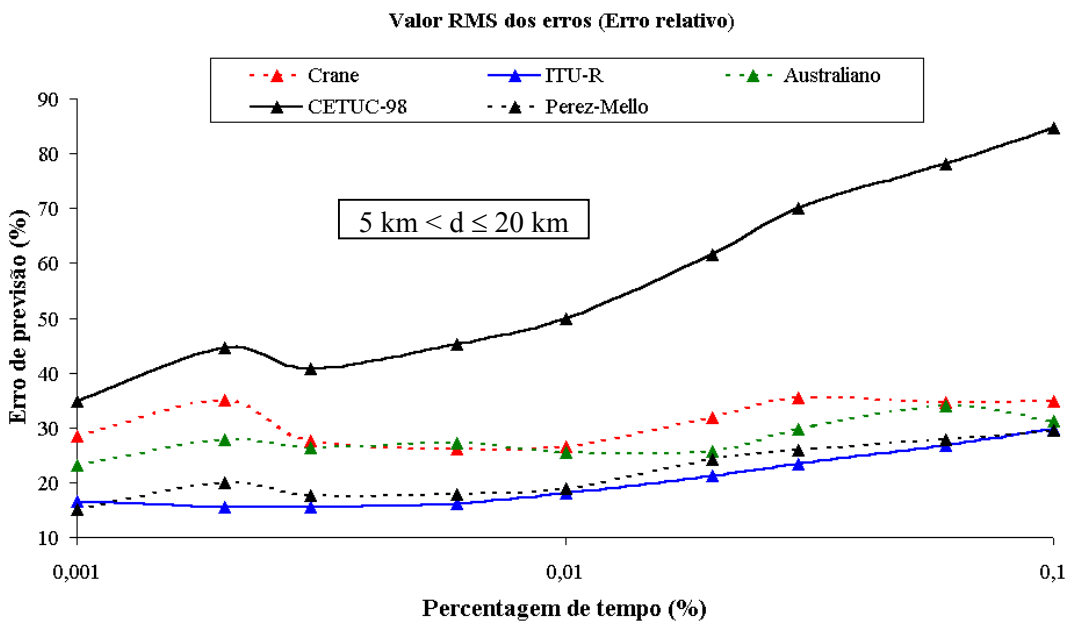


Figura 38 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para $5 \text{ km} < d \leq 20 \text{ km}$.

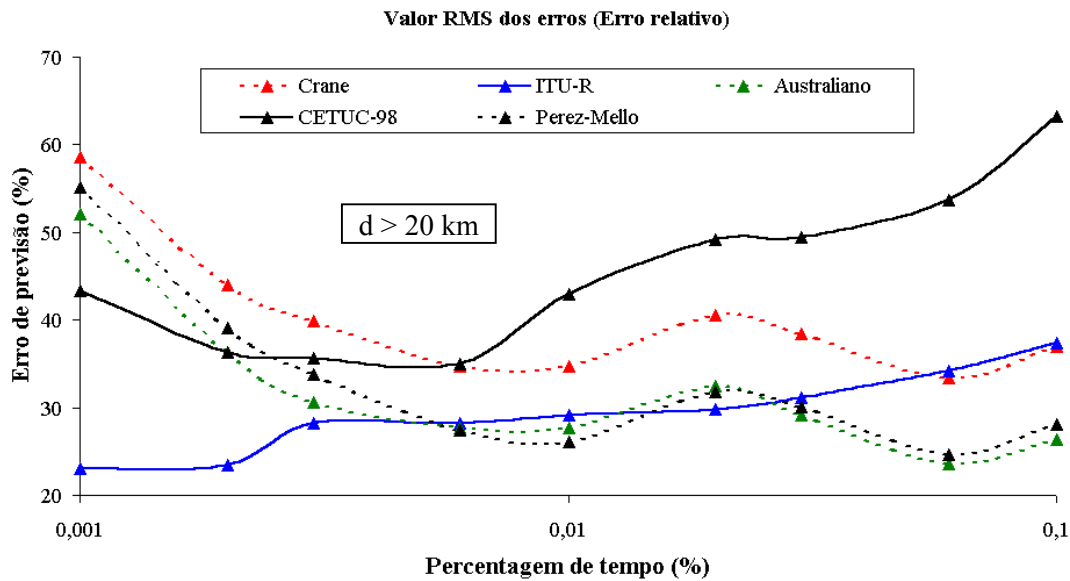


Figura 39 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para $d > 20$ km.

Das Figs. 37, 38 e 39, pode-se observar que o modelo Pérez-Mello apresenta um comportamento notoriamente superior, que os restantes comparados, para comprimentos de enlace até 5 km (range típico do radio de cobertura no sistema LMDS). Para comprimentos entre 5 e 20 km, o modelo Pérez-Mello apresenta um comportamento similar ao do modelo de ITU-R, enquanto que para comprimentos acima de 20 km, o modelo Pérez-Mello diminui seu desempenho para baixas percentagens de tempo.

Por outro lado, nas Figs. 40, 41 e 42, é mostrado o valor RMS dos erros (Erro relativo), para frequências de operação menores que 20 GHz, entre 20 e 40 GHz, e acima de 40 GHz km, respectivamente.

As Figs. 40, 41 e 42, mostram o melhor comportamento do modelo Pérez-Mello para frequências superiores a 20 GHz (às quais pertence a faixa de frequência de operação do sistema LMDS), que se torna marcadamente superior para frequências superiores a 40 GHz. Por a sua vez, para frequências de operação até 20 GHz, o modelo Pérez-Mello apresenta um comportamento similar ao do modelo de ITU-R, sendo ligeiramente inferior para baixas percentagens de tempo.

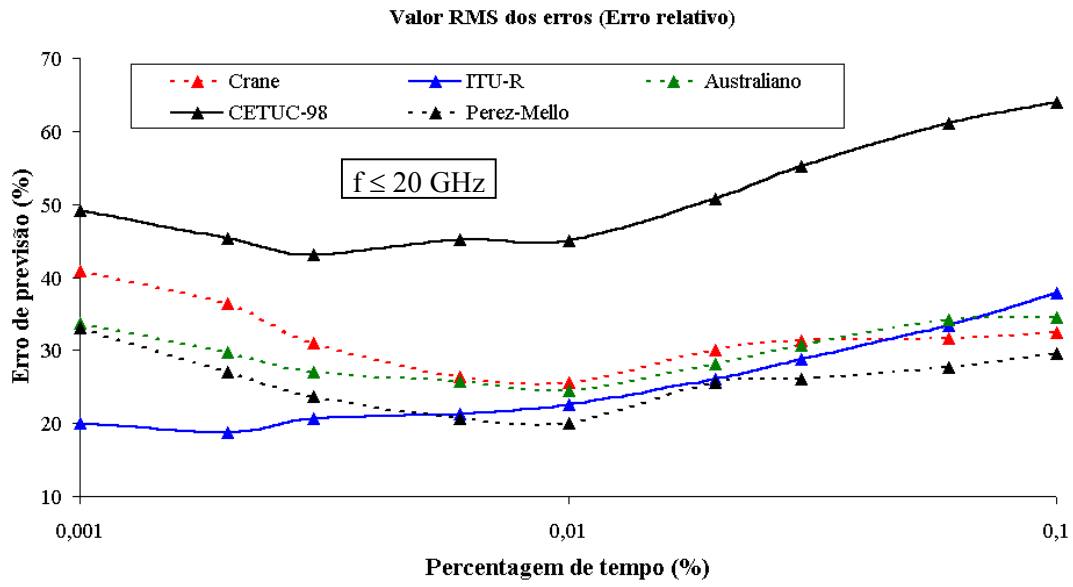


Figura 40 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para $f \leq 20$ GHz.

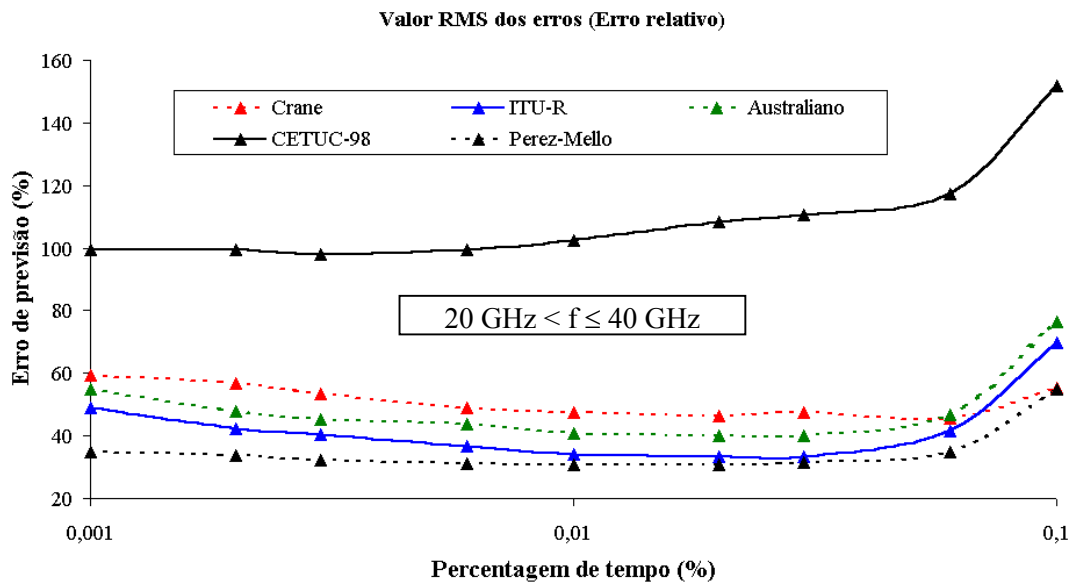


Figura 41 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para $20 \text{ GHz} < f \leq 40 \text{ GHz}$.

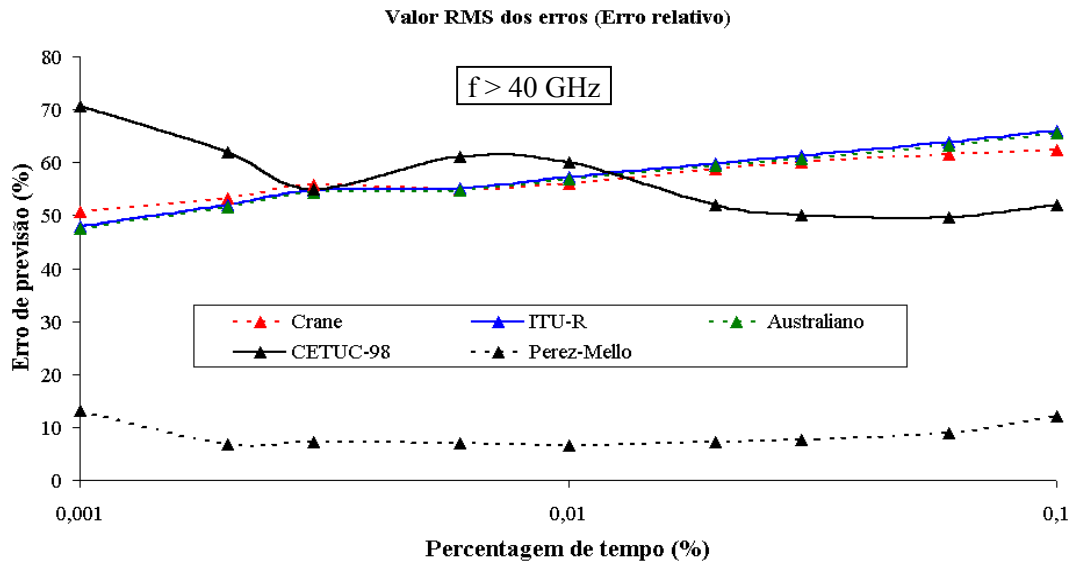


Figura 42 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para $f > 40$ GHz.

Finalmente, as Figs. 43 e 44, mostram o erro RMS (Erro relativo), para latitudes até 30° e superiores a 30° , respectivamente, e nas quais se observa, em geral, o bom desempenho do modelo Pérez-Mello para range todo de latitudes, especialmente para as latitudes superiores a 30° .

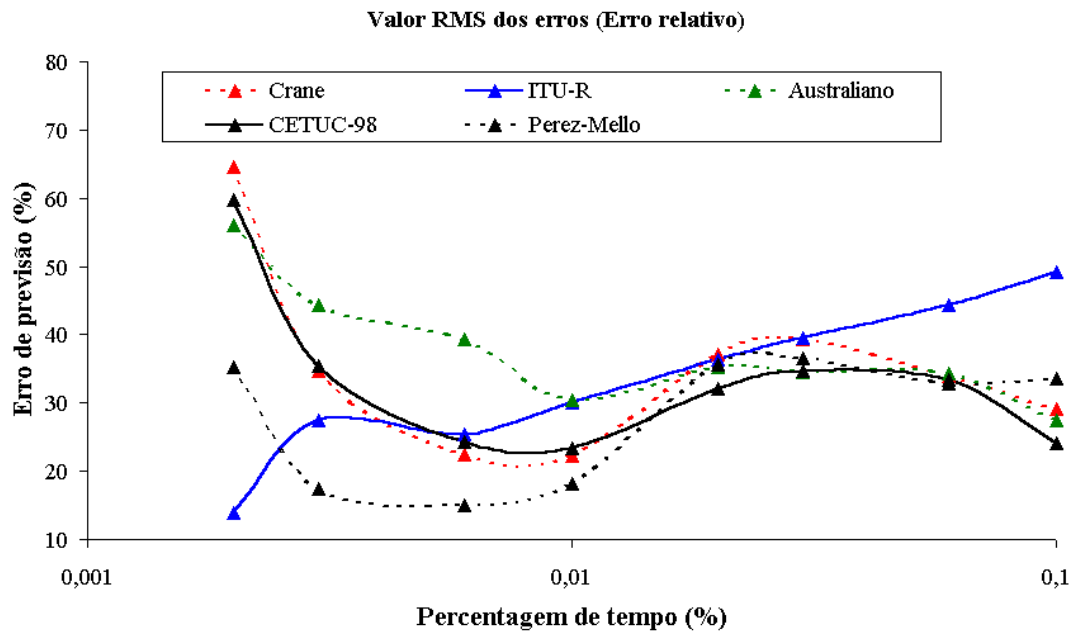


Figura 43 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para latitudes $\leq 30^{\circ}$.

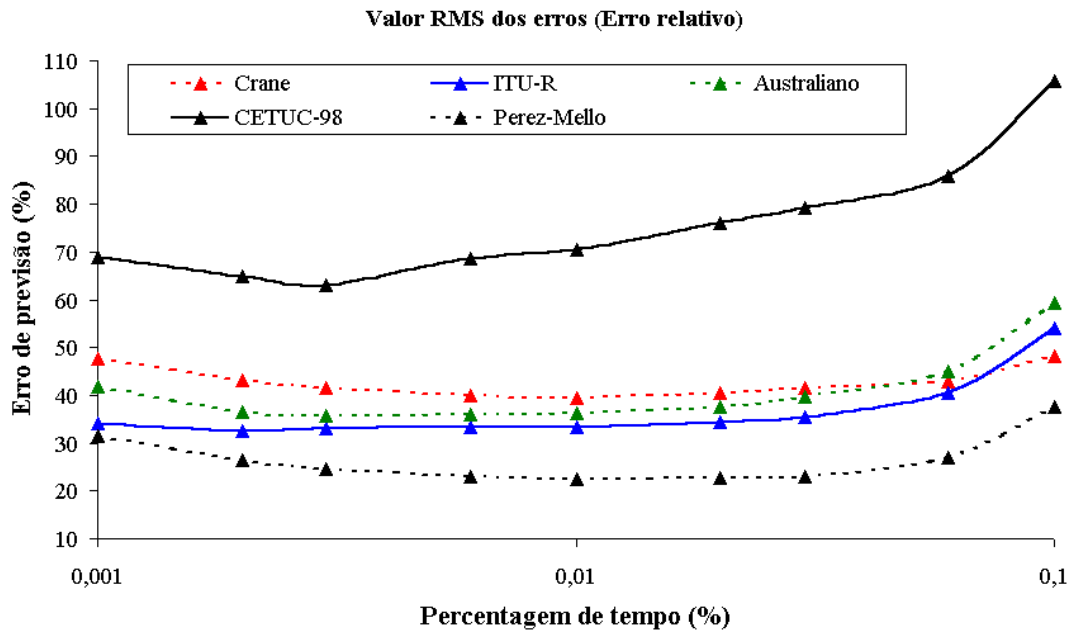


Figura 44 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para latitudes > 30°.

4.2.4. Atenuação por Chuvas no Brasil: Um Caso Particular

Como já visto, a atenuação por chuvas no Brasil constitui-se num caso especial pelas características particulares de seus climas equatorial e tropical. Portanto, é interessante observar como os modelos aqui testados, assim como o novo modelo desenvolvido, se comportam bem apenas para as medidas da atenuação por chuvas correspondentes aos enlaces do Brasil.

Na Fig. 45, pode ser visualizados o erro RMS proveniente da comparação dos modelos já citados e o novo modelo, com as medidas obtidas nos enlaces convergentes de São Paulo. É necessário ressaltar que neste caso, para o desvio padrão e valor RMS dos erros foram desconsiderados os resultados para a percentagem de tempo de 0,001%, uma vez que nesta percentagem, apenas um dos enlaces apresentava valor.

Da Fig. 45, pode-se observar que, como esperado, o modelo CETUC-98 é o que, em linhas gerais, apresenta o melhor desempenho para as medidas de Brasil (São Paulo), para as quais foi desenvolvido.

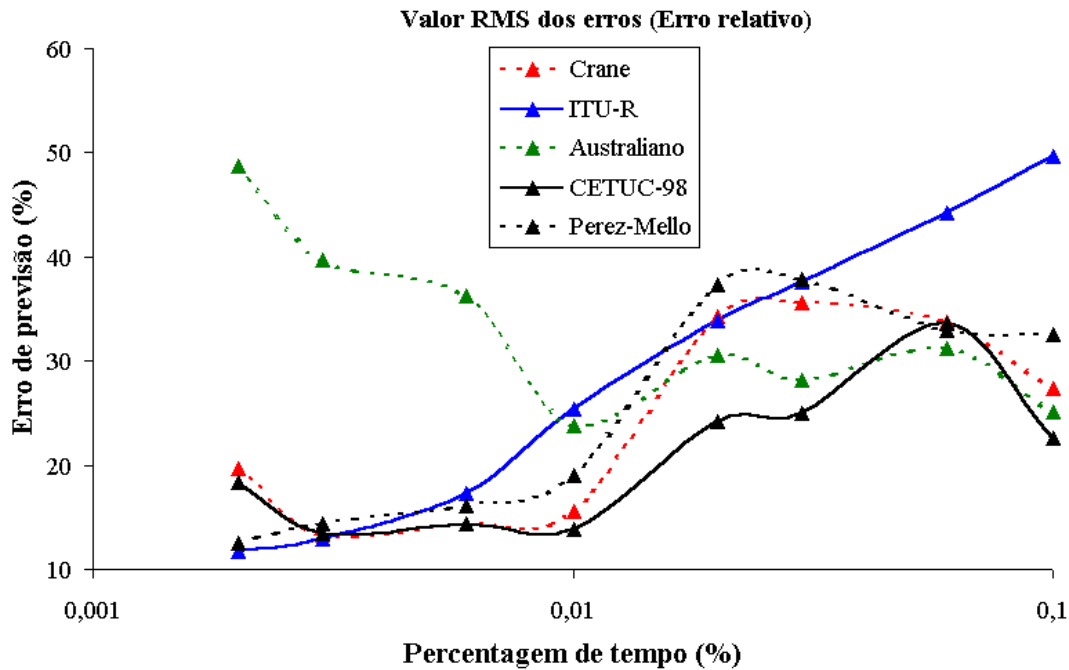


Figura 45 Valor RMS dos erros (Erro Relativo), para as medidas no Brasil.

4.3. MODELAMENTO DA ATENUAÇÃO DIFERENCIAL POR CHUVAS PARA CLIMAS TROPICAIS E EQUATORIAIS

Para o modelamento da atenuação diferencial por chuvas, considera-se como base de dados os resultados das análises dos dados obtidos no capítulo 3, referentes aos 7 enlaces convergentes de São Paulo e os 6 enlaces convergentes de Brasília. Adicionalmente, dado que a distribuição cumulativa da atenuação diferencial A_{12} é distinta da distribuição cumulativa da atenuação diferencial A_{21} , cada par de enlaces gera duas distribuições resultando em 20 distribuições em 15 GHz, 2 distribuições em 18 GHz, 12 distribuições em 23 GHz e 2 distribuições em 38 GHz. Assim, há 36 distribuições medidas disponíveis para a realização do ajuste.

As Tabelas 44 e 45 (Apêndice B) resumem os parâmetros dos pares de enlaces cujas distribuições cumulativas da atenuação diferencial por chuvas foram utilizadas no ajuste.

Foram desenvolvidos dois modelos para a previsão da atenuação diferencial por chuvas. Um primeiro modelo (modelo 1) ajustado diretamente sobre os parâmetros dos enlaces e um segundo modelo (modelo 2) ajustado a partir de distribuição de Weibull.

4.3.1. Modelo 1 para a Previsão da Atenuação Diferencial por Chuvas

Procede-se de forma similar ao desenvolvimento do modelo para a previsão da atenuação total na seção 4.2, mas fazendo a análise de múltipla regressão diretamente sobre toda a população de dados disponível, para percentagens de tempo entre 0,01 e 1%.

Nas Figs. 46 a 49, podem-se observar os gráficos de espalhamento da atenuação diferencial por chuvas A_{ab} , em função da atenuação do enlace a (A_a), a atenuação do enlace b (A_b), a diferença entre os comprimentos dos enlaces e o ângulo (em radianos) entre eles.

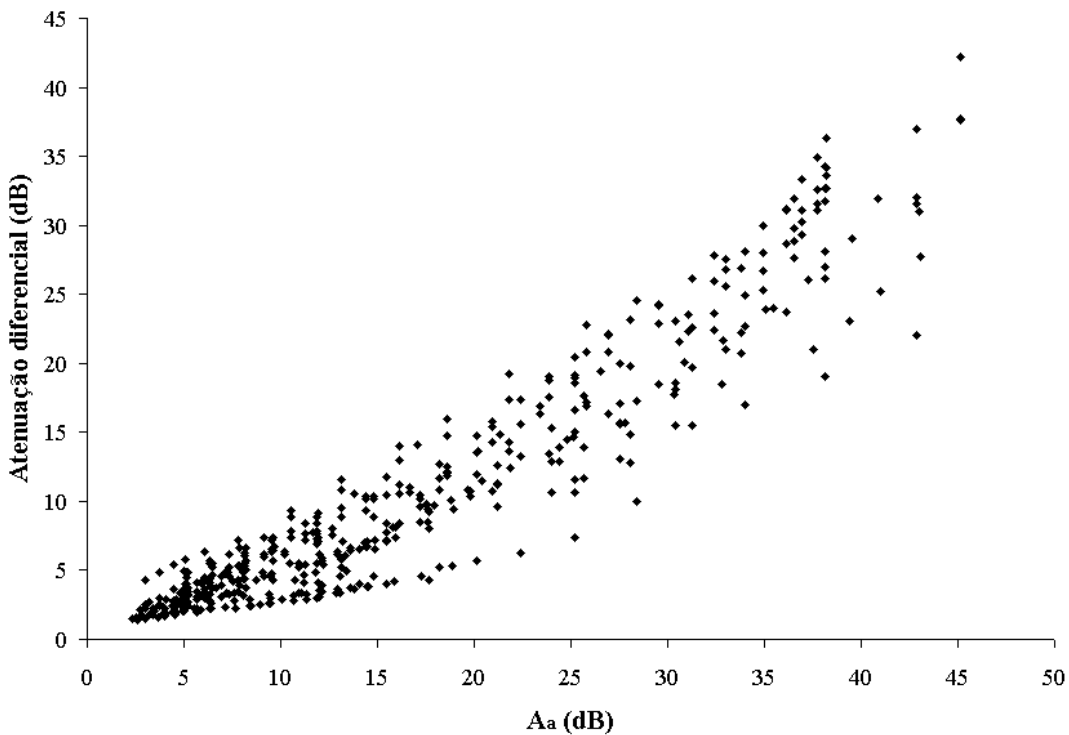


Figura 46 Gráfico de espalhamento de A_{ab} vs. A_a .

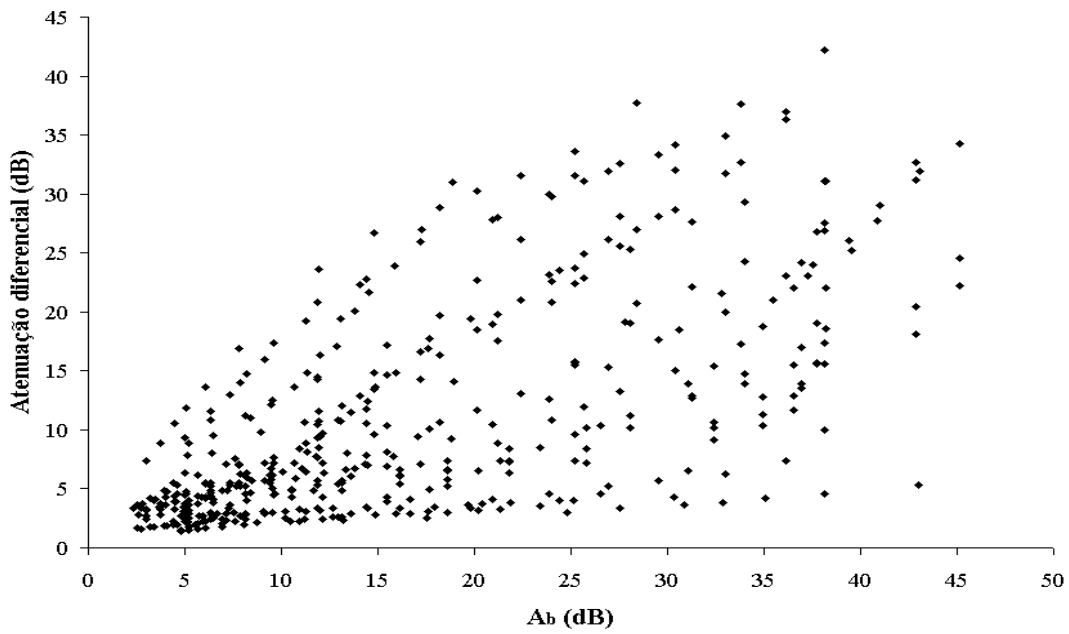


Figura 47 Gráfico de espalhamento de A_{ab} vs. A_b .

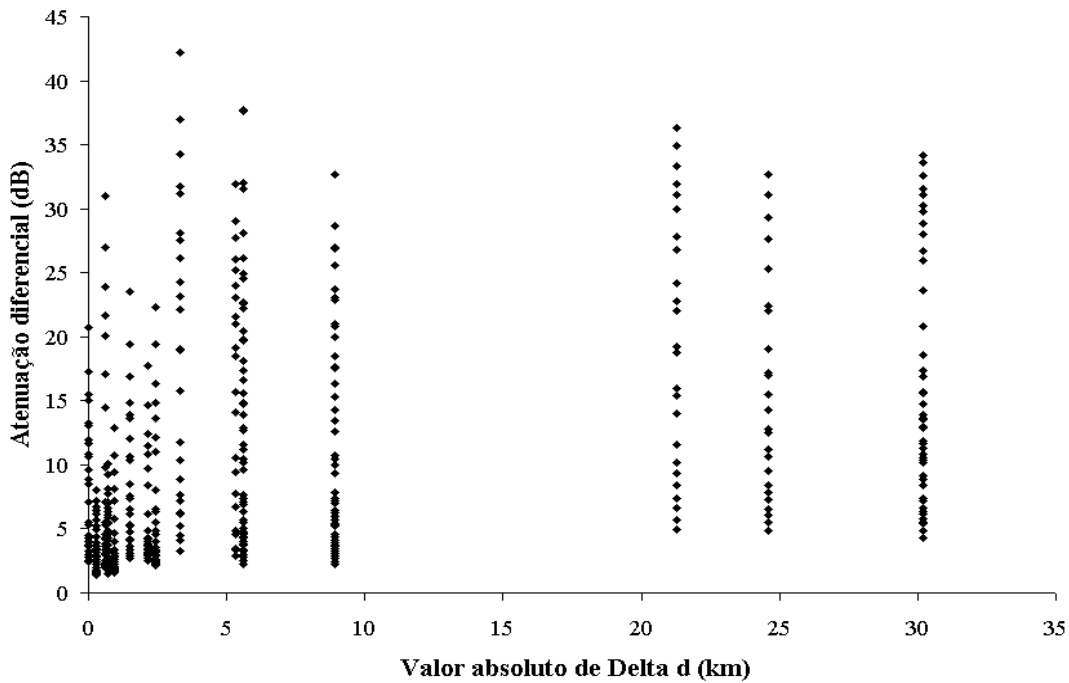


Figura 48 Gráfico de espalhamento de A_{ab} vs. $|\Delta d|$.

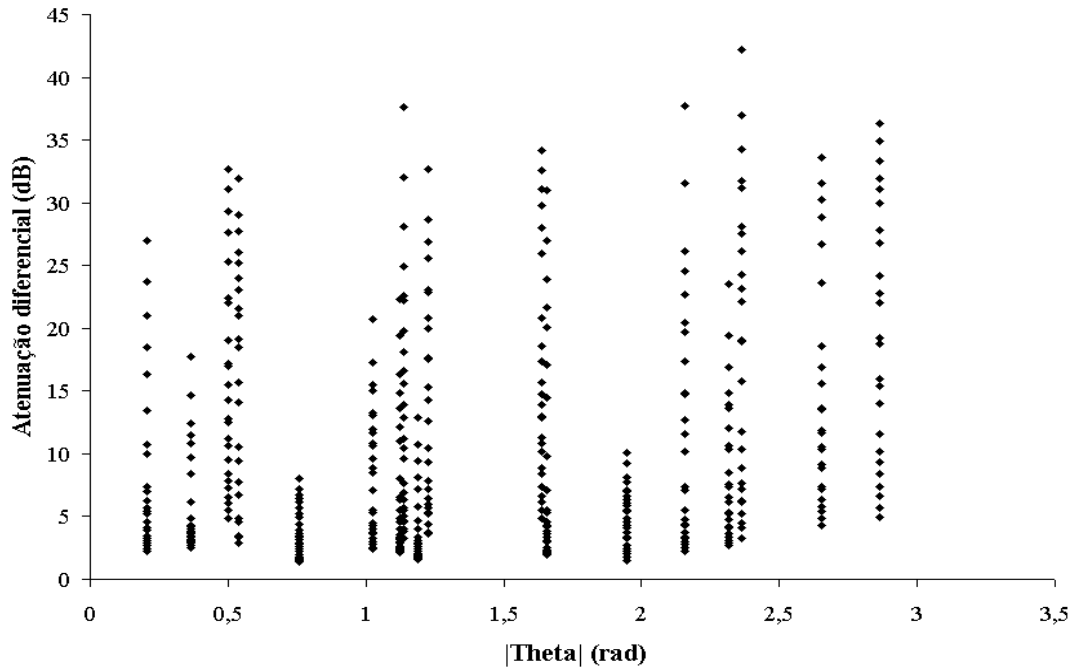


Figura 49 Gráfico de espalhamento de A_{ab} vs. θ .

A Fig. 46 permite observar que, como poderia ser esperado, a atenuação diferencial A_{ab} , apresenta uma correlação muito forte com a atenuação total do enlace a . Por sua vez, a Fig. 47 indica A_{ab} também apresenta uma correlação bem definida, embora não tão acentuada, com a atenuação total medida no enlace b . Por este motivo foi incluída na função a ser ajustada para a previsão da atenuação diferencial uma combinação linear das atenuações totais em cada enlace. Foram testadas também funções incluindo, além destas variáveis, os comprimentos individuais dos enlaces, a frequência de operação e a própria taxa de precipitação medida. Entretanto, a introdução destas variáveis não introduziu melhoria significativa no ajuste obtido, uma vez que elas afetam diretamente as atenuações individuais em cada enlace e se mostraram variáveis redundantes.

As Figs. 48 e 49 não mostram uma correlação significativa da diferença de comprimentos e do ângulo entre os enlaces com a atenuação diferencial. Isto não elimina a dependência com estes parâmetros, uma vez que a baixa correlação com uma variável isolada não exclui a possibilidade de maior correlação quando esta variável é utilizada em uma função em combinação com outras variáveis relevantes. Na verdade, uma dependência com estas variáveis é esperada do ponto

de vista físico: enlaces de comprimentos muito diferentes devem apresentar atenuação diferencial maior do que enlaces de mesmo comprimento, o mesmo se aplicando a enlaces angulados em relação a enlaces alinhados. A inclusão destas variáveis na função de ajuste resultou, de fato, numa redução significativa dos erros de previsão em relação aos obtidos com a simples combinação linear das atenuações individuais nos enlaces.

Além disto, há uma importante razão adicional para a introdução destas variáveis, a solução de um problema de consistência observado em tentativas anteriores de modelamento: quando a diferença entre distâncias e o ângulo entre os enlaces é igual a zero, ambos os enlaces possuem o mesmo percurso e a atenuação diferencial entre eles deve ser igual a zero. Isto é conseguido multiplicando a combinação linear das atenuações individuais por uma função que combine a diferença entre os comprimentos e o ângulo entre os enlaces. O melhor ajuste foi obtido utilizando a soma de funções de potência destas duas variáveis. Assim, a função completa para a previsão distribuição cumulativa da atenuação diferencial por chuvas, na faixa de percentagem de tempo indicado (0,01-1%) e para climas tropicais e equatoriais é dada por:

$$A_{12}(\text{dB}) = (b_1 A_1 - b_2 A_2) \left(b_3 |\theta|^{b_4} + b_5 |\Delta d|^{b_6} \right) \quad (4.8)$$

onde A_1 e A_2 são as atenuações individuais (ou totais) para as percentagens de tempo consideradas, θ é dado em radianos e Δd em Km. As distribuições de atenuações totais utilizadas no cálculo devem, preferivelmente, ser obtidas através de medidas realizadas na região de interesse. Caso não existam medidas disponíveis, estas atenuações podem ser calculadas através de um dos modelos de previsão da atenuação por chuvas.

Os valores para as constantes b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 e b_6 , foram obtidos através de regressão não linear e são dados na Tabela 26. Devido ao grande número de parâmetros envolvidos, o ajuste foi realizado pelos diversos métodos de estimação não linear citados (*Quasi-Newton*, *Simplex*, *Hooke-Jeeves pattern moves* e *Rosenbrock pattern search*) de modo a garantir consistência nos resultados.

Tabela 26 Valores das constantes de ajuste para a atenuação diferencial por chuvas (Modelo 1).

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0,671	0,0786	0,580	0,267	0,427	0,117

A Fig. 50 mostra a boa correlação entre os valores observados da atenuação diferencial e os previstos utilizando a expressão (4.8). Na Fig. 51 é mostrada a distribuição dos erros absolutos entre os valores observados e os valores previstos.

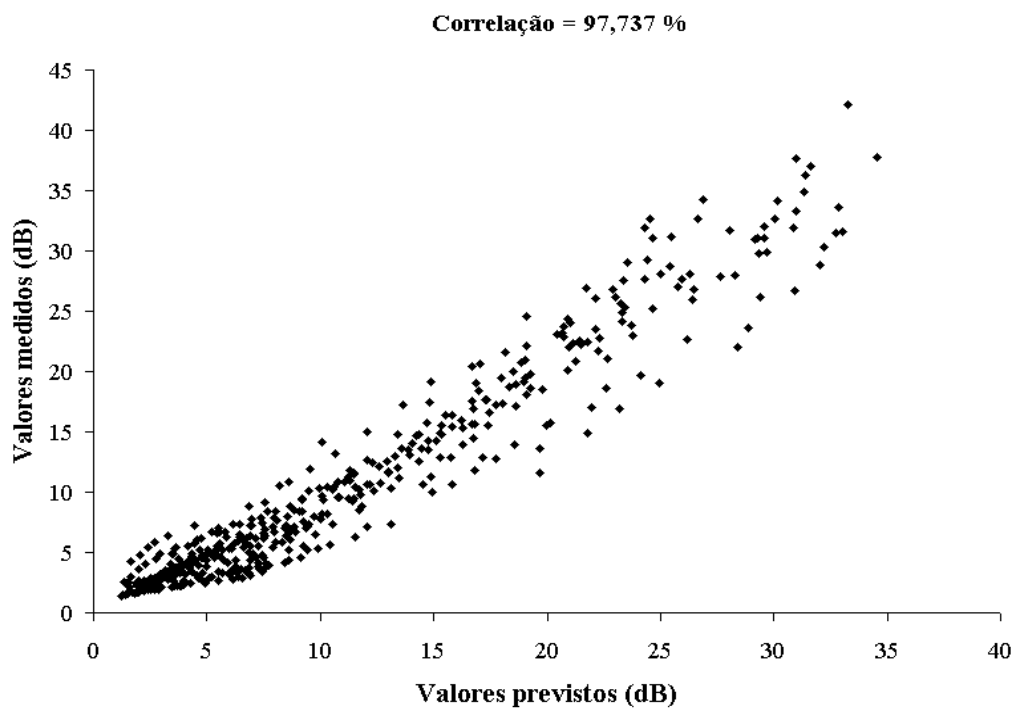


Figura 50 Valores observados *versus* previstos (modelo 1) da atenuação diferencial.

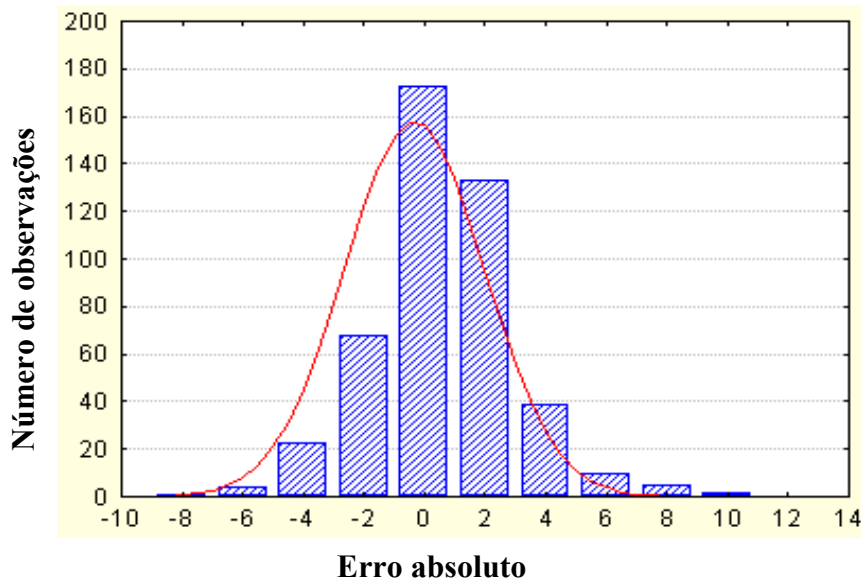


Figura 51 Distribuição dos resíduos para o modelo 1.

4.3.2. Modelo 2 para a Previsão da Atenuação Diferencial por Chuvas

Nesta seção desenvolve-se um segundo modelo (modelo 2) para a previsão da atenuação diferencial por chuvas, utilizando a distribuição de Weibull de dois parâmetros (η, β) para o modelamento. Esse modelo terá a vantagem de não depender das atenuações totais de cada enlace, mas apenas dos parâmetros dos enlaces envolvidos.

Conforme foi discutido no capítulo 2, a distribuição de Weibull tem a principal vantagem de ser uma função de fácil tratamento matemático. O ajuste através da distribuição de Weibull é realizado em duas fases. A primeira fase consiste em ajustar distribuições de Weibull às distribuições de atenuação diferencial medidas para cada par de enlaces, determinando um conjunto de pares de parâmetros (η, β). A segunda fase consiste em obter expressões empíricas para η e β , em função dos parâmetros dos enlaces.

É importante resaltar que em se tratando de apenas uma expressão matemática, a equação resultante do modelo não tem necessariamente que cumprir com as restrições intrínsecas próprias dos parâmetros da distribuição de Weibull.

Para a primeira fase do modelamento tem-se, da expressão (2.35), que a função a ser ajustada é:

$$P = e^{-\left(\frac{A_{\text{dif}}}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow p = 100 e^{-\left(\frac{A_{\text{dif}}}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.9)$$

onde:

P = Probabilidade de que a atenuação diferencial exceda um determinado valor.

p = Percentagem de tempo, que é igual à probabilidade “P”, em percentagem.

É importante ressaltar que, enquanto a expressão (2.35) representa a probabilidade de que a variável aleatoria seja menor que um determinado valor, o que corresponde à função distribuição cumulativa de probabilidades da variável, a expressão (4.9) se refere à probabilidade de que a variável aleatoria exceda um determinado valor, correspondendo às distribuições medidas.

Também é importante ressaltar que as correlações existentes entre cada distribuição cumulativa medida da atenuação diferencial por chuvas e a sua distribuição cumulativa de Weibull correspondente, variaram desde 98,4% (pior caso) e 99,98 % (melhor caso), correpondentes aos pares de enlaces PGR-BNDES e BNDES-PGR, conforme mostrado nas Figs.52 e 53.

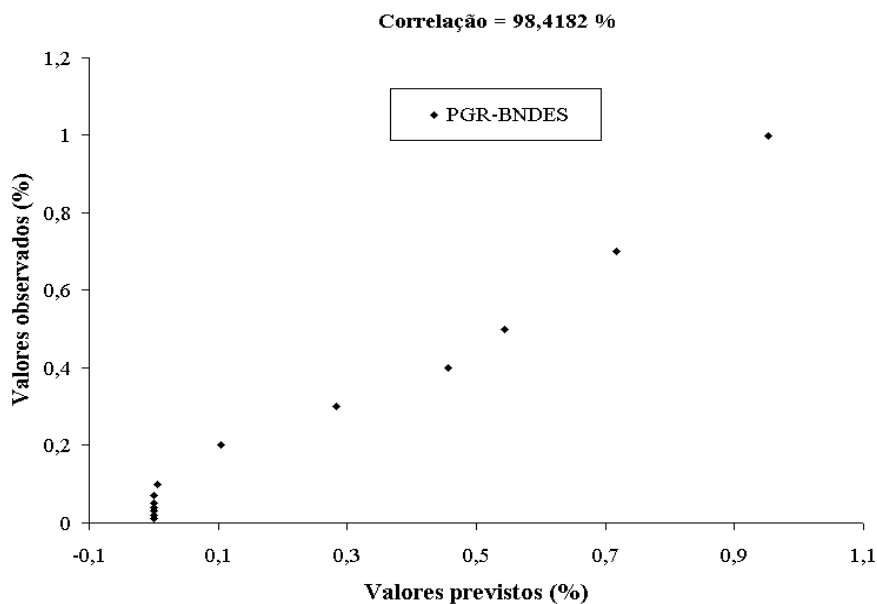


Figura 52 Percentagens de tempo observadas vs previstas (enlace PGR-BNDES).

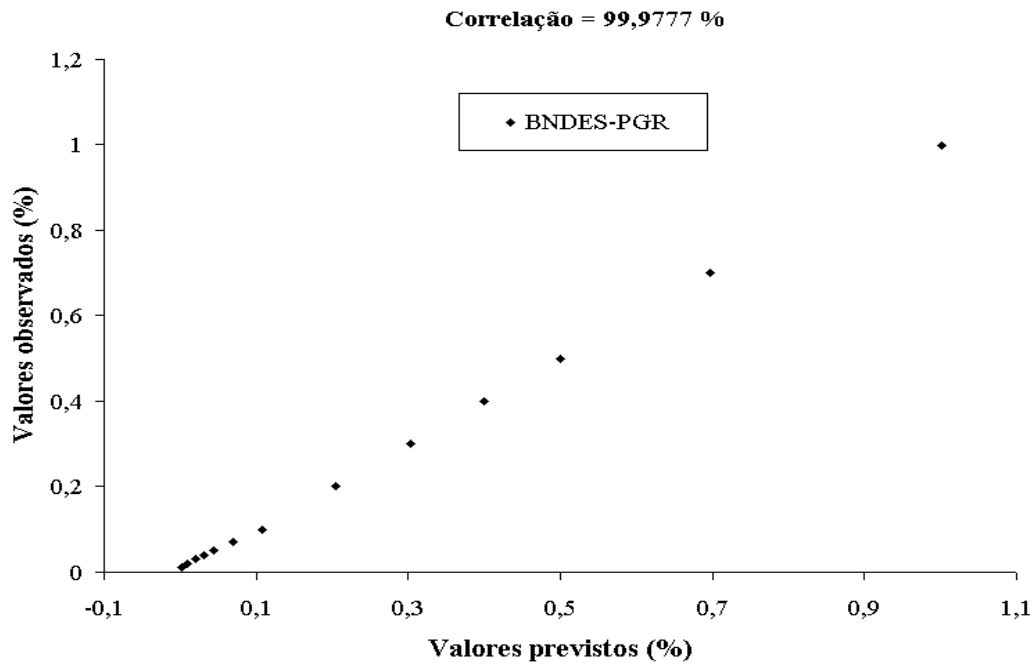


Figura 53 Percentagens de tempo observadas vs previstas (enlace BNDES-PGR).

Para a segunda fase do desenvolvimento do modelo 2, foram analisados os gráficos de η e β em função da frequência de operação dos enlaces, seus comprimentos e o ângulo (em radianos) entre eles. As Figs. 54 a 57, ilustram os gráficos de espalhamento de η em função dos parâmetros citados.

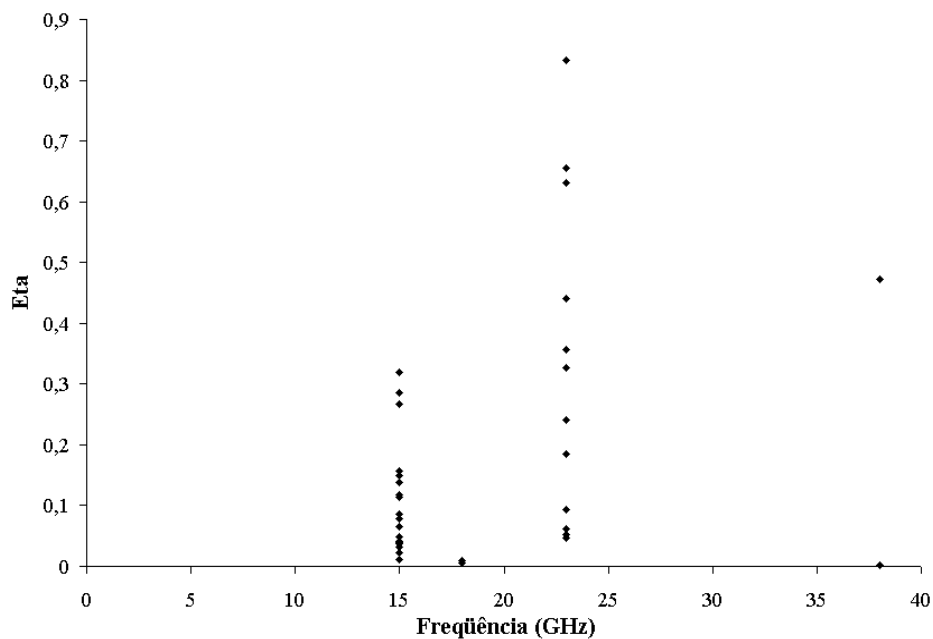


Figura 54 Parâmetro η vs. frequência de operação de cada par de enlace.

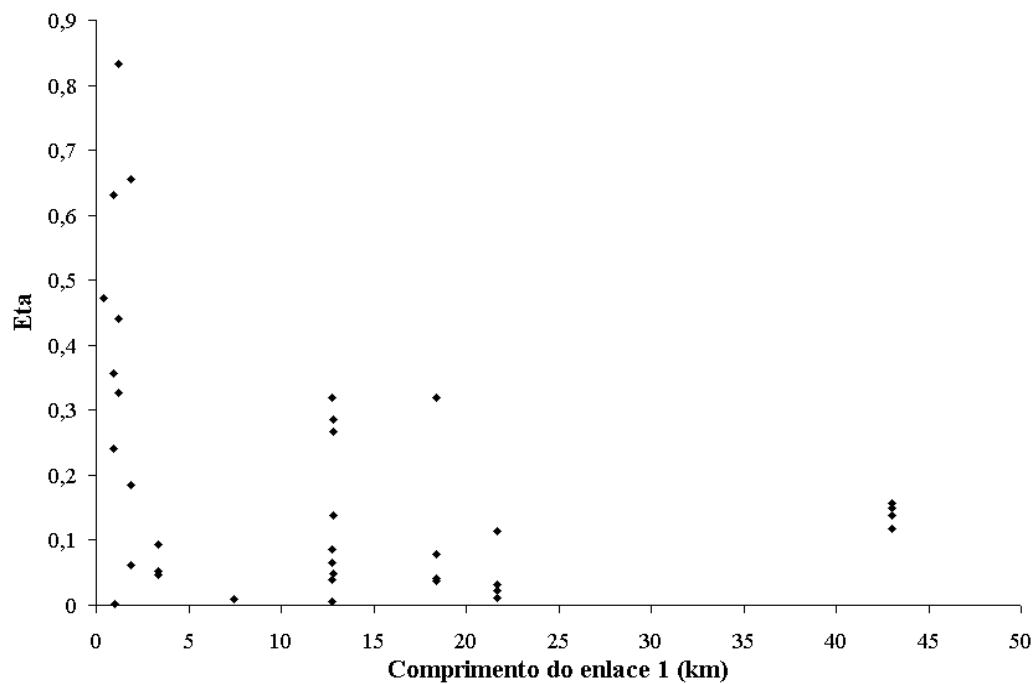


Figura 55 Parâmetro η vs. comprimento do enlace 1.

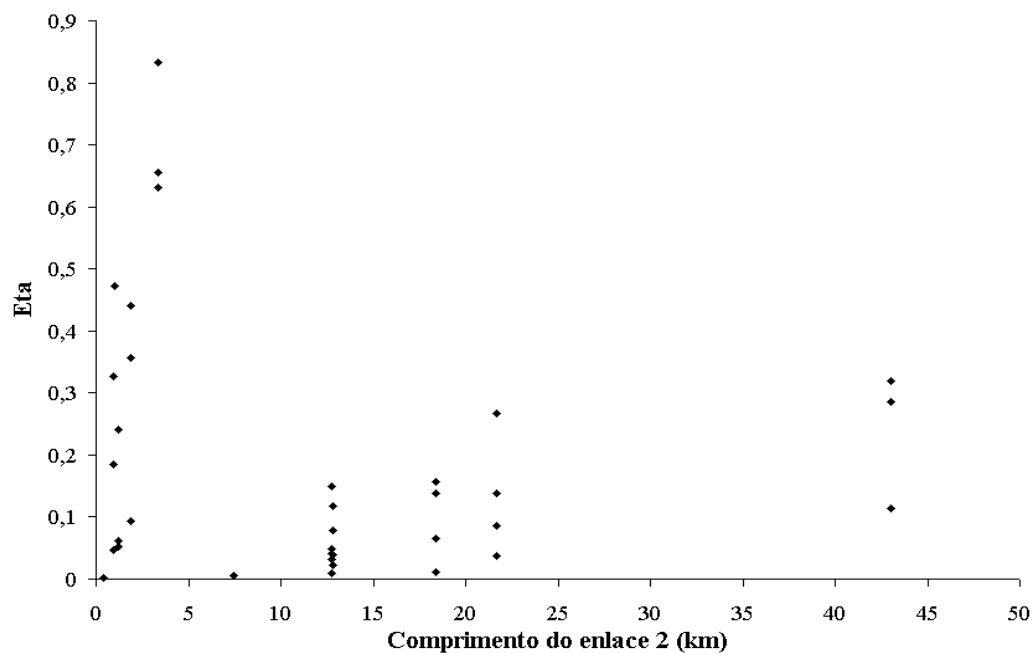


Figura 56 Parâmetro η vs. comprimento do enlace 2.

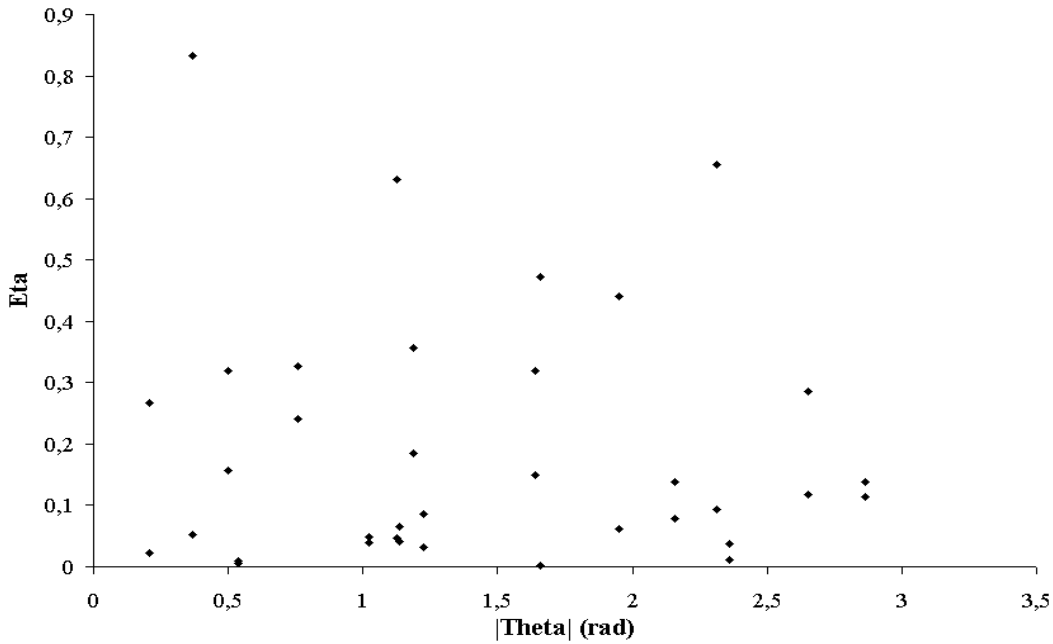


Figura 57 Parâmetro η vs. o ângulo entre os percursos dos enlaces.

Nas Figs. 55 a 57 observa-se que o parâmetro η apresenta uma maior correlação com os comprimentos dos enlaces que formam cada par, mas a forma da dependência não é tão clara como no caso do desenvolvimento do modelo 1. Diversas funções de ajuste foram testadas. Na prática verificou-se a necessidade de incluir também a influência da frequência e do ângulo entre os enlaces, embora a correlação com estes parâmetros quando considerados isoladamente não seja elevada, como pode ser verificado nas Figs. 54 e 57.

A melhor expressão obtida para η é dada por:

$$\eta = \left(c_1 d_1^{c_2} + c_3 d_2^{c_4} \right) \left(c_5 + c_6 f^{c_7} \right) \left(c_8 + c_9 |\theta|^{c_{10}} \right) \quad (4.10)$$

Os valores das constantes c_1 a c_{10} estão resumidos na Tabela 27.

Tabela 27 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro η .

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
2,299	-1,900	0,0056	1,298	-7,341	7,494	-0,0055	7,640	0,706	-1,610

Os valores observados de η versus os valores previstos através da expressão (4.10) com os parâmetros da Tabela 27, é mostrada na Fig. 58, que corresponde a uma boa correlação de 90,73 %. A distribuição dos resíduos para η , é ilustrada na Fig. 59.

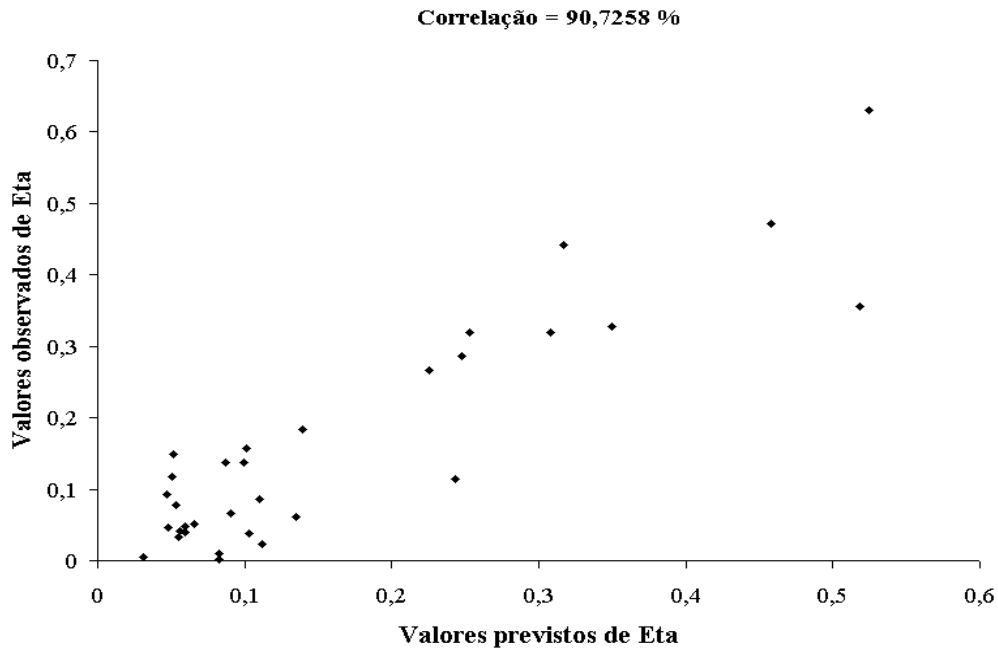


Figura 58 Valores observados versus valores previstos, do parâmetro η .

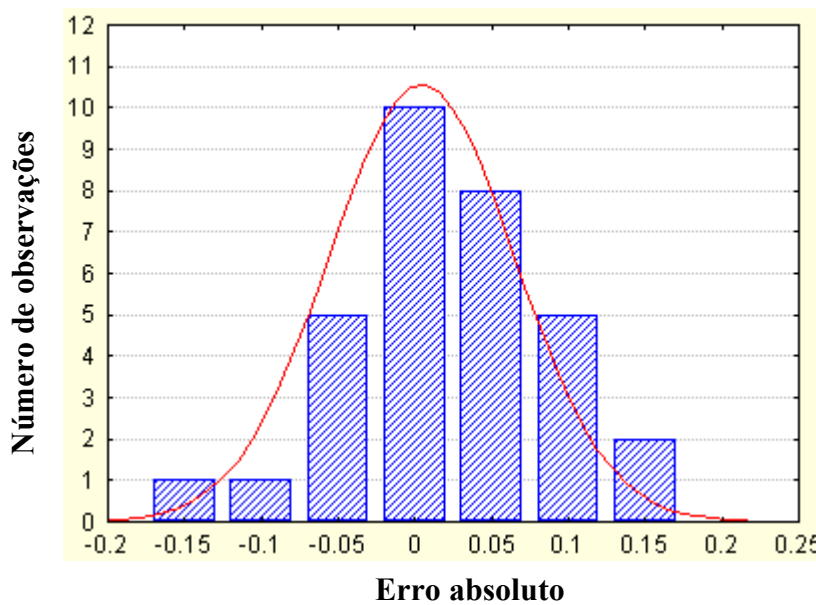


Figura 59 Distribuição dos resíduos para η .

É necessário ressaltar que foram excluídos do ajuste 4 pares de enlaces, que apresentaram um comportamento bastante diferente daquele apresentado pelo resto de pares de enlaces.

Por sua vez, as curvas de espalhamento do parâmetro β em função da frequência, os comprimentos dos enlaces e o ângulo entre eles são mostradas nas Figs. 60 a 63.

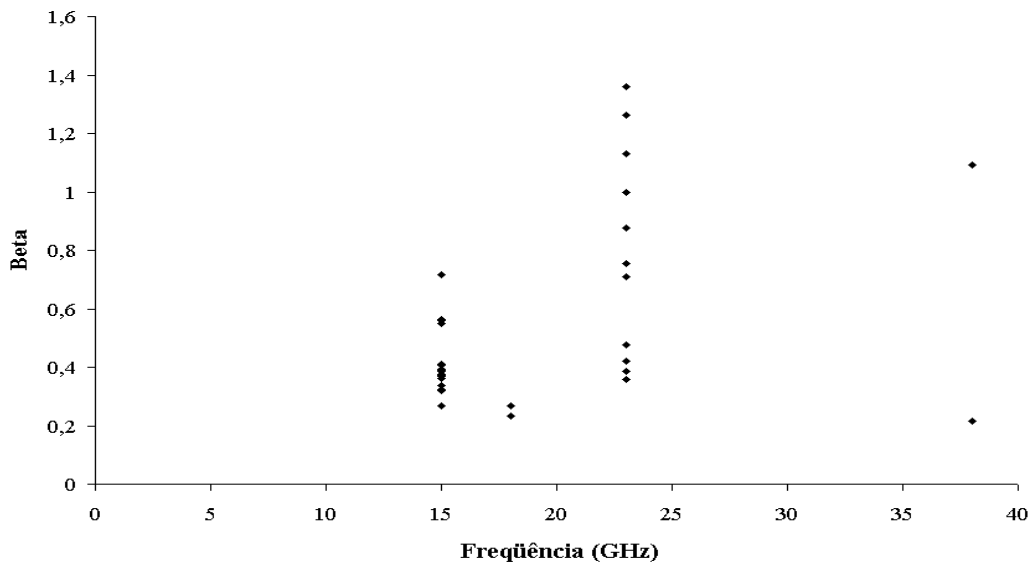


Figura 60 Parâmetro β vs. frequência de operação de cada par de enlace.

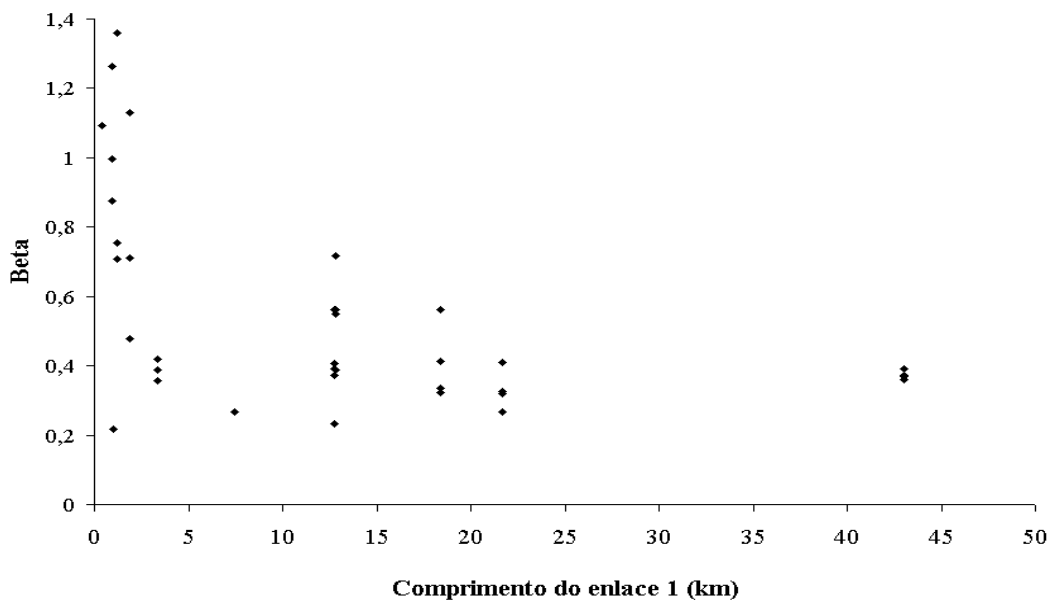


Figura 61 Parâmetro β vs. comprimento do enlace 1.

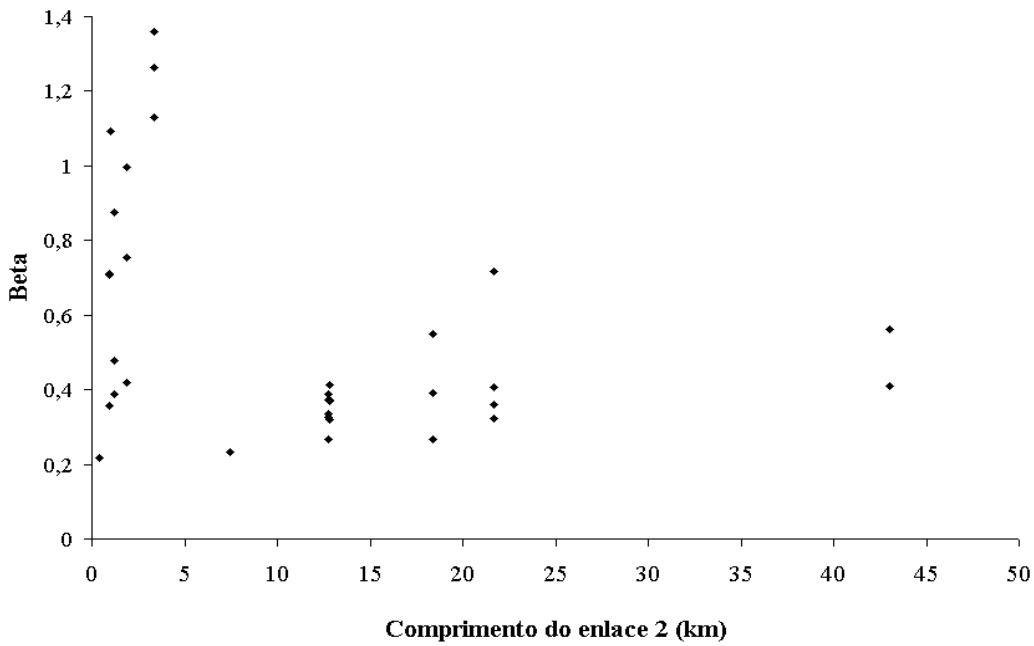


Figura 62 Parâmetro β vs. comprimento do enlace 2.

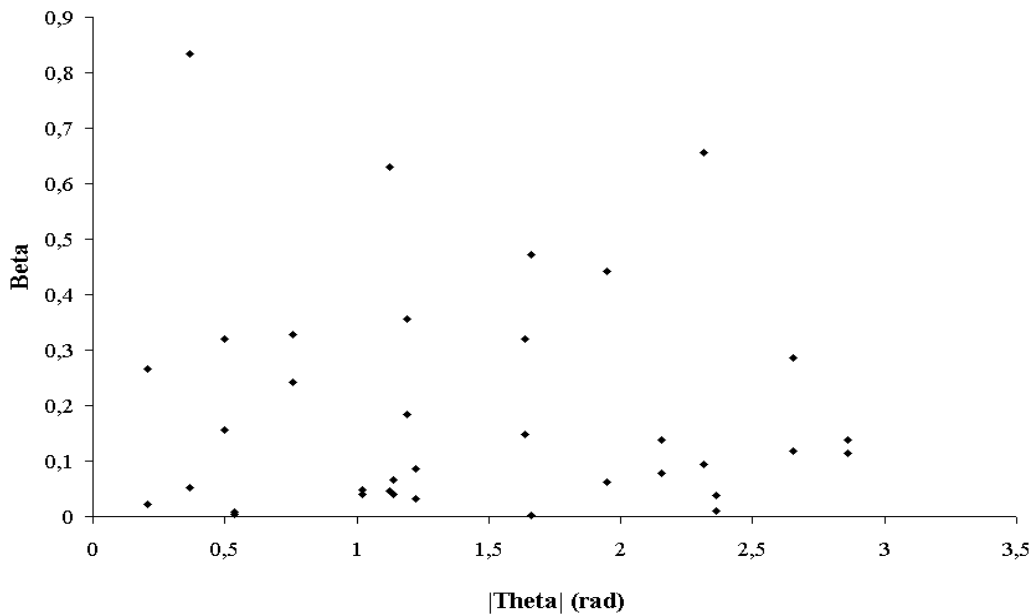


Figura 63 Parâmetro β vs. o ângulo entre os percursos dos enlaces.

Das Figs. 60 a 63, pode-se observar que o parâmetro β também, apresenta a maior correlação com os comprimentos dos enlaces que conformam cada par de enlace.

Neste caso, a melhor função que conseguiu-se ajustar para o parâmetro β tem a mesma forma genérica da expressão (4.10), ou seja:

$$\beta = \left(e_1 d_1^{e_2} + e_3 d_2^{e_4} \right) \left(e_5 + e_6 f^{e_7} \right) \left(e_8 + e_9 |\theta|^{e_{10}} \right) \quad (4.11)$$

A Tabela 28 apresenta os valores obtidos para as constantes e_1 a e_{10} .

Tabela 28 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro β .

e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}
14,79	-1,141	1,380	0,3460	-2,562	3,030	-0,0421	-15,99	16,68	-0,00407

Na Fig. 64, pode-se observar os valores observados de β *versus* os valores previstos utilizando a expressão (4.11), onde uma boa correlação é mostrada. Na Fig. 65, observa-se a distribuição dos resíduos para β .

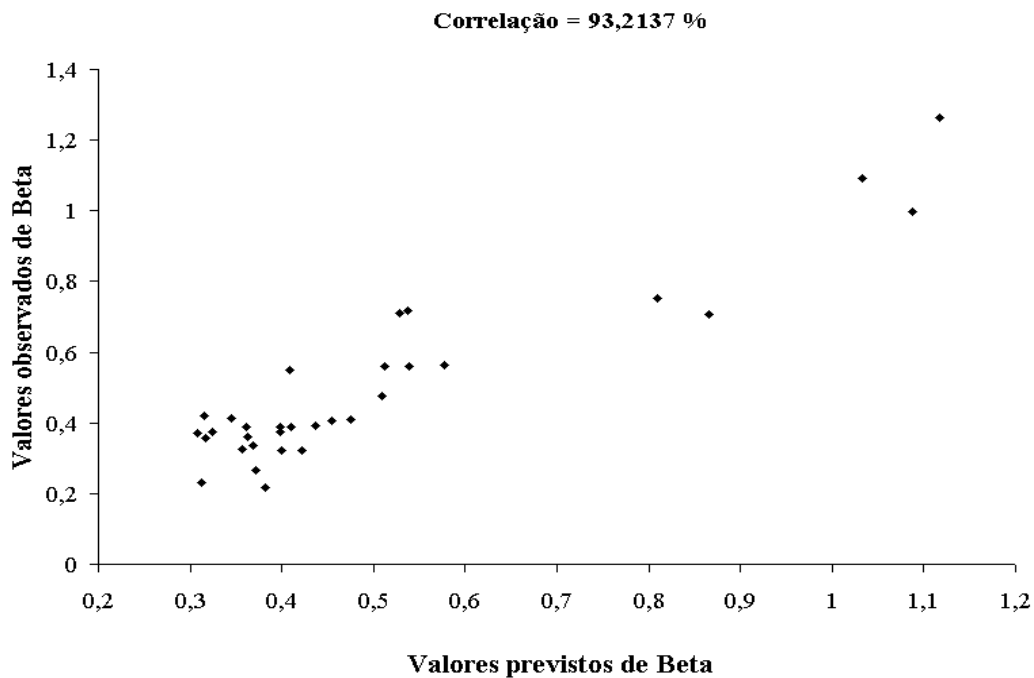


Figura 64 Valores observados vs. valores previstos para β .

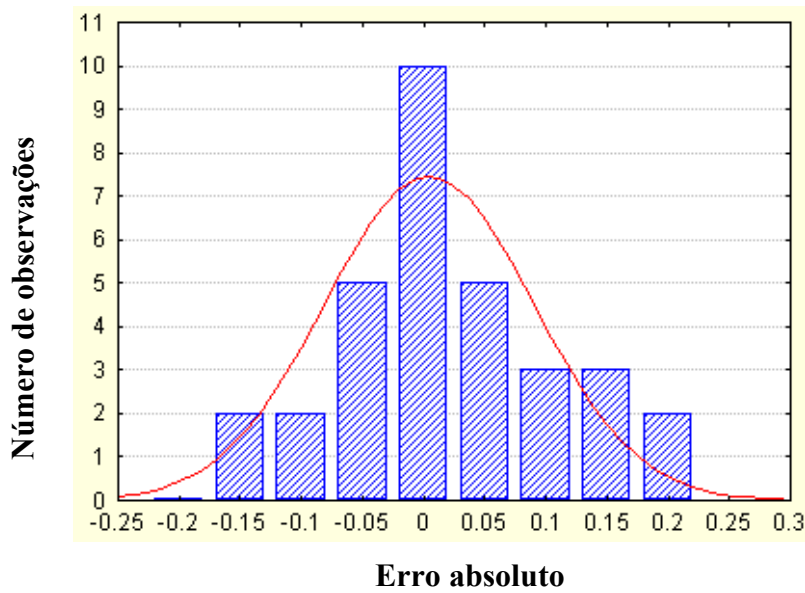


Figura 65 Distribuição dos resíduos para β .

Da expressão (4.9), tem-se que a atenuação diferencial por chuvas, de acordo com o modelo 2 aqui desenvolvido, é dada por:

$$A_{\text{dif}} = \eta \left[-\text{Ln} \left(\frac{p}{100} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.12)$$

onde:

p = Percentagem de tempo, entre 0,01 e 1%.

η = Parâmetro de escala da distribuição de Weibull dado pela expressão (4.10).

β = Parâmetro de envelope da distribuição de Weibull dado pela expressão (4.11).

A Fig. 66 mostra a correlação entre os valores observados da atenuação diferencial e os previstos utilizando a expressão (4.12).

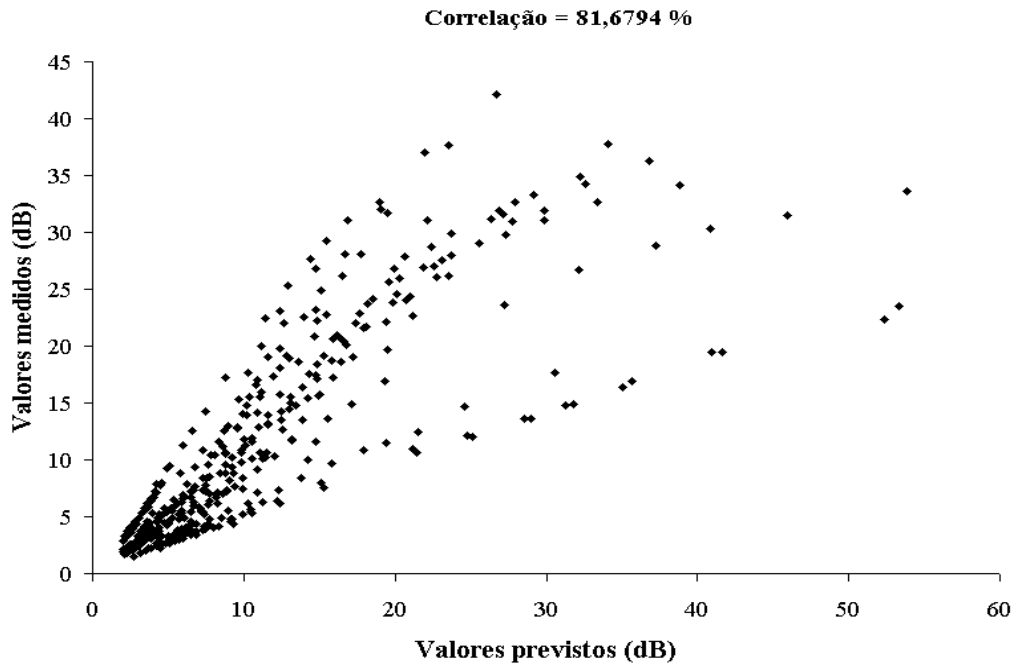


Figura 66 Valores observados vs. previstos (modelo 2) da atenuação diferencial.

Na Fig. 66 observa-se uma correlação, entre os valores medidos da atenuação diferencial por chuvas e os previstos pelo modelo 2, é bem mais baixa que no caso dos resultados obtidos com o modelo 1. Isso deve-se ao fato do desenvolvimento do modelo 2 ter passado por duas fases de ajuste e envolver um menor número de variáveis, excluindo-se as atenuações totais dos enlaces envolvidos. Estas atenuações, particularmente a atenuação A_1 , são as que oferecem a melhor correlação com a atenuação diferencial por chuvas A_{12} , como foi visto na seção 4.3.1. Por outro lado, a principal vantagem do modelo 2 é a não utilização das atenuações totais que, na prática dificilmente estarão disponíveis a partir de medidas e deverão ser estimadas utilizando um método de previsão, o que contribuirá para um maior erro para o resultado final.

4.3.3. Comparação entre os Modelos 1 e 2

A Tabela 29 mostra resultados dos testes, utilizando o erro relativo, dos modelos 1 e 2 desenvolvidos nas seções 4.3.1 e 4.3.2. Esses resultados podem ser visualizados nas Figs. 67, 68 e 69.

Tabela 29 Média, desvio padrão e valor RMS do erro relativo para os modelos 1 e 2.

p (%)	Média dos erros (%)		Desvio dos erros (%)		Valor RMS dos erros (%)	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
0,01	11,86	-5,59	36,81	47,36	38,68	47,69
0,02	13,88	-7,82	37,08	41,08	39,59	41,81
0,03	18,73	-5,91	38,58	41,09	42,89	41,51
0,04	21,00	-4,03	37,87	40,75	43,30	40,95
0,05	22,87	-2,23	36,67	40,34	43,22	40,40
0,07	24,82	1,06	35,23	40,17	43,10	40,18
0,1	25,78	4,97	35,12	40,39	43,56	40,70
0,2	18,10	12,18	29,05	41,52	34,23	43,27
0,3	11,92	16,04	24,93	41,63	27,63	44,61
0,4	7,51	18,26	24,12	40,78	25,26	44,68
0,5	3,82	18,56	22,94	40,05	23,26	44,14
0,7	-0,39	18,92	22,70	39,00	22,70	43,35
1	-5,38	16,90	23,59	37,77	24,20	41,38

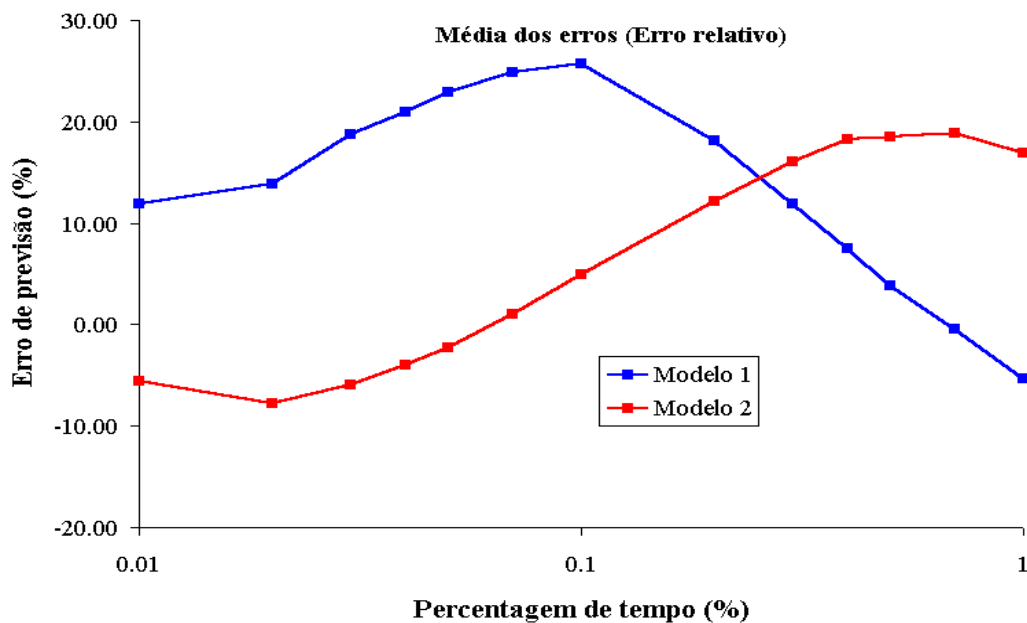


Figura 67 Média dos erros (Erro relativo), para os Modelos 1 e 2.

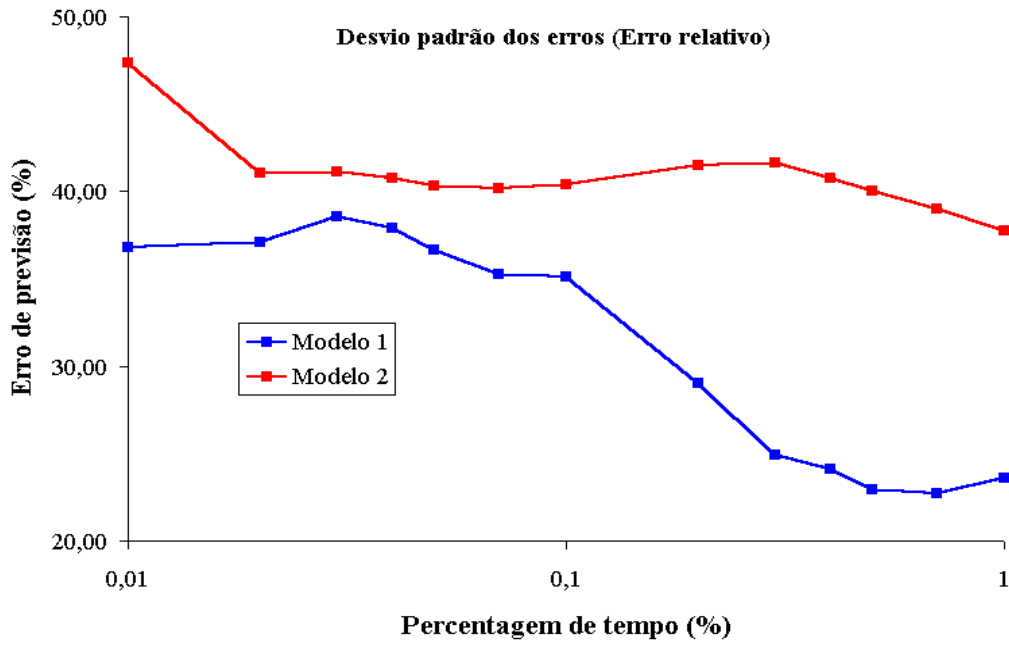


Figura 68 Desvio padrão dos erros (Erro relativo), para os modelos 1 e 2.

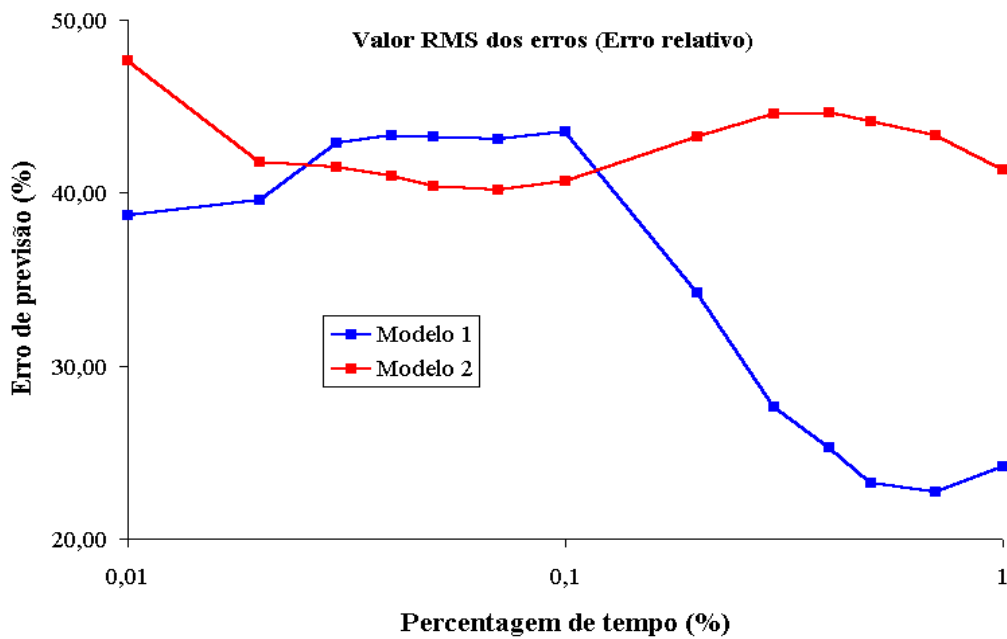


Figura 69 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para os modelos 1 e 2.

Na Fig. 67 pode-se observar que, para percentagens de tempo abaixo de 0,5% o modelo 1 superestima a atenuação diferencial por até 26%. Para percentagens de tempo acima de 0,7 %, o modelo subestima ligeiramente as atenuações. Já o modelo 2 subestima em até 8% as atenuações diferenciais para percentagens de tempo até 0,05%. Acima desta percentagem apresenta uma superestimação máxima de 19%. Pode-se dizer, portanto, que em termos da média dos erros ambos os modelos apresentam desempenhos similares na previsão da atenuação diferencial por chuvas.

Quanto ao desvio padrão os erros, observa-se que o modelo 1 apresenta melhor desempenho do que o modelo 2. Para o primeiro modelo o desvio padrão máximo é da ordem de 40%, contra um máximo de cerca de 50% para o segundo.

O valor rms dos erros mostra um desempenho equivalente dos modelos para percentagens do tempo até 0,1% e um melhor desempenho do modelo 1 acima desta percentagem de tempo. Contudo, ainda que o desempenho global do modelo 2 seja inferior ao do modelo 1, deve-se lembrar que o modelo 2 apresenta como principal vantagem não depender das atenuações totais dos enlaces envolvidos. Assim, o desempenho do modelo 1 diminuirá caso não se disponha das medidas da atenuação por chuvas totais no local onde esteja sendo aplicado, pois será necessária utilização dos modelos de previsão desta atenuação, o que introduzirá um erro adicional na previsão da atenuação diferencial, como já mencionado.

Por outro lado, nas Fig.70 e 71, se compara a distribuição cumulativa medida da atenuação diferencial por chuvas com as previstas pelos modelos 1 e 2, para os pares de enlaces Barueri-CENESP15 y PGR-INCRA, respectivamente.

No caso do par Barueri-CENESP15 (Fig. 70) se observa, para baixos percentagens de tempo, um marcado melhor ajuste do modelo 1 às medidas, enquanto que para o par PGR-INCRA (Fig 71), em geral, o ajuste es similar para ambos os modelos.

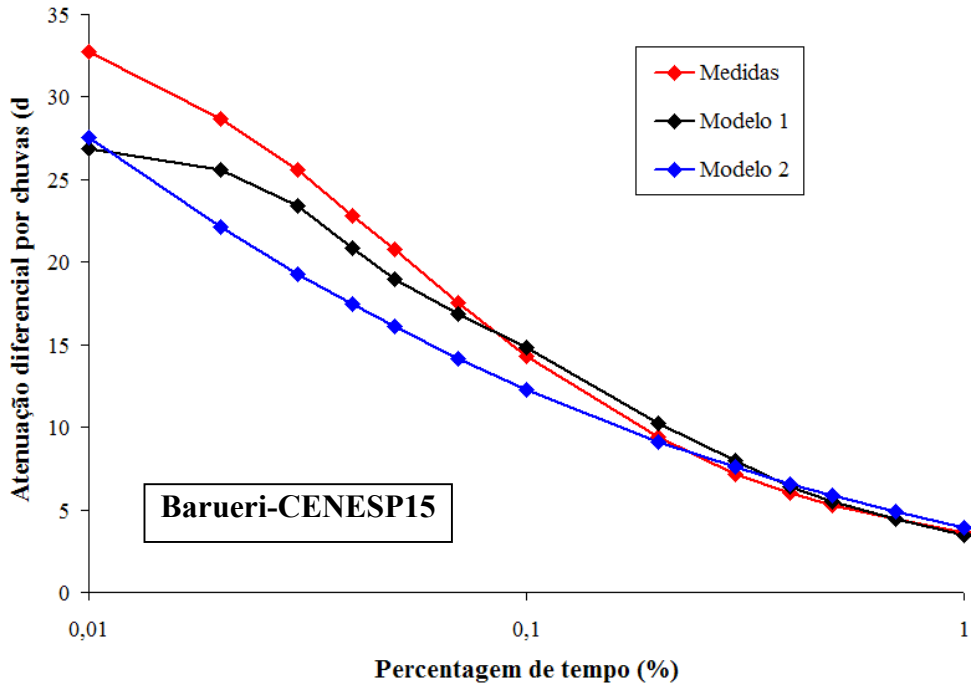


Figura 70 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação diferencial por chuva, para o par Barueri-CENESP15.

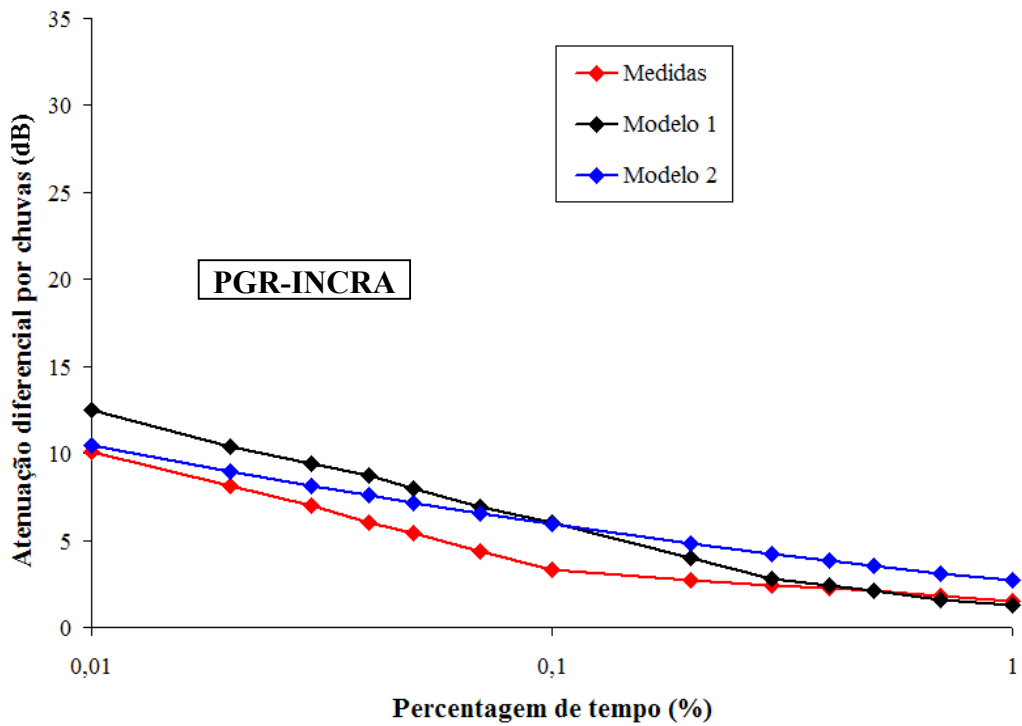


Figura 71 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação diferencial por chuva, para o par PGR-INCRA.