

5

MODELO PARA PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ATENUAÇÃO

5.1.

Desenvolvimento dos modelo de predição

Para desenvolver modelos de predição da distribuição de probabilidades da taxa de variação da atenuação por chuvas, tanto para enlaces terrestres como para enlaces satélite, estimadores das densidades de probabilidades foram aplicados aos histogramas obtidos dos dados experimentais. As possíveis aplicações deste modelo estão descritas no apêndice B, que são técnicas de compensação de atenuação por chuvas.

Utilizando as densidades empíricas, testes de hipótese foram realizados a partir dos resultados preliminares advindos das estatísticas descritivas dos dados. Pelas estatísticas descritivas, pode-se observar o elevado valor da curtose, principalmente para atenuações abaixo de 15 dB. Uma curtose elevada significa um desvio da densidade gaussiana no sentido de termos uma maior concentração de dados muito perto da média, o que gera um formato de densidade com um pico mais pronunciado do que se esperaria. A figura 5.1 apresenta um resultado da análise dos estimadores da densidade de probabilidade, evidenciando a alta curtose para as baixas atenuações (até 15 dB).

Foi verificado, tanto em enlaces satélite como terrestres, que a curtose tende a diminuir após o limiar de 15 dB, tornando o formato das densidades mais gaussiano. Isto pode ser visto na figura 5.2 representativa de um enlace terrestre em Brasília.

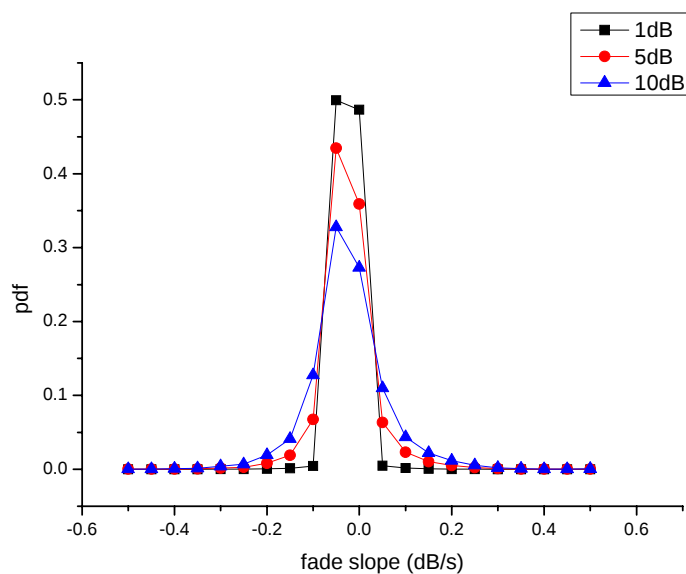


Figura 5.1 – Densidades de probabilidade para baixas atenuações evidenciando o alto grau de curtose dos estimadores.

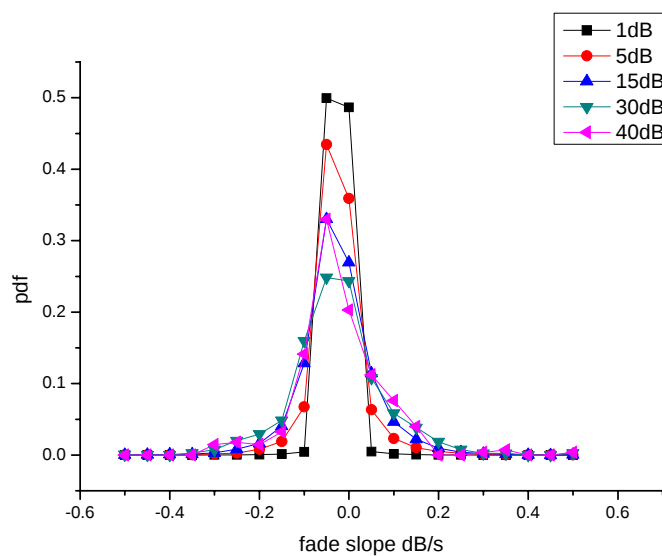


Figura 5.2 – Densidades de probabilidade obtidas em enlace terrestre. Nota-se a diminuição da curtose com o nível de atenuação.

De fato, observando-se apenas densidades acima de 15 dB, nota-se na figura 5.3 esta tendência marcante para a gaussiana:

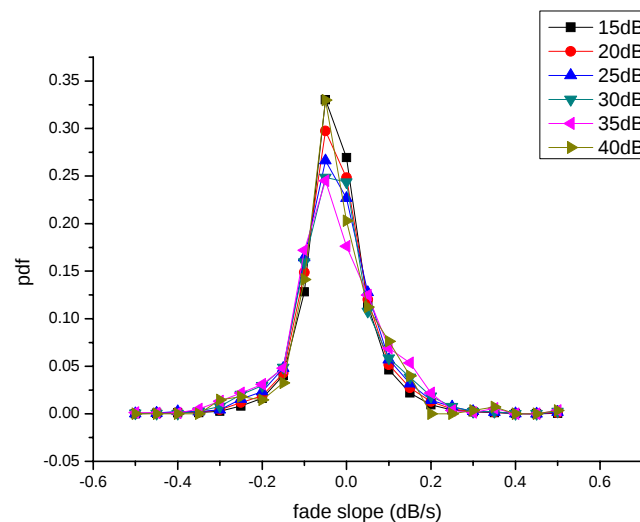


Figura 5.3 – Densidades de probabilidade obtida em enlace terrestre.

Como a região de interesse, em atenuação, se situa na faixa das altas atenuações, foi decidido que as densidades seriam ajustadas por uma densidade gaussiana. Um exemplo do bom ajuste gaussiano às densidades pode ser visto nas figuras 5.4 e 5.5:

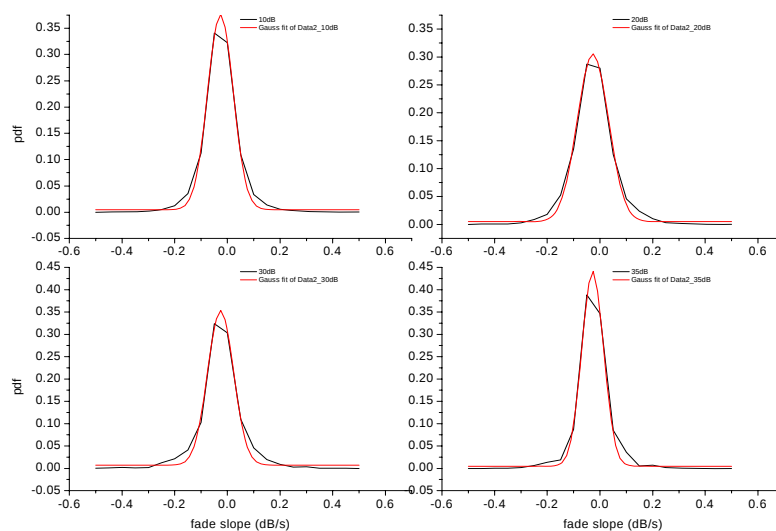


Figura 5.4 – Modelo gaussiano aplicado a densidades de probabilidade obtida em enlace terrestre.

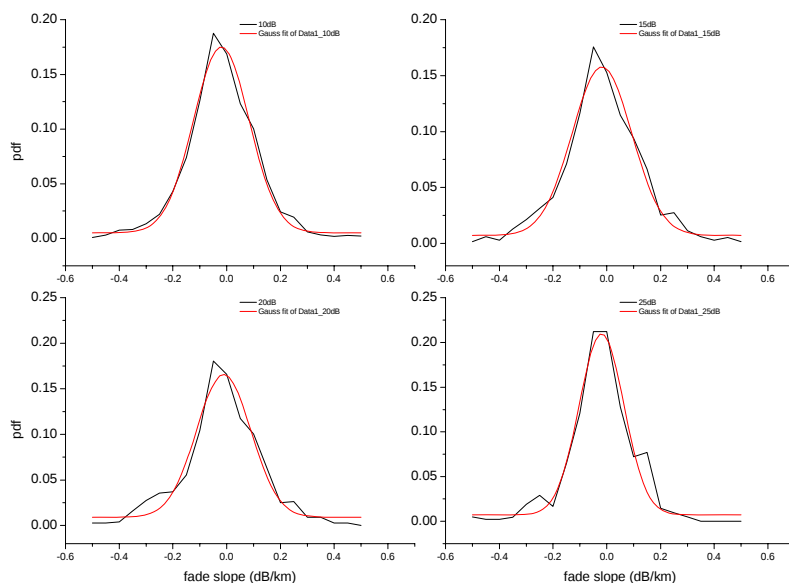


Figura 5.5 – Modelo gaussiano aplicado a densidades de probabilidade obtida em enlace satélite.

O modelo gaussiano usado no ajuste é o da expressão (3.2). Este modelo gaussiano foi aplicado a todos os resultados obtidos acima de 15 dB, tanto para enlaces terrestres como para enlaces satélite, com excelente ajuste. Ao final do processo, formou-se uma base de dados de valores estimados de médias e desvios padrão para estes enlaces.

Com esta base de dados, foi possível construir um modelo de previsão para os valores da média e desvio padrão utilizando variáveis de enlace. Para o modelo terrestre, foram escolhidas frequência, distância e atenuação e, para o modelo satélite latitude, longitude, altitude da estação e atenuação. Estas escolhas foram baseadas no critério de maior variabilidade dos parâmetros. Como havia uma diferença muito grande entre a ordem de grandeza das variáveis independentes e das variáveis dependentes, foi realizada uma transformação de redução de variância nas independentes de modo a facilitar o processo de regressão. A redução de variância é um procedimento comum e, neste caso, consistiu em usar o logaritmo das variáveis não angulares e o cosseno das variáveis angulares. É importante ressaltar que, em um modelamento global, seria necessário repensar o uso do cosseno, dado que, para a longitude, existirão pontos na superfície do

planeta com valor nulo. Como este modelo é válido para dados brasileiros, o uso do cosseno é permitido.

Uma análise de correlação entre as variáveis independentes mostrou a consistência da escolha. As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados da análise de correlação para os enlaces terrestre e satélite. Nestas tabelas: (A) é o valor da atenuação excedida em dB; (f) é a frequência em GHz; (d) é a distância do enlace terrestre em km; (alt) é a altitude do enlace via satélite em km; (lat) é a latitude em grau decimal do enlace via satélite e (lon) é a longitude em grau decimal no padrão UIT (União Internacional de Telecomunicações) do enlace via satélite.

Tabela 5.1 – Matriz de correlações para os enlaces terrestres.

	log(A)	log(f)	log(d)
log(A)	1,00	-0,03	0,07
log(f)	-0,03	1,00	-0,88
log(d)	0,07	-0,88	1,00

Tabela 5.2 – Matriz de correlações para os enlaces satélite.

	log(alt)	cos(lat)	cos(lon)	log(A)
log(alt)	1,00	-0,67	-0,39	-0,01
cos(lat)	-0,67	1,00	0,13	0,05
cos(lon)	-0,39	0,13	1,00	0,12
log(A)	-0,01	0,05	0,12	1,00

Verifica-se das tabelas que, apesar dos pares log(f) e log(d) e log(alt) e cos(lat) apresentarem correlação significativa, não se pode retirar uma variável de cada par dos modelos sob pena de reduzir muito o número de parâmetros, o que aumenta o potencial de tendenciosidade estatística dos valores obtidos.

O modelo que apresentou melhor desempenho de ajuste entre média e desvio padrão e as variáveis independentes foi um modelo multilinear (“piecewise linear”), que daqui para frente denominaremos de modelo PL. Este modelo é representado por duas seções retas conectadas em um ponto, denominado ponto de quebra. O modelo é descrito pelas seguintes equações:

$$f(X_1, \dots, X_n) = \begin{cases} B_{01} + B_{11}X_1 + B_{21}X_2 + \dots + B_{n1}X_n & 1^a \text{ parte} \\ B_{02} + B_{12}X_1 + B_{22}X_2 + \dots + B_{n2}X_n & 2^a \text{ parte} \end{cases} \quad (5.1)$$

Para o modelo terrestre, tem-se:

$$média, desvpad = \begin{cases} B_{01} + B_{11} \cdot \log(A) + B_{21} \cdot \log(f) + B_{31} \cdot \log(d) \\ B_{02} + B_{12} \cdot \log(A) + B_{22} \cdot \log(f) + B_{32} \cdot \log(d) \end{cases} \quad (5.2)$$

onde as variáveis dependentes podem ser médias ou desvios padrão em dB/s.

Para o modelo satélite, tem-se:

$$média, desvpad = \begin{cases} B_{01} + B_{11} \cdot \log(alt) + B_{21} \cdot \cos(lat) + B_{31} \cdot \cos(lon) + B_{41} \cdot \log(A) \\ B_{02} + B_{12} \cdot \log(alt) + B_{22} \cdot \cos(lat) + B_{32} \cdot \cos(lon) + B_{42} \cdot \log(A) \end{cases} \quad (5.3)$$

onde as variáveis dependentes podem ser médias ou desvios padrão em dB/s.

Esquemáticamente, o modelo é representado na figura 5.6.

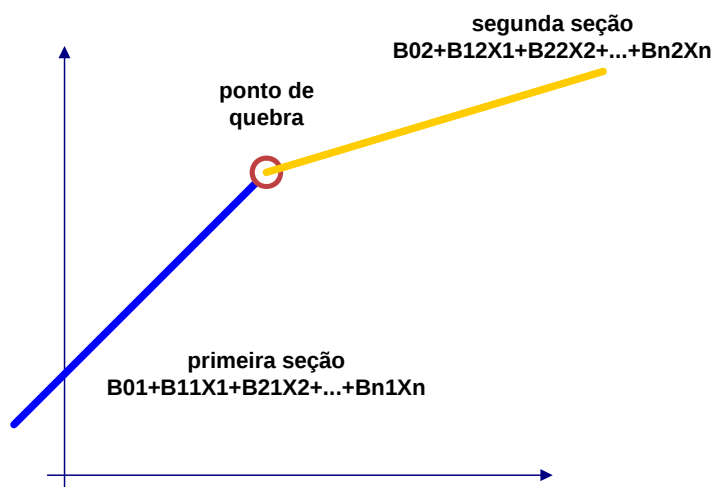


Figura 5.6 – Especificidades do modelo PL.

Os resultados obtidos foram de boa qualidade, com o menor coeficiente de correlação obtido igual a 0.81. As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os coeficientes da regressão para os enlaces terrestre e satélite.

Tabela 5.3 – Resultados do modelo PL para enlaces terrestres.

Terrestre	Primeira Parte				
	B_{01}	B_{11}	B_{21}	B_{31}	
Média (dB/s)	-0,0264	-0,007222	0,002711	0,001906	
Desv. Pad. (dB/s)	0,0774	-0,017976	-0,010250	0,004247	
	Segunda Parte				Pt. Quebra (dB/s)
	B_{02}	B_{12}	B_{22}	B_{32}	
Média (dB/s)	0,002156	0,010214	-0,031652	-0,003856	-0,028795
Desv. Pad. (dB/s)	-0,172679	0,060209	0,109417	0,023900	0,057571

Tabela 5.4 – Resultados do modelo PL para enlaces satélite.

Satélite	Primeira Parte					
	B_{01}	B_{11}	B_{21}	B_{31}	B_{41}	
Média (dB/s)	-0,0404	0,00168	0,034835	-0,026010	-0,003584	
Desv. Pad. (dB/s)	-0,121	0,0127	0,203	-0,027366	-0,005970	
	Segunda Parte					Pt. Quebra (dB/s)
	B^{+}_{02}	B_{12}	B_{22}	B_{32}	B_{42}	
Média (dB/s)	-0,060050	0,005327	-0,002930	-0,052890	0,059663	-0,017706
Desv. Pad. (dB/s)	0,013660	0,010175	-0,020648	-0,020878	0,087544	0,091467

5.1.1.

Avaliação do modelo de predição

Os gráficos de valores observados versus previstos pelo modelo são apresentados nas figuras 5.7 a 5.10.

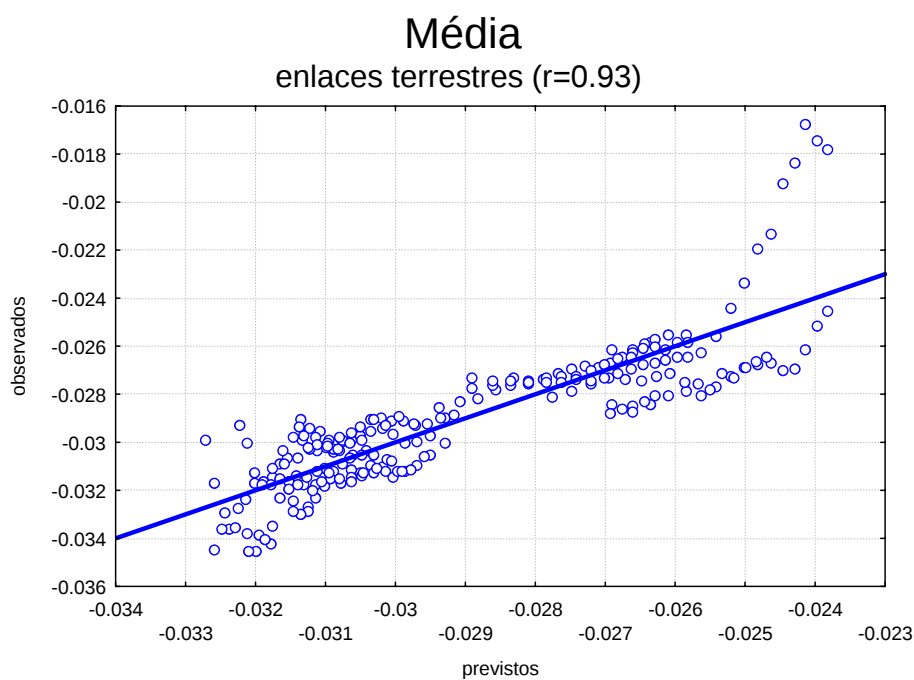


Figura 5.7 – Resultados previstos versus valores observados para média em enlaces terrestres.

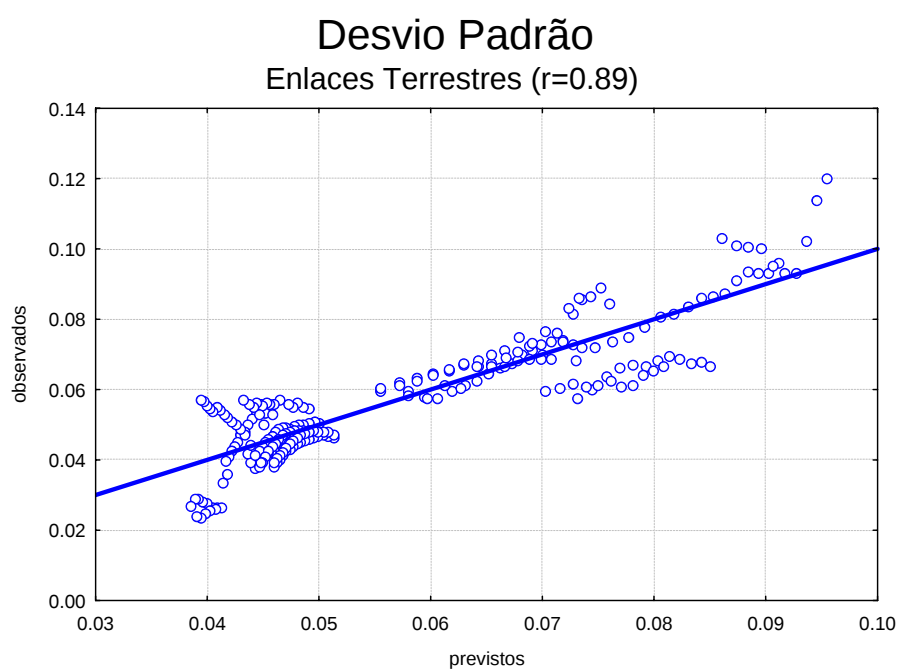


Figura 5.8 – Resultados previstos versus valores observados para desvio padrão em enlaces terrestres.

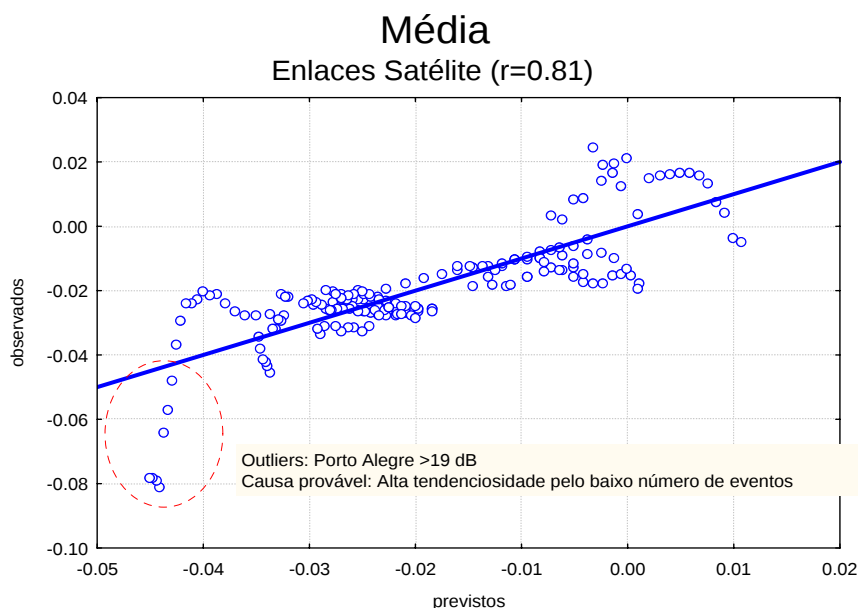


Figura 5.9 – Resultados previstos versus valores observados para média em enlaces satélite.

A influência de pontos ditos fora da curva (“outliers”) é evidente na figura 5.9. O baixo número de pontos nas curvas de atenuação em Porto Alegre para valores de atenuação superiores a 19 dB causou valores previstos que desviam muito da ideal curva observado igual previsto. A retirada destes pontos da análise significaria a virtual retirada do enlace de Porto Alegre da análise o que reduziria bastante o espaço de amostras disponível.

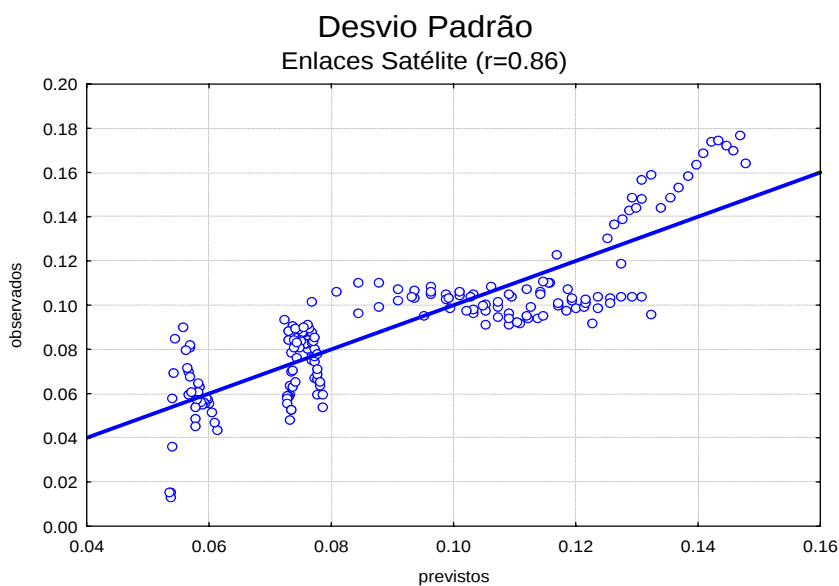


Figura 5.10 – Resultados previstos versus valores observados para desvio padrão em enlaces satélite.

Como exemplo da boa qualidade do modelo, as figuras 5.11 e 5.12 apresentam as densidades previstas e empiricamente observadas. No apêndice D tem mais exemplos.

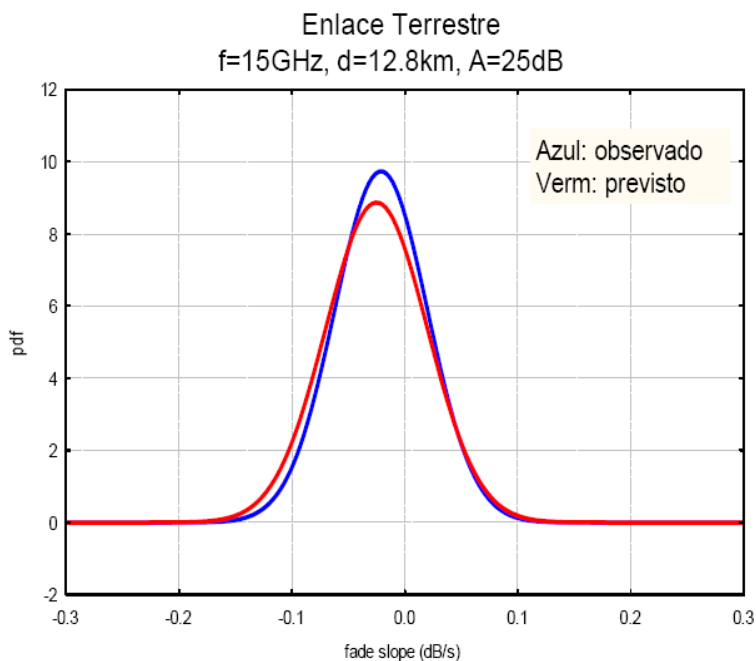


Figura 5.11 – Densidade empiricamente observada e obtida via modelo.

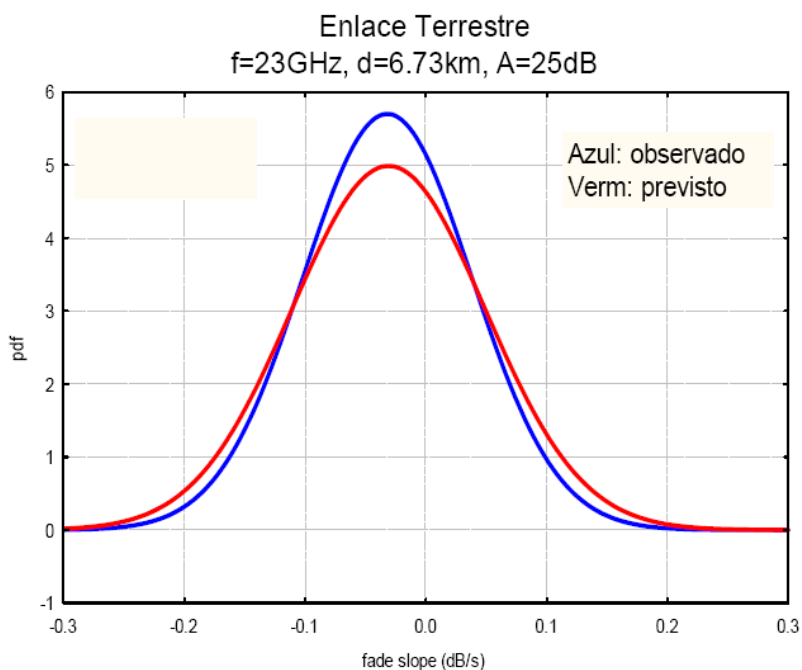


Figura 5.12 – Densidade empiricamente observada e obtida via modelo.

Como pode ser verificado, a região de maior erro é aquela em torno da média. O erro, no entanto, não passa de 10% em nenhuma situação.