

8

Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos em campo para cada conjunto de amostras, nas métricas e parâmetros já citados. Os dados coletados podem ser visualizados como base de dados no Apêndice III.

O caso de árvores isoladas será analisado à parte, no fim do capítulo.

8.1

Dependência da perda com a distância

Os valores da perda no percurso foram calculados com o auxílio da equação 8.1.

$$L_p = EIRP + G_r - P_{cap} - L_r \quad (8.1)$$

G_r é o ganho da antena de recepção em dBi, P_{cap} é a potência captada pelo analisador de espectro em dBm e L_r é a perda no cabo de recepção.

Os valores obtidos foram plotados em gráficos onde o eixo das distâncias está em escala logarítmica, em quilômetros e a perda em escala absoluta, em dB.

Para cada conjunto de medidas, uma curva de melhor ajuste foi estimada e com o objetivo de fazer uma análise quantitativa mais apurada, foram levantadas estatísticas de erro absoluto e desvio padrão absoluto dos pontos em relação à reta de ajuste. O erro absoluto para cada amostra pode ser calculado por:

$$E_i = |L_{mi} - L_{pi}| \quad (8.2)$$

Onde L_{mi} é o valor da perda prevista na reta de ajuste e L_{pi} é o valor obtido a campo do ponto, em dada distância. O erro médio absoluto é calculado a partir da equação 8.3:

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (8.3)$$

N é o número de pontos. O desvio padrão absoluto pode assim ser calculado a partir da equação 8.4:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} (\sum_{i=1}^N E_i^2 - NE^2)} \quad (8.4)$$

Os resultados para cada conjunto de amostras serão analisados e, em seguida, são abordados aspectos gerais sobre cada morfologia.

8.1.1

Morfologia vegetal floresta

Os dados coletados desta morfologia são oriundos do *site* na vila de Americano-PA. As retas de melhor ajuste do tipo $L_0 + \varphi \log d$, onde L_0 é o parâmetro da perda inicial e φ é o fator de atenuação com a distância entre as antenas (*slope*) e os gráficos e estatísticas para este site são:

a) Altura de transmissão de 1,5 metro;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.1):

$$L(dB) = 144,17 + 48,4 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,83$$

$$\sigma = 4,45$$

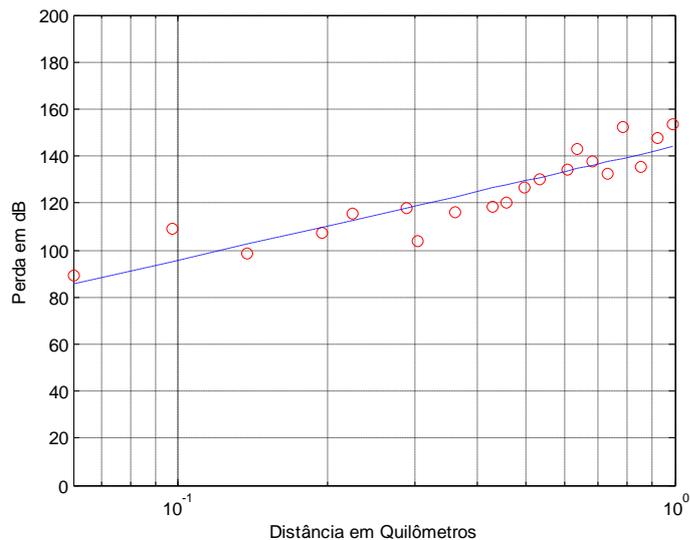


Figura 8.1 - Reta de ajuste para 700 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.2):

$$L(dB) = 146,59 + 50 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,17$$

$$\sigma = 4,40$$

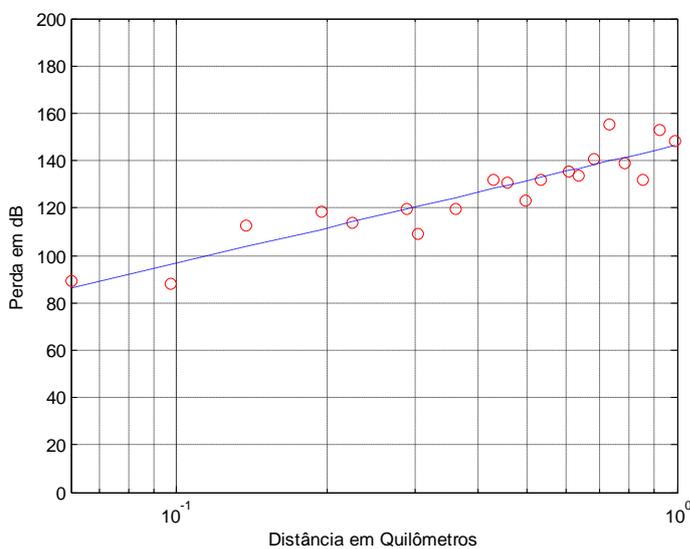


Figura 8.2 - Reta de ajuste para 750 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.3):

$$L(dB) = 148,36 + 50,67 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,56$$

$$\sigma = 5,02$$

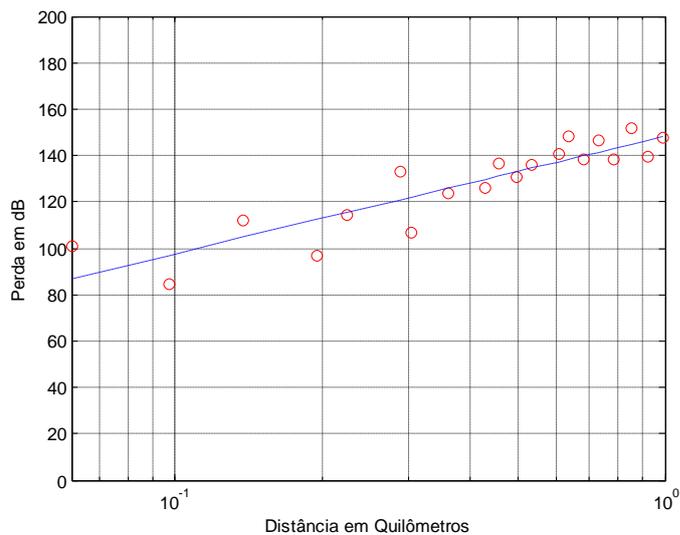


Figura 8.3 - Reta de ajuste para 800 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

b) Altura de transmissão de 6 metros;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.4):

$$L(dB) = 134,39 + 47,68 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,69$$

$$\sigma = 4,39$$

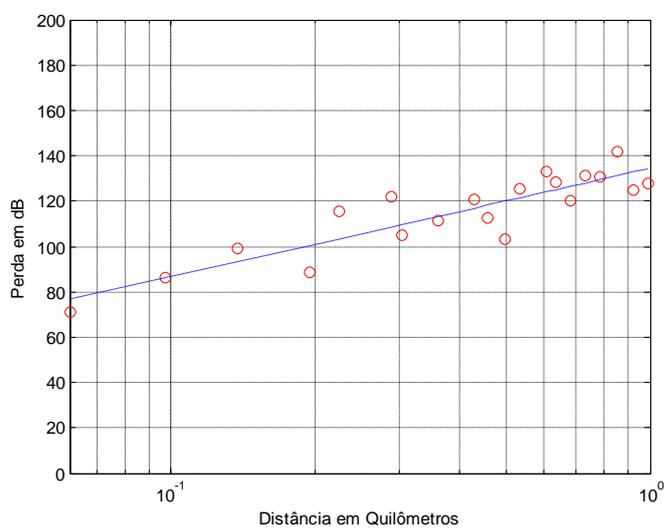


Figura 8.4 - Reta de ajuste para 700 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.5):

$$L(dB) = 135,16 + 46,56 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,21$$

$$\sigma = 5,34$$



Figura 8.5 - Retas de ajuste para 750 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.6):

$$L(dB) = 137,62 + 46,9 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,87$$

$$\sigma = 3,88$$

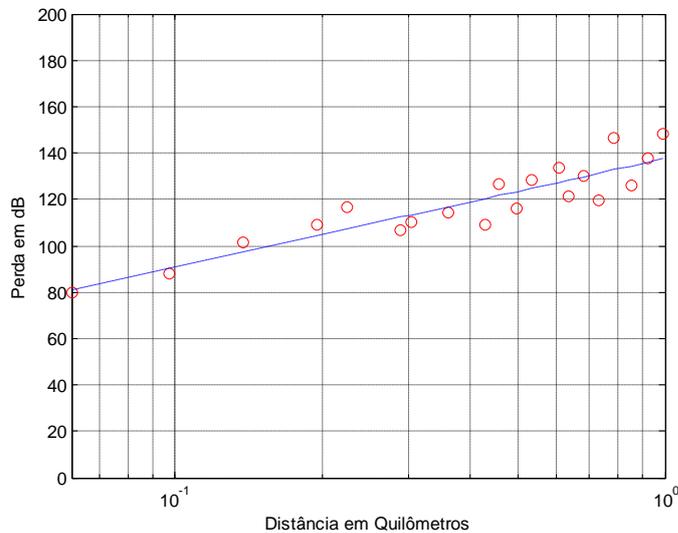


Figura 8.6 - Retas de ajuste para 800 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

Frequência de 700 MHz (fig. 8.7):

$$L(dB) = 120,68 + 46,23 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,55$$

$$\sigma = 4,71$$

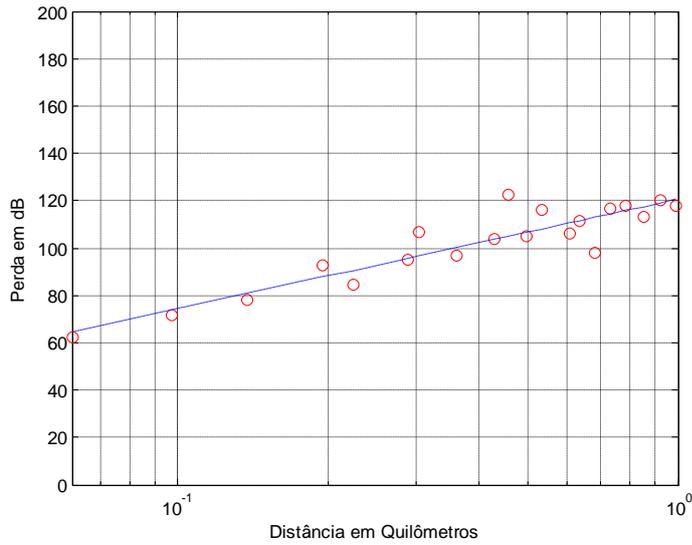


Figura 8.7 - Reta de ajuste para 700 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.8):

$$L(dB) = 122,46 + 45,72 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 8,88$$

$$\sigma = 5,67$$

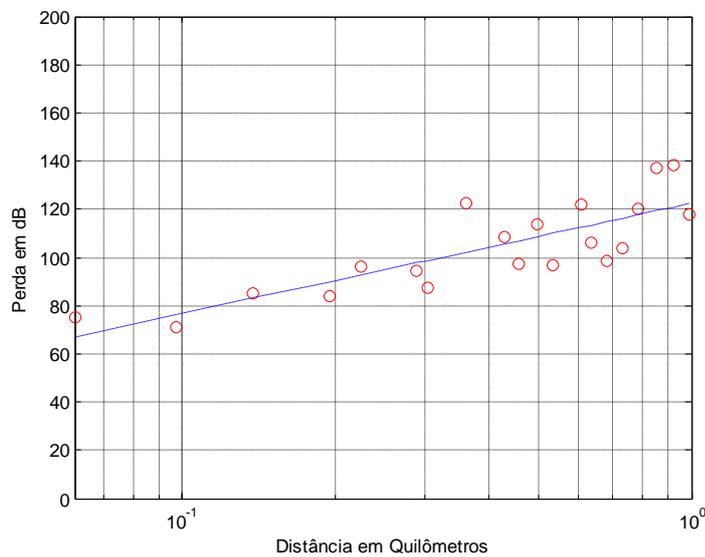


Figura 8.8 - Reta de ajuste para 750 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.9):

$$L(dB) = 127,61 + 49,22 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,55$$

$$\sigma = 5,28$$

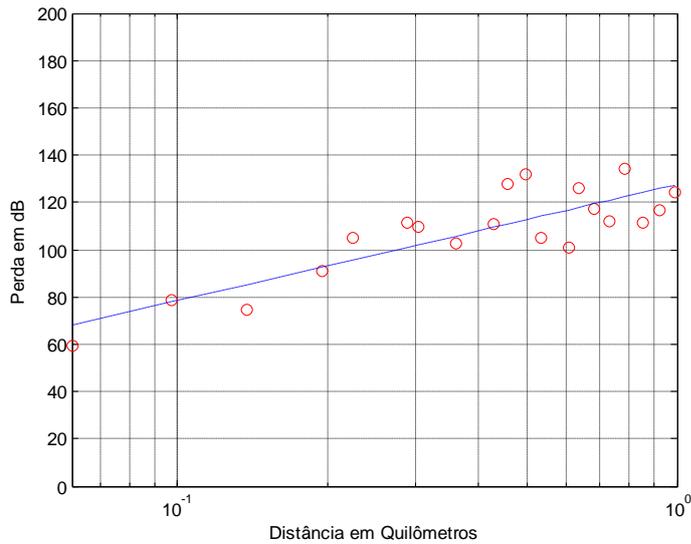


Figura 8.9 - Reta de ajuste para 800 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

As retas de ajuste obtidas para esta morfologia apresentam alta semelhança. Tal fato pode ser compreendido pela faixa de frequências medida ser relativamente estreita (100 MHz) e a variação na altura de transmissão também ser relativamente pequena (1,5- 12 metros). Este comportamento se repete nos outros tipos vegetais.

No início do trajeto de medição, a antena transmissora está posicionada a 5 metros do começo da mata. Pode-se notar o alto valor da atenuação inicial encontrado em todas as retas de ajuste, motivada por este arranjo (fig. 8.10).



Figura 8.10 - Localização da antena de transmissão.

Em todo trajeto foram fixados marcos nos pontos de coleta de dados posicionados pelo GPS. Neste *site* não existem obstáculos de urbanização ou relevo próximos, sendo a área praticamente inabitada e sem quaisquer construções. O nível de ruído no interior da floresta é baixo, sempre inferior a -100 dBm e o terreno bastante plano. Neste *site*, a grande quantidade de vegetação causa forte atenuação no sinal, evidenciado pelo alto fator de atenuação com a distância (*slope*) apresentado pelas retas. Outro fator que pode ser considerado é a similaridade na ordem de grandeza entre os comprimentos de onda na faixa estudada que se situam entre 37 e 43 centímetros e as estruturas vegetais encontradas no percurso, que possuem em muitos casos tamanhos maiores que os comprimentos de onda, dificultando a propagação do sinal no interior da mata.

A alta diretividade das antenas exerce um efeito de filtragem nos multipercursos que compõem o sinal no receptor, na medida em que emitem e captam sinais em uma faixa geográfica mais estreita.

8.1.2

Morfologia vegetal bosque urbano

Os dados coletados são oriundos do *site* no Jardim Botânico de Belém, e foram analisados com a mesma métrica da morfologia anterior:

a) Altura de transmissão de 1,5 metro;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.11):

$$L(dB) = 133,10 + 41,96 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,7$$

$$\sigma = 4,63$$

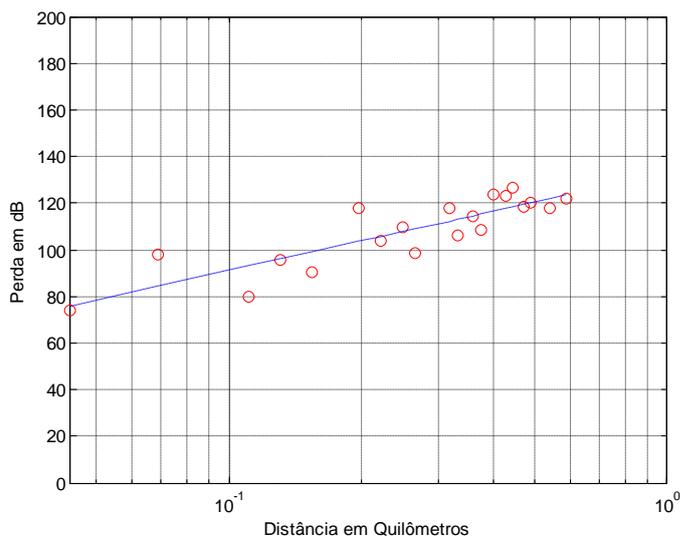


Figura 8.11 - Reta de ajuste para 700 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.12):

$$L(dB) = 134,89 + 41,35 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,92$$

$$\sigma = 3,92$$

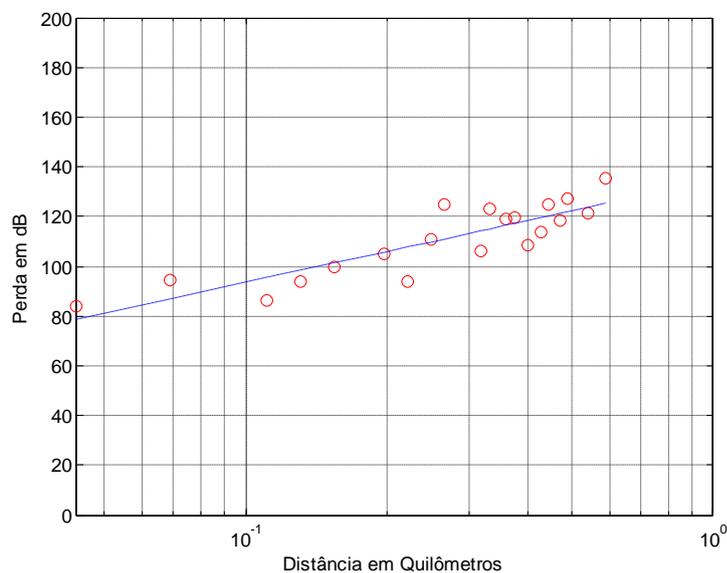


Figura 8.12 - Reta de ajuste para 750 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.13):

$$L(dB) = 138,47 + 43,1 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,59$$

$$\sigma = 4,46$$

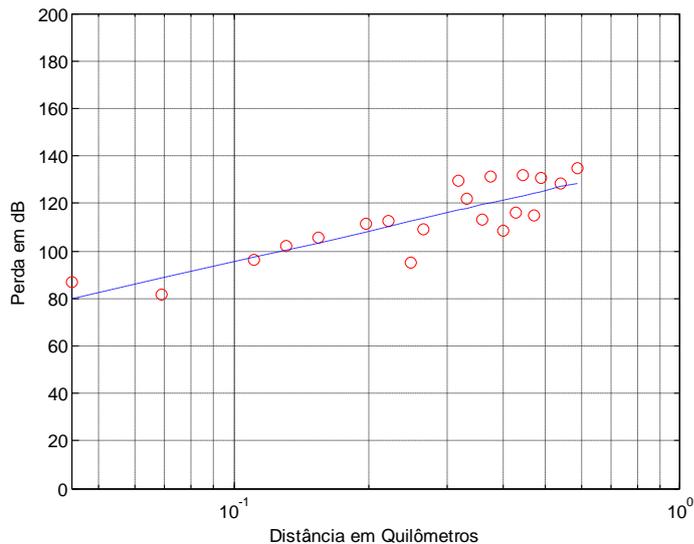


Figura 8.13 - Retas de ajuste para 800 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

b) Altura de transmissão de 6 metros;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.14):

$$L(dB) = 127,59 + 40,46 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,02$$

$$\sigma = 4,36$$

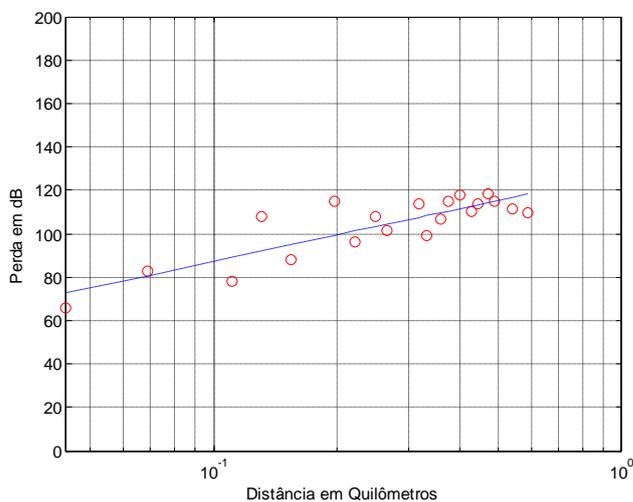


Figura 8.14 - Retas de ajuste para 700 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.15):

$$L(dB) = 128,44 + 42,53 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,19$$

$$\sigma = 3,16$$

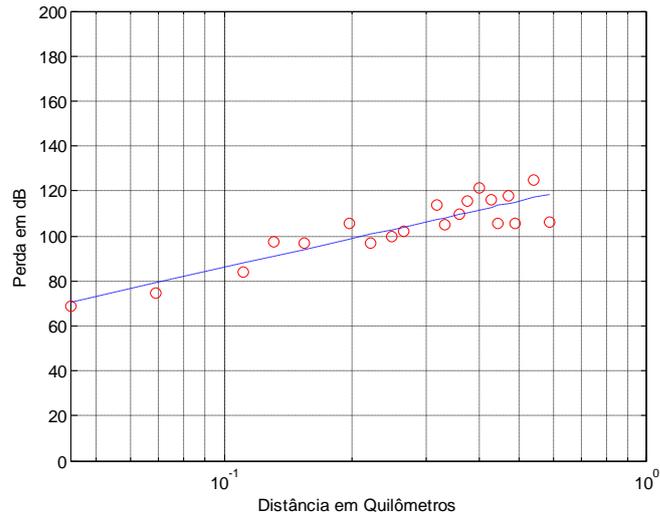


Figura 8.15 - Reta de ajuste para 750 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.16):

$$L(dB) = 131,18 + 43,17 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 9,47$$

$$\sigma = 4,8$$

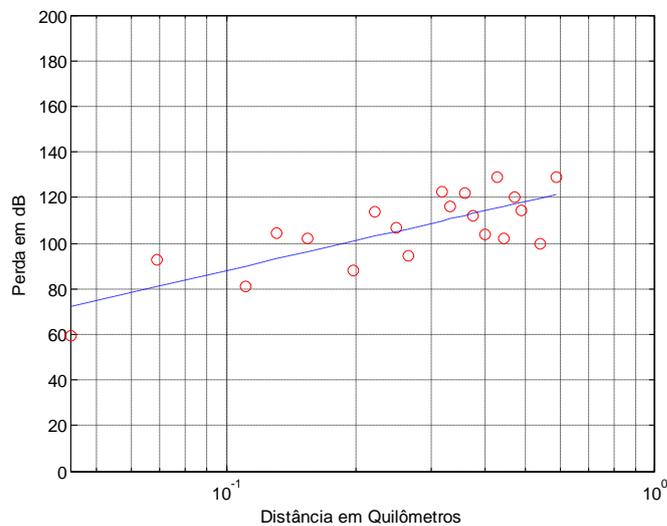


Figura 8.16 - Reta de ajuste para 800 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

Frequência de 700 MHz (fig. 8.17):

$$L(dB) = 118,42 + 39,3 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 7,34$$

$$\sigma = 4,77$$

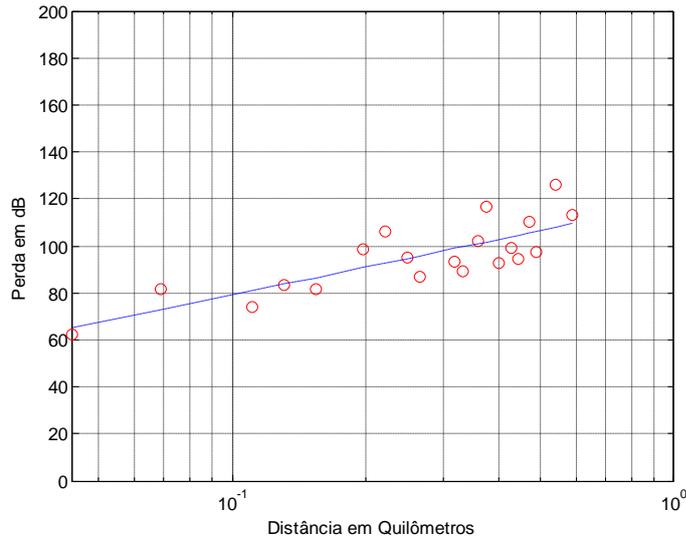


Figura 8.17 - Retas de ajuste para 700 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.18):

$$L(dB) = 119,43 + 37,71 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6$$

$$\sigma = 4,55$$

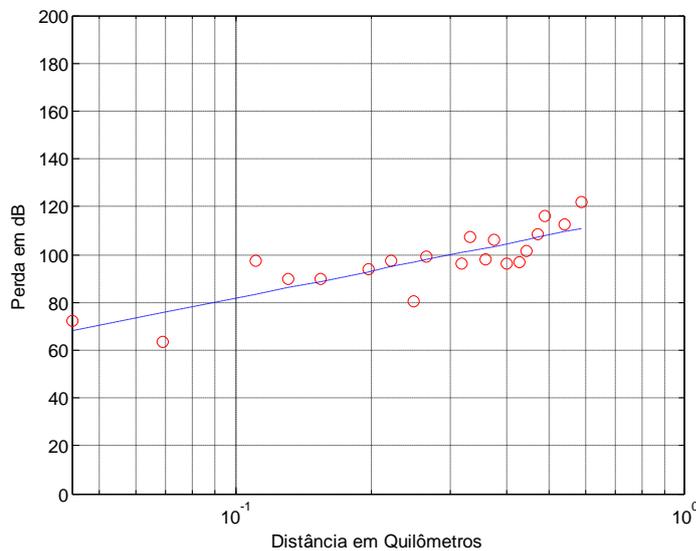


Figura 8.18 - Retas de ajuste para 750 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.19):

$$L(dB) = 123,14 + 41,24 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 7,93$$

$$\sigma = 3,86$$

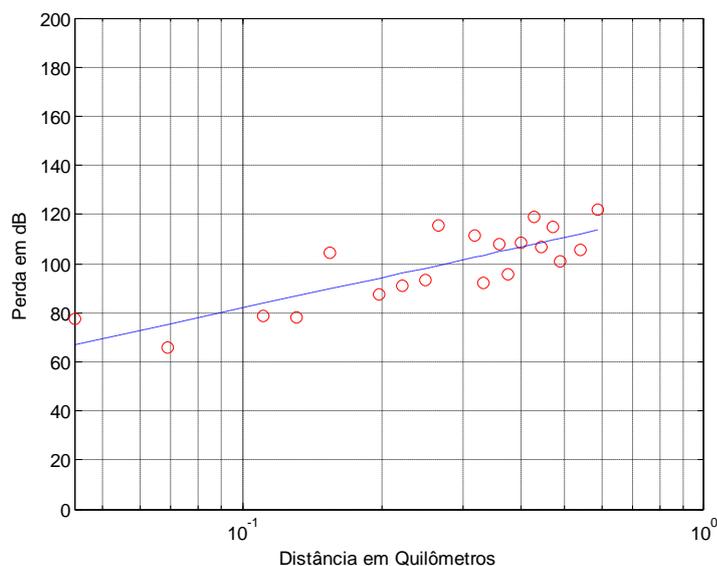


Figura 8.19 - Reta de ajuste para 800 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Este *site* possui várias semelhanças com a floresta, contudo no interior do jardim botânico existem algumas construções pequenas e baixas e possui vielas para o tráfego de pessoas (fig. 8.20). As árvores ficam restritas nos espaços entre as vielas e possuem adensamento menor que a floresta, possibilitando a colocação do tripé da antena de recepção sem maiores problemas.

A antena de transmissão foi posicionada na Universidade Estadual do Pará (UEPA), que ocupa um quarteirão ao lado. O sinal, então, se propaga inicialmente sobre uma rua lateral com pouco tráfego de veículos.

Pode-se notar a alta atenuação inicial e perda com a distância, embora não tão altas como na floresta. Pela facilidade de locomoção, os pontos de coleta foram tomados próximos às vielas com o auxílio do GPS em suas rotas mais próximas da linha de máxima diretividade.

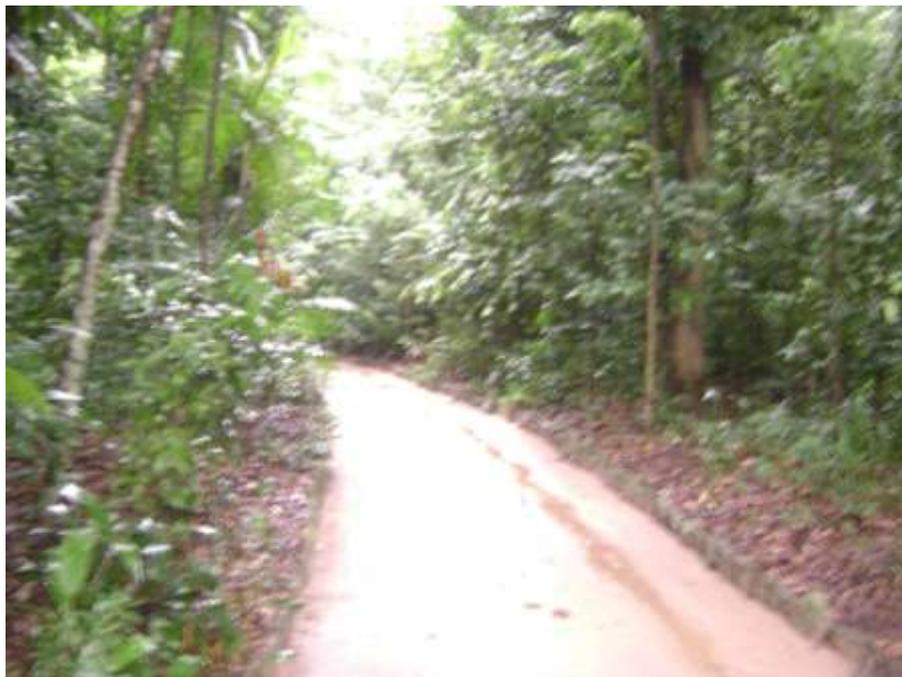


Figura 8.20 - Interior do jardim botânico em Belém-PA.

O jardim botânico ocupa um quarteirão e está localizado em um bairro dentro da cidade, cercado por ruas movimentadas e prédios altos e baixos. O ruído no interior do bosque é mais alto que na floresta, oscilando entre -100 dBm e -90 dBm, fato que pode ser motivado pela ocupação e atividade humana a partir dos seus limites.

O terreno é plano e sem construções altas, possuindo pracinhas pavimentadas em seu interior e pouca movimentação de pessoas nos dias das medições.

8.1.3

Morfologia vegetal linha de árvores

Os dados desta morfologia foram coletados no *site* em Americano-PA e a sede do Inmetro, em Xérem, no município de Duque de Caxias-RJ.

Os pontos de coleta foram escolhidos entre as árvores na linha, tomados em intervalos regulares e marcados com GPS. O arranjo das antenas foi posicionado para que o percurso na linha de máxima diretividade transponha os espécimes sucessivamente. Foi necessário bastante cuidado no posicionamento da antena de recepção, pois as árvores nem sempre estão perfeitamente alinhadas, o que pode comprometer os resultados. Os gráficos e estatísticas seguiram a mesma métrica dos ambientes anteriores.

Site 1: Linha de árvores em Americano-PA.

a) Altura de transmissão de 1,5 metro;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.21):

$$L(dB) = 117,73 + 30,78 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,41$$

$$\sigma = 4,02$$

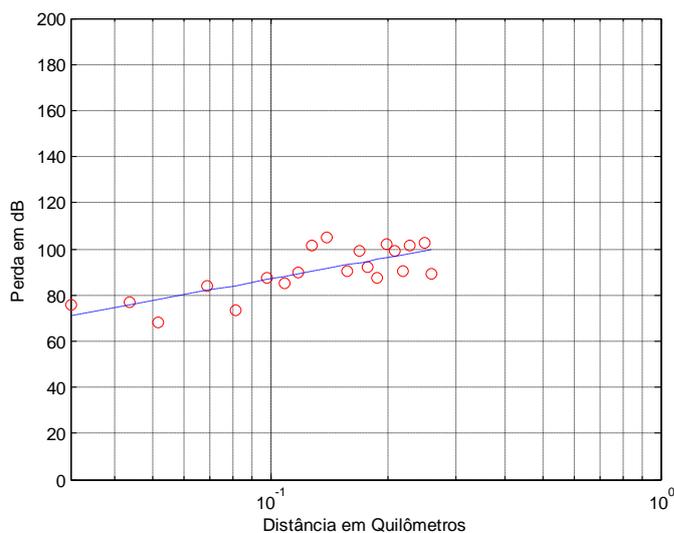


Figura 8.21 - Reta de ajuste para 700 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.22):

$$L(dB) = 121,72 + 32,01 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,57$$

$$\sigma = 3,69$$

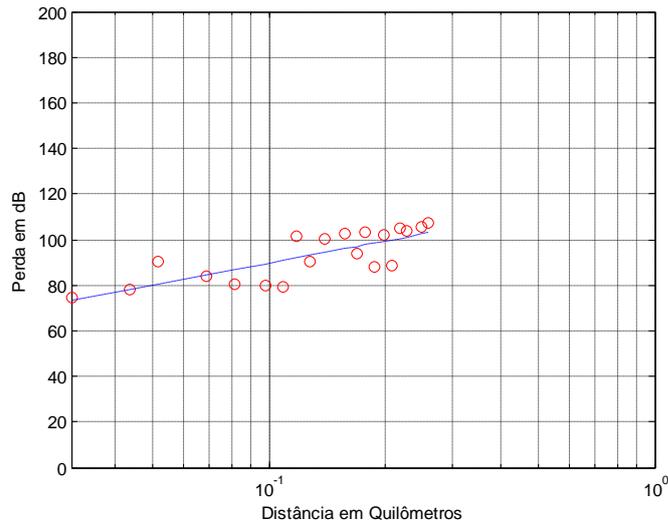


Figura 8.22 - Retas de ajuste para 750 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.23):

$$L(dB) = 125,67 + 34,59 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,27$$

$$\sigma = 3,43$$

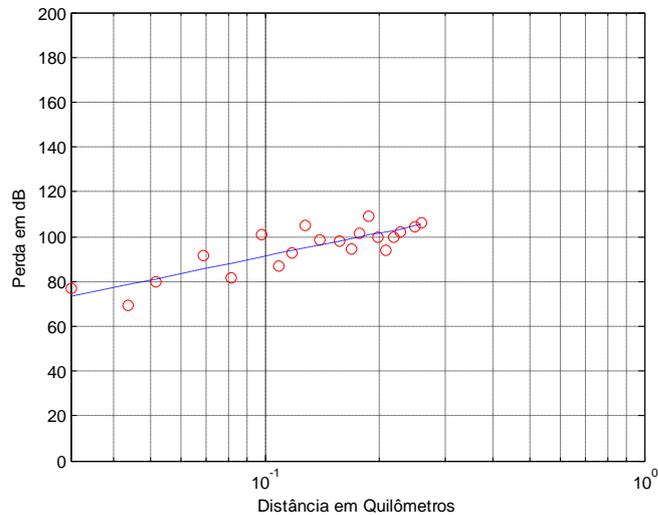


Figura 8.23 - Retas de ajuste para 800 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

b) Altura de transmissão de 6 metros;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.24):

$$L(dB) = 107,05 + 26,75 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 7,81$$

$$\sigma = 4,99$$

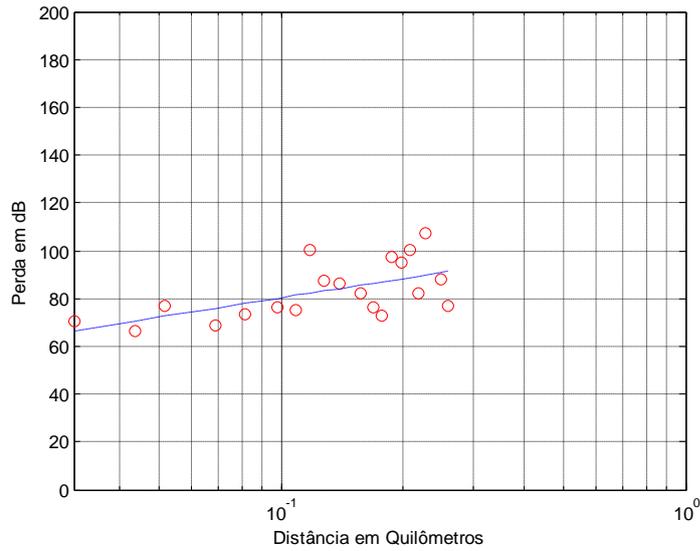


Figura 8.24 - Retas de ajuste para 700 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.25):

$$L(dB) = 111,18 + 28,45 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,64$$

$$\sigma = 4,94$$

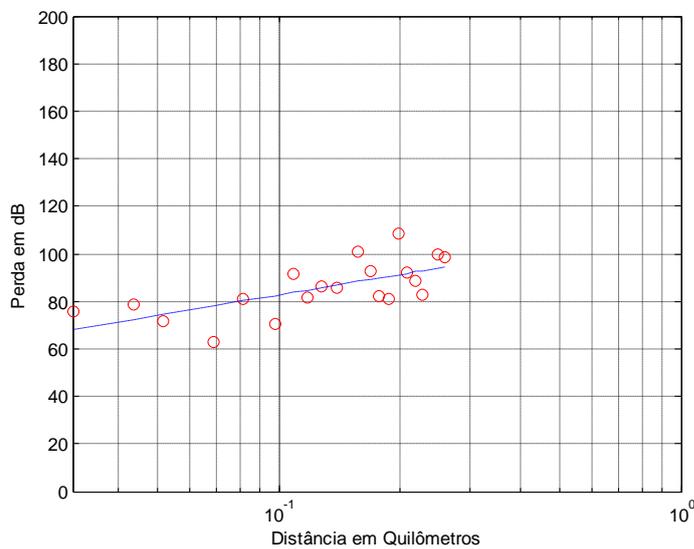


Figura 8.25 - Retas de ajuste para 750 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.26):

$$L(dB) = 114,06 + 29,42 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 8,12$$

$$\sigma = 5,60$$

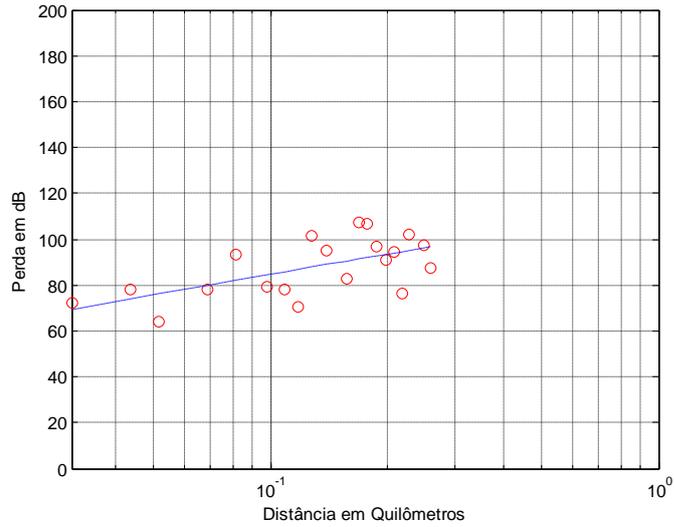


Figura 8.26 - Retas de ajuste para 800 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

Frequência de 700 MHz (fig. 8.27):

$$L(dB) = 96,33 + 21,30 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,58$$

$$\sigma = 3,36$$

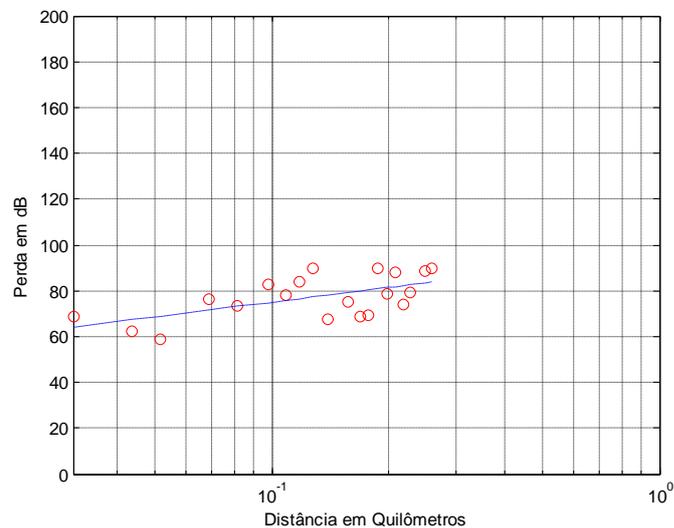


Figura 8.27 - Retas de ajuste para 700 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.28):

$$L(dB) = 100,13 + 23,50 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,15$$

$$\sigma = 3,73$$

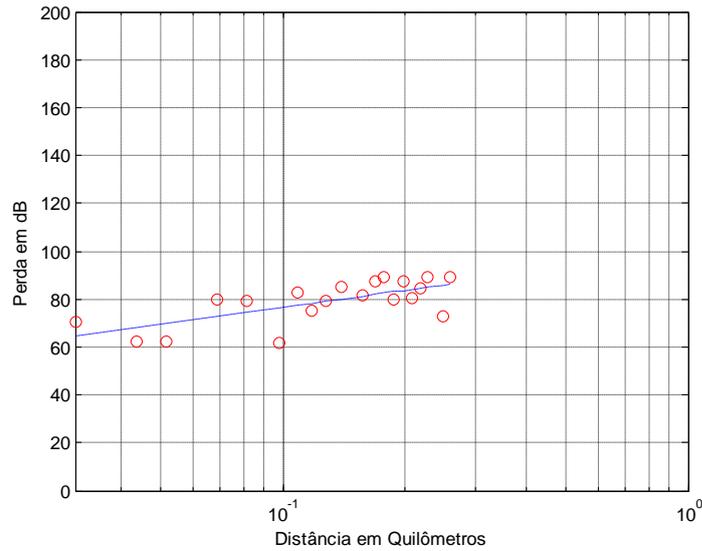


Figura 8.28 - Retas de ajuste para 750 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.29):

$$L(dB) = 103,01 + 26,45 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 10,34$$

$$\sigma = 5,92$$

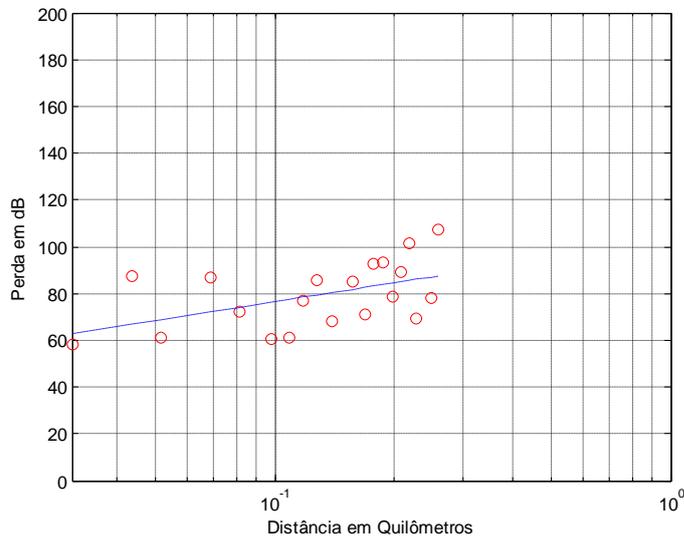


Figura 8.29 - Retas de ajuste para 800 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Este *site* foi escolhido por ter uma clássica linha de árvores, de forma análoga a arborização urbana presente em calçadas, contudo sem quaisquer construções próximas e com uma densidade de indivíduos maior (fig. 8.30).



Figura 8.30 - Linha de pinheiros em Americano-PA.

A linha de pinheiros foi plantada às margens de uma estrada vicinal sem pavimentação e com pouquíssimo tráfego, em terreno plano, com um leve declive. Os espécimes têm altura aproximada de 20 metros com diâmetro médio de tronco de 48,5 centímetros e altura até a copa média de 3,8 metros.

Presume-se que a maior atenuação no percurso é devida aos troncos, pois a copa dos pinheiros consiste de galhos finos e folhas pequenas em forma de agulha que partem do tronco e continuam até quase a altura final da árvore.

As árvores estão plantadas com espaçamento aproximado de 4 metros e estão plenamente desenvolvidas. Observa-se que a perda com a distância foi menor que nas morfologias floresta e bosque.

Site 2: Linha de árvores em Inmetro-RJ.

a) Altura de transmissão de 1,5 metro;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.31):

$$L(dB) = 120,64 + 30,57 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,43$$

$$\sigma = 3,11$$

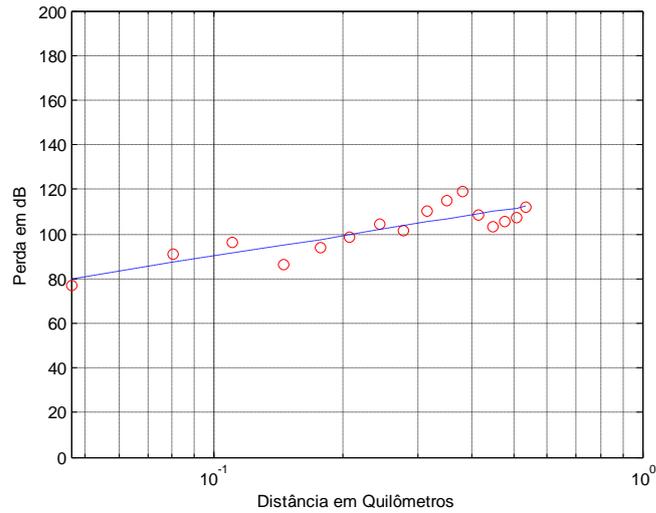


Figura 8.31 - Reta de ajuste para 700 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.32):

$$L(dB) = 117,99 + 32,72 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,37$$

$$\sigma = 3,54$$

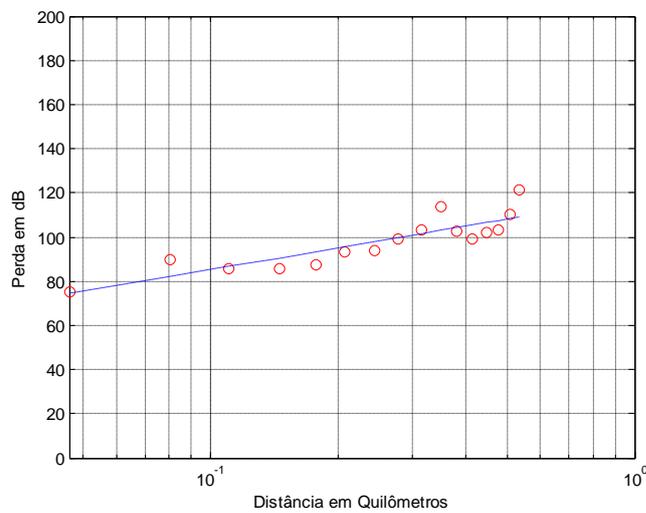


Figura 8.32 - Reta de ajuste para 750 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.33):

$$L(dB) = 118,30 + 32,41 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,90$$

$$\sigma = 3,92$$

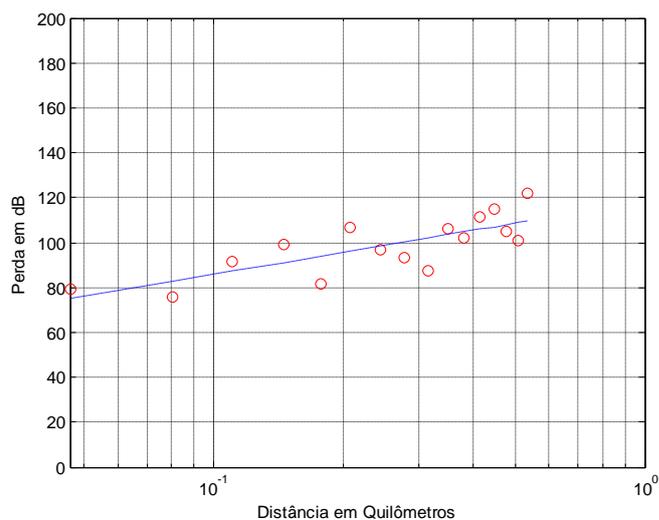


Figura 8.33 - Retas de ajuste para 800 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

b) Altura de transmissão de 6 metros;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.34):

$$L(dB) = 113,81 + 29,19 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,52$$

$$\sigma = 3,66$$

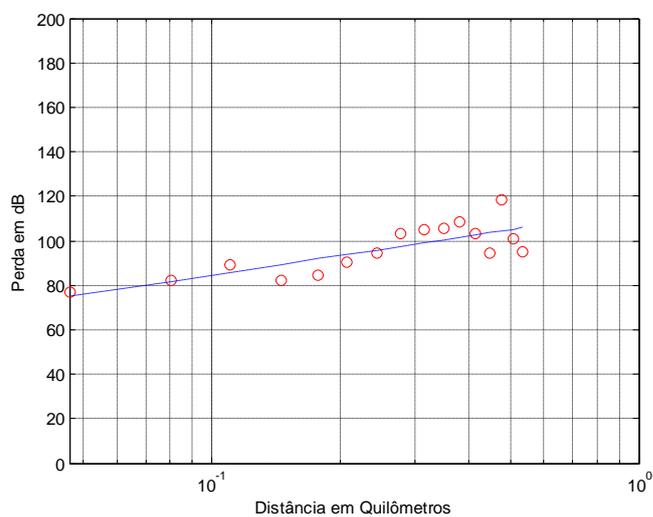


Figura 8.34 - Retas de ajuste para 700 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.35):

$$L(dB) = 114,25 + 31,84 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,64$$

$$\sigma = 3,12$$

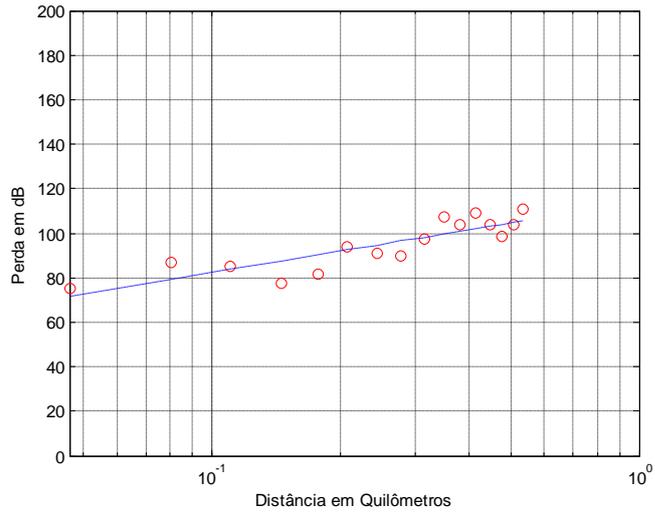


Figura 8.35 - Retas de ajuste para 750 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.36):

$$L(dB) = 113,62 + 30,72 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,43$$

$$\sigma = 3,79$$

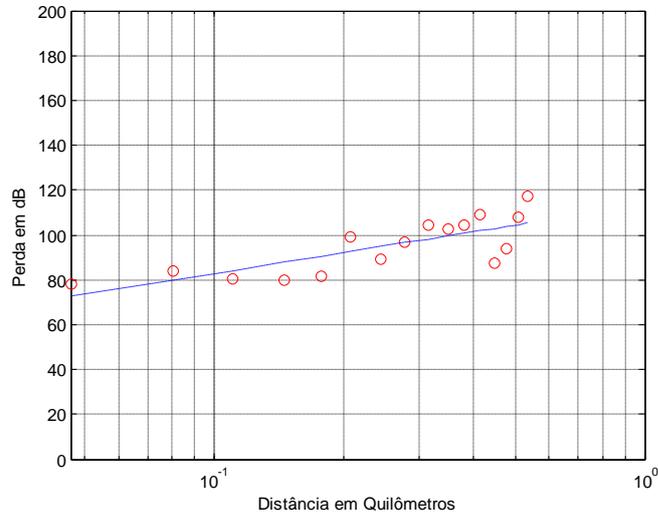


Figura 8.36 - Retas de ajuste para 800 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

Frequência de 700 MHz (fig. 8.37):

$$L(dB) = 111,08 + 27,49 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,73$$

$$\sigma = 4,01$$

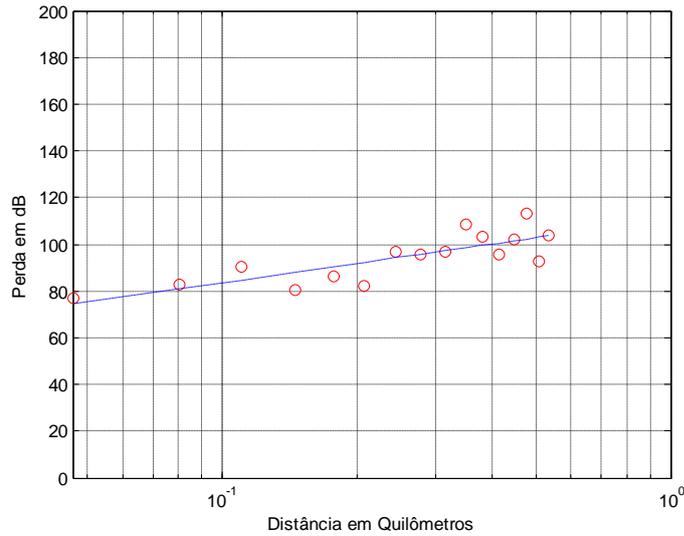


Figura 8.37 - Retas de ajuste para 700 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.38):

$$L(dB) = 109,01 + 29,46 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,06$$

$$\sigma = 3,42$$

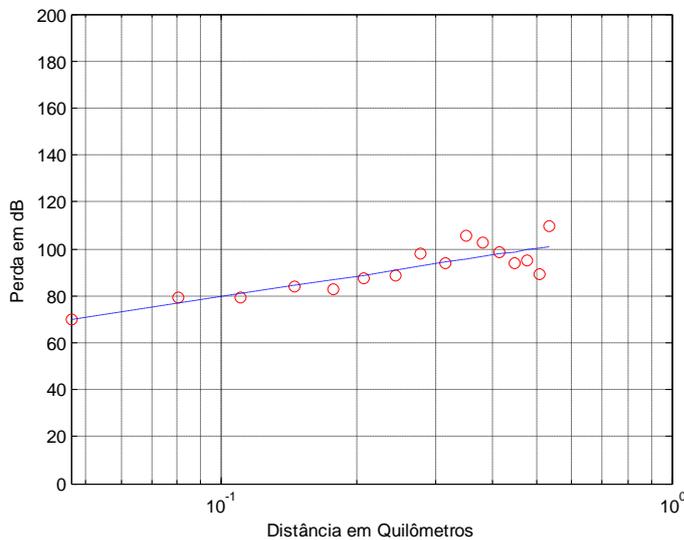


Figura 8.38 - Retas de ajuste para 750 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.39):

$$L(dB) = 108,7 + 31,42 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,67$$

$$\sigma = 4,28$$

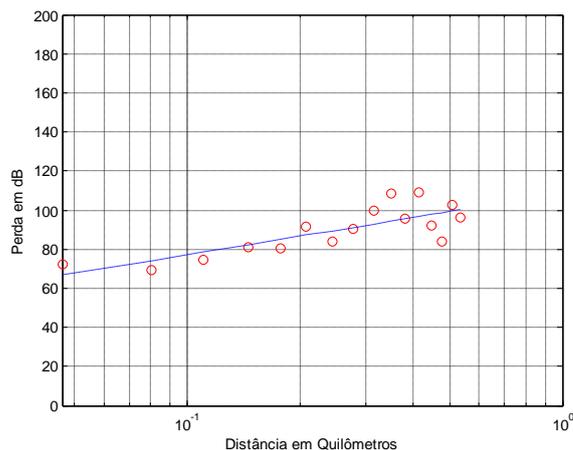


Figura 8.39 - Reta de ajuste para 800 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

A linha de árvores no Inmetro (fig. 8.40) é o único *site* onde podem ser encontradas construções próximas e um relativo tráfego de pessoas e veículos. Os espécimes têm altura estimada de 12 metros, diâmetro médio do tronco de 58 cm e altura até a copa média de 3,4 metros.



Figura 8.40 - Linha de árvores no Inmetro - Rio.

É possível encontrar árvores com diâmetro do tronco de mais de 1 metro e outras na faixa de 30 centímetros. Os pontos de coleta próximos aos troncos mais grossos apresentaram grande desvio em relação aos outros pontos próximos.

A linha foi plantada na via de acesso principal do órgão e teve tráfego pequeno de pessoas e veículos nos horários das medições. O terreno é bastante plano e as árvores estão plantadas a uma distância aproximada de 6 metros.

Existem prédios baixos em ambos os lados da linha, embora mais afastados que o comumente encontrado em vias públicas. Tal fato pode aumentar a variabilidade do sinal nas medições, pois os prédios podem ser espalhadores de energia.

Os valores de atenuação inicial e *slope* apresentam resultados esperados, mais baixos que a floresta e o bosque.

8.1.3.1

Análise geral para linha de árvores

Nesta seção, será analisada a perda com a distância considerando os dados dos *sites* em Americano e Inmetro conjuntamente.

Os pontos serão plotados juntos e uma reta de melhor ajuste será proposta. A linha medida no Inmetro é mais de 200 metros maior que a de Americano, o que pode causar distorções no ajuste final devido à contribuição nas distâncias maiores ser exclusivamente dos dados coletados em Xerém. Para contornar esse problema, também será calculada uma reta baseada nas retas de ajuste tomadas das coleções originais em cada *site*. A reta proposta dessa forma se aproxima da mediana entre as curvas de melhor ajuste independentes, o que corresponde à interpolação com ponderador igual a 0.5.

a) Altura de transmissão de 1,5 metro;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.41):

$$L(dB) = 120,71 + 32,89 \log_{10}^2(d)(km)$$

$$E_m = 4,93 / E_{m \text{ interp.}} = 5,55$$

$$\sigma = 3,94 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 4,12$$

$$L_{\text{interpolada}}(dB) = 119,18 + 30,67 \log_{10}^2(d)(km)$$

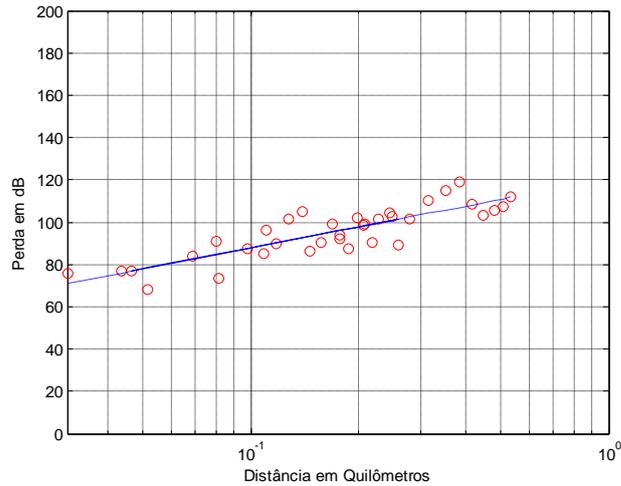


Figura 8.41 - Retas de ajuste geral, 700 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.42):

$$L(dB) = 117,77 + 29,3 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,56 / E_{m \text{ interp.}} = 6,08$$

$$\sigma = 3,34 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 4,19$$

$$L_{\text{interpolada}}(dB) = 119,85 + 31,36 \log_{10} d(km)$$

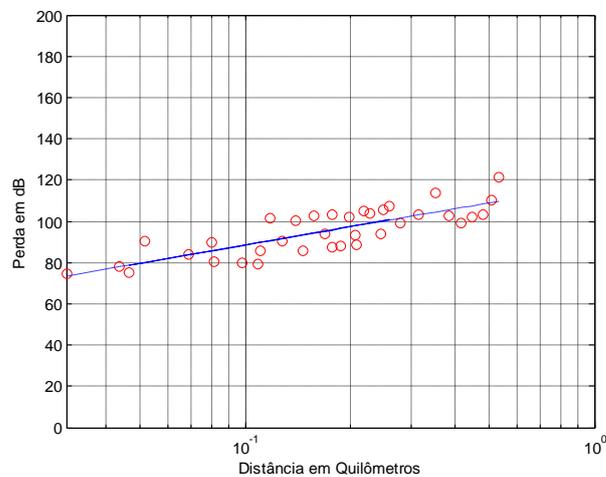


Figura 8.42 - Retas de ajuste geral, 750 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.43):

$$L(dB) = 118,92 + 29,29 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,67 / E_{m \text{ interp.}} = 6,71$$

$$\sigma = 4,34 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 4,92$$

$$L_{\text{interpolada}}(dB) = 121,98 + 33,5 \log_{10} d(km)$$

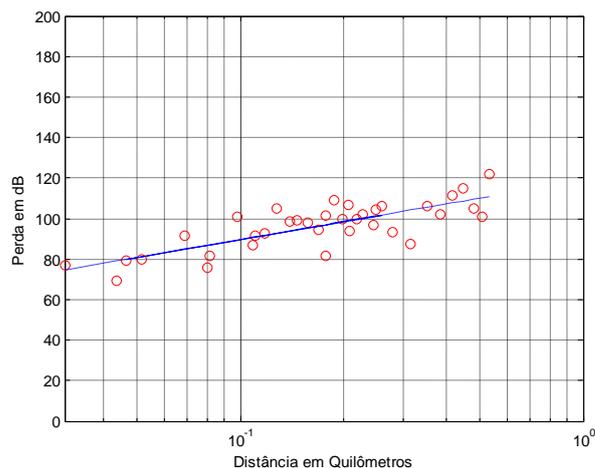


Figura 8.43 - Retas de ajuste geral, 800 MHz a 1,5 metro de altura de transmissão.

b) Altura de transmissão de 6 metros;

Frequência de 700 MHz (fig. 8.44):

$$L(dB) = 113,11 + 31,56 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 7,14 / E_{m \text{ interp.}} = 7,97$$

$$\sigma = 4,54 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 4,89$$

$$L_{\text{interpolada}}(dB) = 110,43 + 27,97 \log_{10} d(km)$$

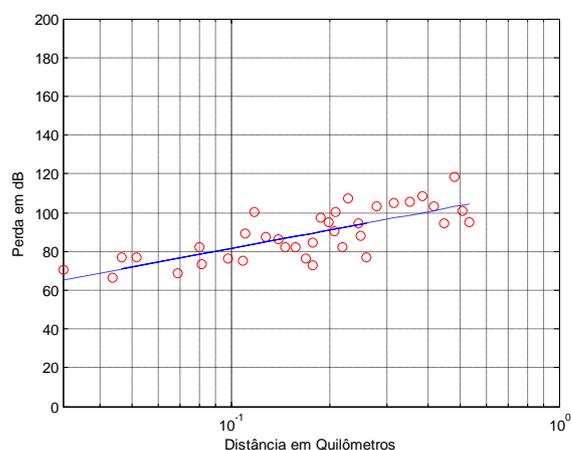


Figura 8.44 - Retas de ajuste geral, 700 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.45):

$$L(dB) = 113,25 + 30,54 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 5,75 / E_{m \text{ interp.}} = 6,36$$

$$\sigma = 4,33 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 4,66$$

$$L_{\text{interpolada}}(dB) = 112,71 + 30,14 \log_{10} d(km)$$

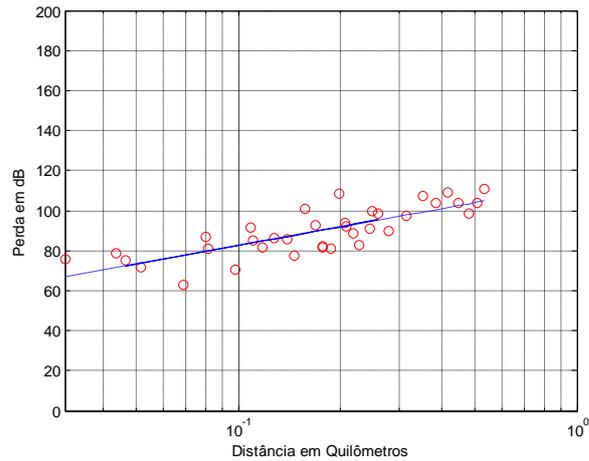


Figura 8.45 - Reta de ajuste geral, 750 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.46):

$$L(dB) = 113,24 + 29,07 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 7,37 / E_m \text{ interp.} = 7,71$$

$$\sigma = 4,93 / \sigma_m \text{ interp.} = 5,29$$

$$L_{\text{interpolada}} (dB) = 113,84 + 30,07 \log_{10} d(km)$$

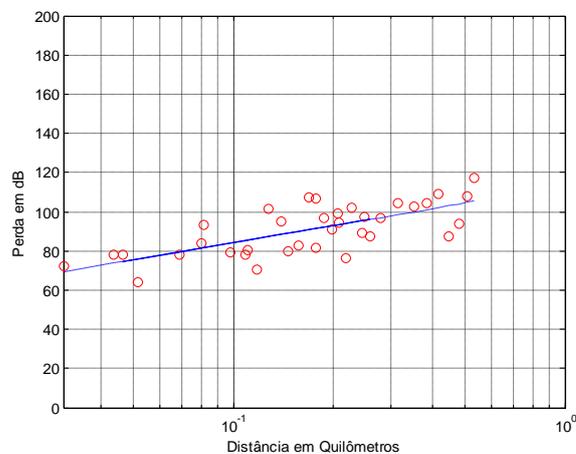


Figura 8.46 - Reta de ajuste geral, 800 MHz a 6 metros de altura de transmissão.

c) Altura de transmissão de 12 metros:

Frequência de 700 MHz (fig. 8.47):

$$L(dB) = 109,29 + 31,77 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 6,74 / E_m \text{ interp.} = 8,18$$

$$\sigma = 4,72 / \sigma_m \text{ interp.} = 5,37$$

$$L_{\text{interpolada}} (dB) = 103,70 + 24,39 \log_{10} d(km)$$

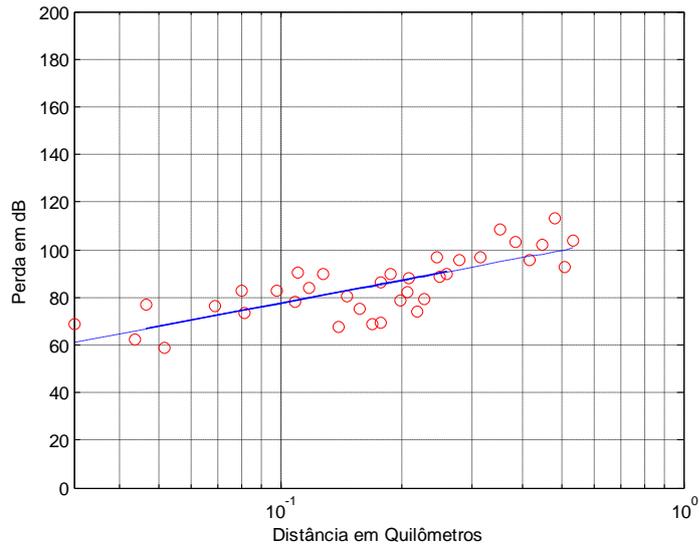


Figura 8.47 - Retas de ajuste geral, 700 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 750 MHz (fig. 8.48):

$$L(dB) = 107,27 + 29,74 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 4,77 / E_{m \text{ interp.}} = 6,11$$

$$\sigma = 4,04 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 4,78$$

$$L_{\text{interpolada}} (dB) = 104,57 + 26,48 \log_{10} d(km)$$

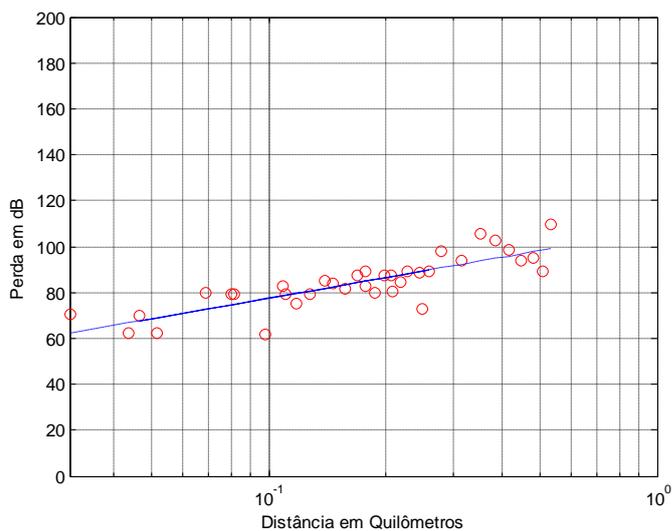


Figura 8.48 - Retas de ajuste geral, 750 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Frequência de 800 MHz (fig. 8.49):

$$L(dB) = 107,25 + 30,41 \log_{10} d(km)$$

$$E_m = 8,15 / E_{m \text{ interp.}} = 8,94$$

$$\sigma = 5,96 / \sigma_{m \text{ interp.}} = 6,09$$

$$L_{interpolada}(dB) = 105,85 + 28,93 \log_{10} d(km)$$

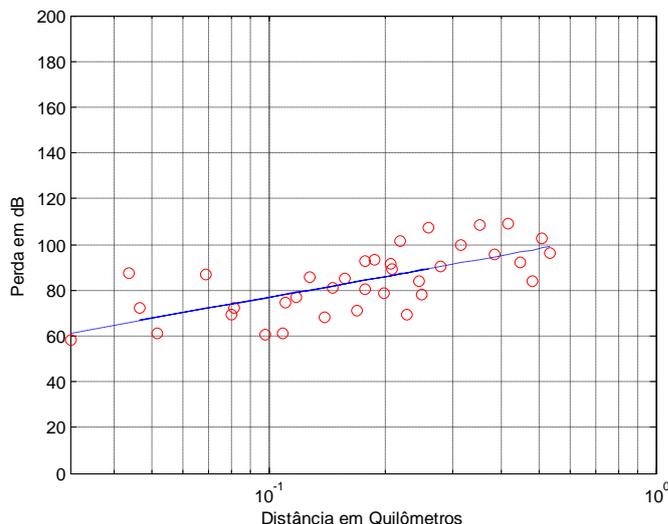


Figura 8.49 - Reta de ajuste geral, 800 MHz a 12 metros de altura de transmissão.

Em geral, as retas interpoladas apresentam boa concordância com as retas de melhor ajuste, a única exceção é o caso da antena transmissora a 12 metros irradiando na frequência de 700 MHz. O que ocorre é que a atenuação inicial e *slope* da curva de ajuste dos pontos tomados em Americano está com os valores mais baixos que a curva de ajuste tomada no Inmetro, assim, a reta de ajuste geral tem bastante amostras com baixa atenuação em distâncias mais baixas e apenas amostras com alta atenuação provenientes do Inmetro nas maiores distâncias, aumentando o *slope* de reta de ajuste geral. A reta interpolada atua "suavizando" a atenuação inicial e o *slope* entre os valores originais de ajuste. Obviamente, o erro absoluto e o desvio padrão absoluto entre as amostras e a reta interpolada é sempre maior. Devido à boa concordância geral encontrada, serão consideradas as retas de melhor ajuste para posteriores análises.

8.1.4

Considerações gerais da perda com a distância nas morfologias

Nesta seção, será abordada uma análise de parâmetros relacionados à perda com a distância nas morfologias.

Inicialmente será analisada a perda inicial (L_0) para cada caso, utilizando a perda inicial em todas as frequências em determinada altura de transmissão para comparações.

a) Floresta (fig. 8.50):

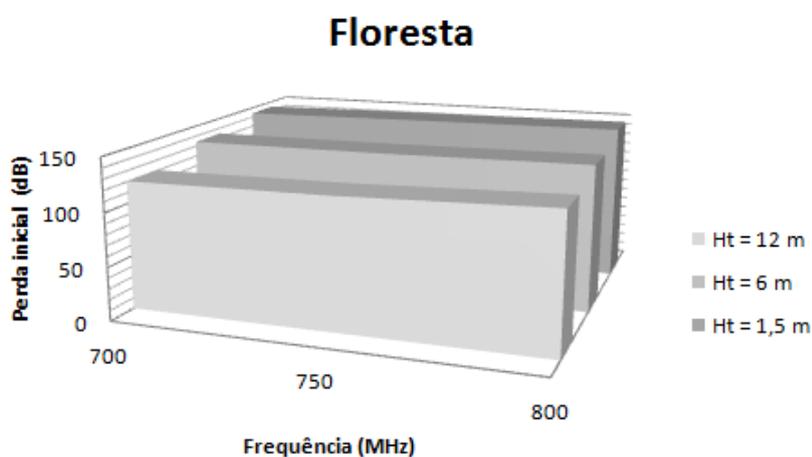


Figura 8.50 - Análise da perda inicial para o ambiente floresta.

b) Bosque urbano (fig. 8.51):

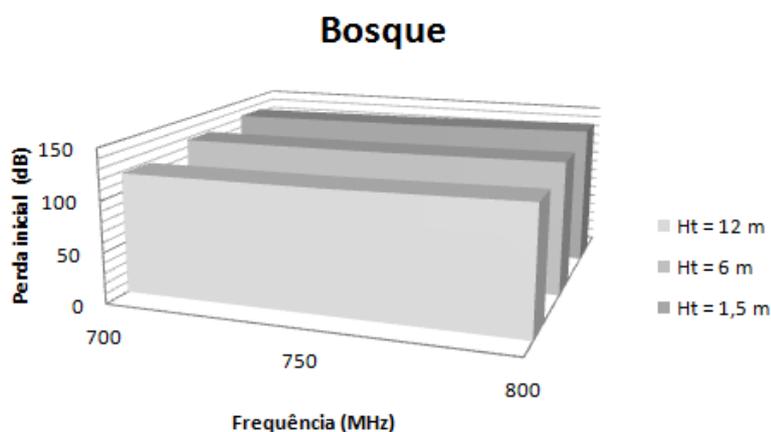


Figura 8.51 - Análise da perda inicial para o ambiente Bosque.

c) Linha de árvores (fig. 8.52):

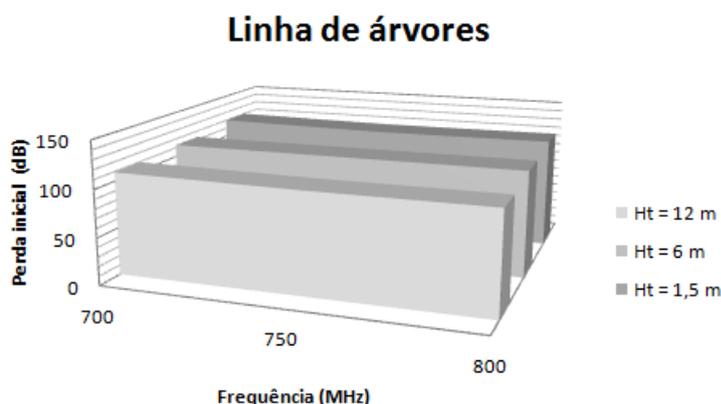


Figura 8.52 - Análise da perda inicial para a linha de árvores.

Na floresta, a atenuação inicial é maior que nos outros ambientes em todas as alturas de transmissão e frequências testadas.

Pode-se notar que no caso do bosque, os valores de L_0 estão em patamares entre a linha de árvores e a floresta. O raio direto é interceptado, sucessivamente, na linha desde o início do trajeto, embora no bosque e floresta haja uma densidade espacial muito maior de indivíduos, eles estão aleatoriamente distribuídos, o que pode, na dependência da rota de medições, apresentar grandes desvios na perda em função do grau de obstrução do raio direto, que é um importante contribuinte de energia, em muitos casos.

Outro fator importante na perda com a distância é o *slope*, que representa a atenuação com a distância. Métrica semelhante será usada na sua análise.

a) Floresta (fig. 8.53):

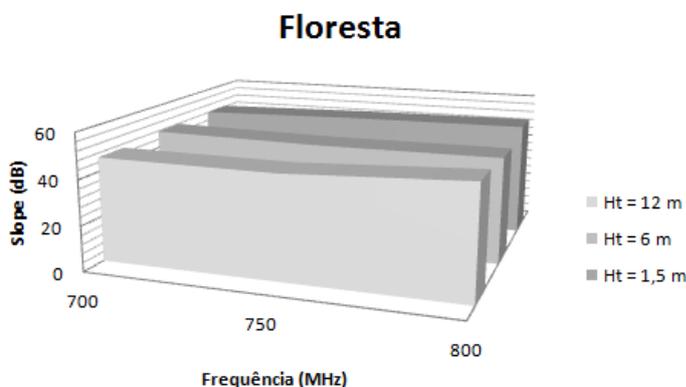


Figura 8.53 - Análise do fator de atenuação com a distância para floresta.

b) Bosque urbano (fig. 8.54):

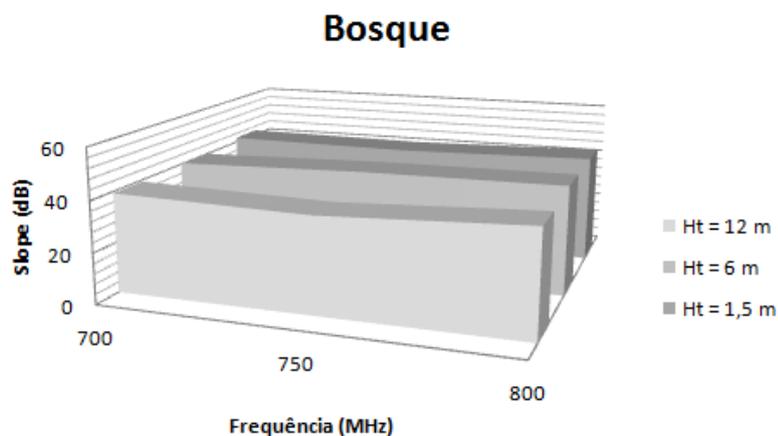


Figura 8.54 - Análise do fator de atenuação com a distância para Bosque.

b) Linha de árvores (fig. 8.55):

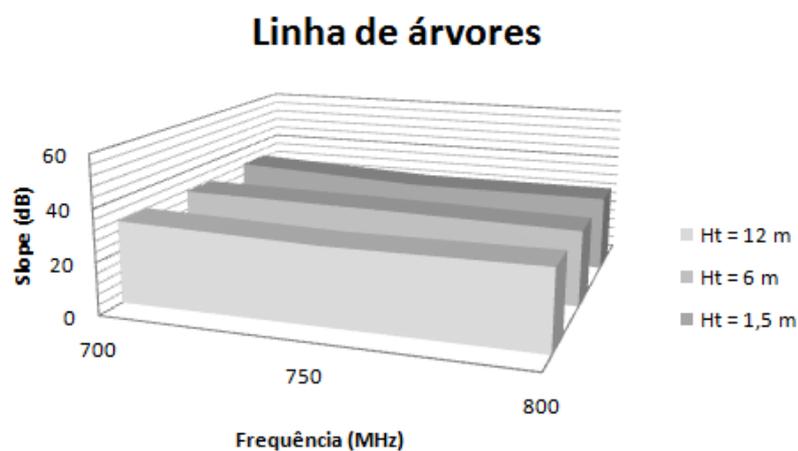


Figura 8.55 - Análise do *slope* para a linha de árvores.

Em todos os casos, a floresta tem os maiores fatores de perda com a distância, o que está associado ao alto grau de obstrução encontrado neste ambiente. As mesmas considerações, feitas a respeito da atenuação, podem ser tomadas em relação ao *slope*, na medida em que a rota da medição é um fator importante. As atenuações na linha de árvores estão em patamares inferiores aos do bosque.

8.2

Dependência da perda com a frequência

Nesta seção, é analisada a interferência da frequência na faixa de interesse sobre a perda de propagação. Inicialmente, serão abordadas as morfologias, em determinada altura e, posteriormente, a análise geral.

É consenso na literatura que a perda aumenta à medida que frequências mais altas são utilizadas. Em relação à propagação em áreas vegetadas pode-se supor que a ordem de dimensão das estruturas vegetais deve causar impactos sobre a perda, na dependência dos comprimentos de onda utilizados, o que será abordado em outra seção.

Foram utilizadas métricas semelhantes às adotadas na seção anterior. Como complemento para análise, foi utilizada a técnica da interpolação linear entre as curvas de melhor ajuste em cada altura, com a intenção de caracterizar a perda no intervalo contínuo da frequência, e plotado um gráfico da perda em função da frequência e distância. A interpolação ajusta tanto a perda inicial quanto o *slope*, pois é clara a tendência de aumento da perda destes dois entes com a frequência. Além da interpolação, foi feita uma análise alternativa e mais geral dos parâmetros perda inicial e *slope*, individualmente.

8.2.1

Ambiente floresta

a) Altura de transmissão de 1,5 metro (fig. 8.56):

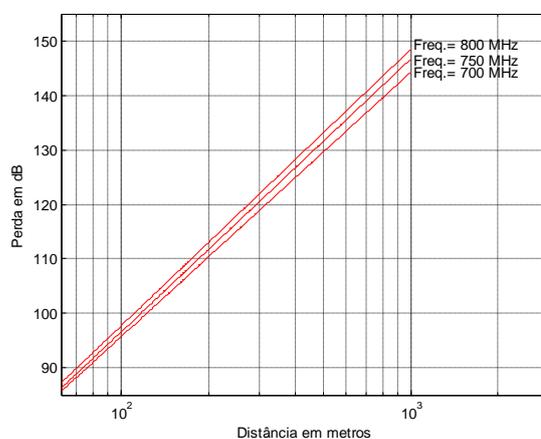


Figura 8.56 - Curvas de ajuste na altura de 1,5 metro, distância em escala log..

Interpolação (fig. 8.57):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L \text{ (dB)} = 144,17 + 48,4 \log d + [2,42 + 1,6 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L \text{ (dB)} = 146,59 + 50 \log d + [1,77 + 0,67 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

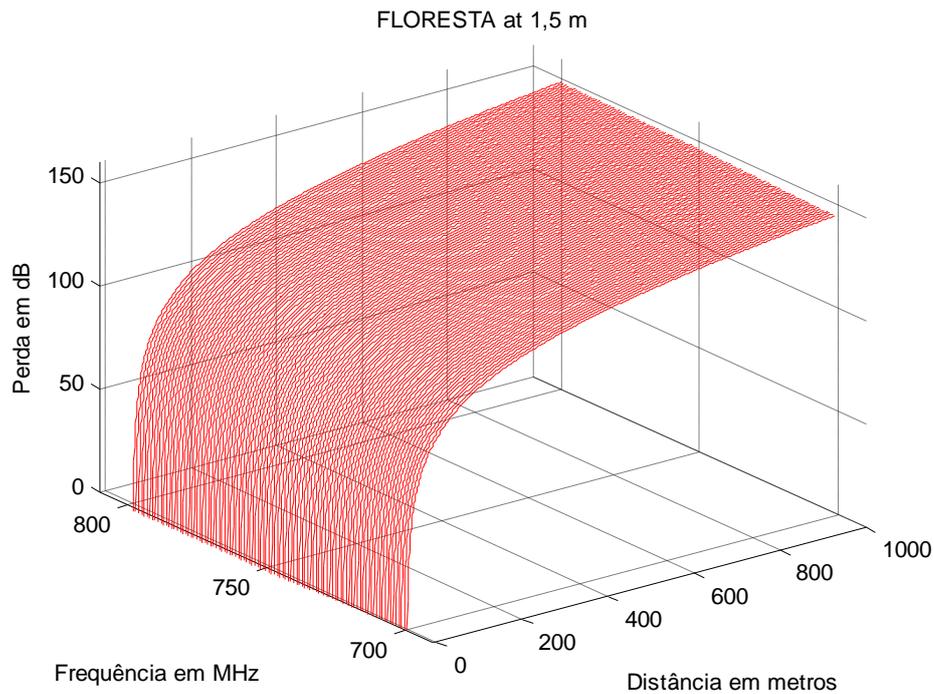


Figura 8.56 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 1,5 metro.

b) Altura de transmissão de 6 metros (fig. 8.57):

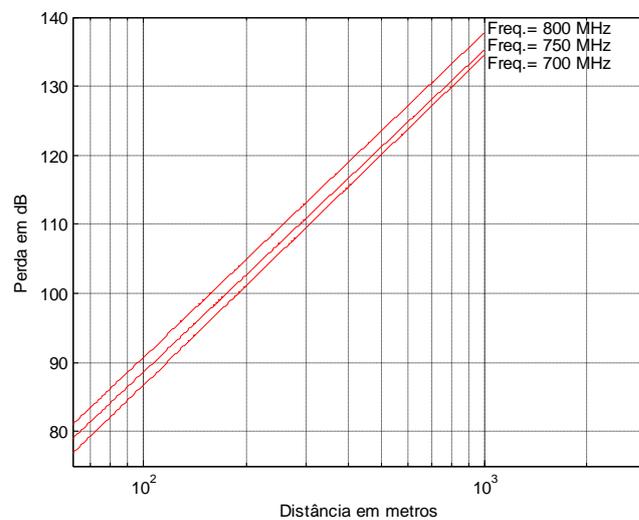


Figura 8.57 - Curvas de ajuste na altura de 6 metros, distância em escala log..

Interpolação (fig. 8.58):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L (dB) = 134,39 + 47,68 \log d + [0,77 - 1,1 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L (dB) = 135,16 + 46,56 \log d + [2,46 + 0,34 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

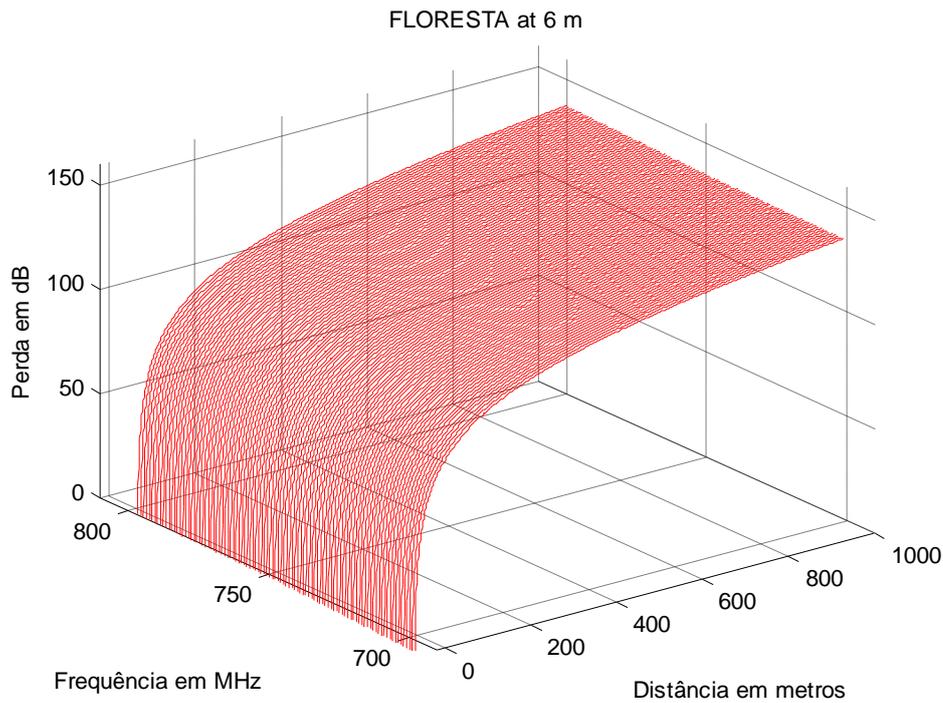


Figura 8.58 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 6 metros.

c) Altura de transmissão de 12 metros (fig. 8.59):

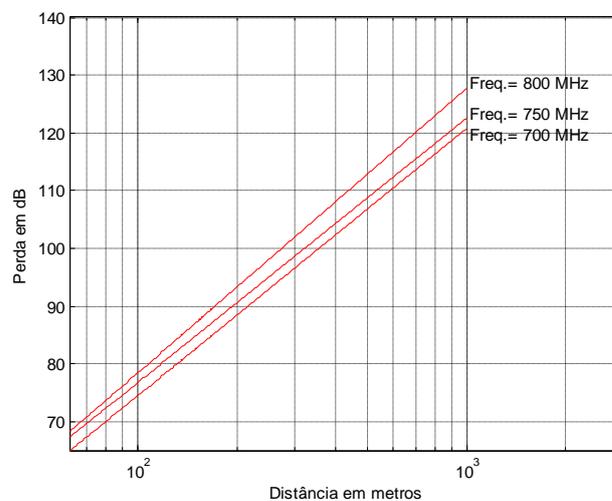


Figura 8.59 - Curvas de ajuste na altura de 12 metros, distância em escala log..

Interpolação (fig. 8.60):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L \text{ (dB)} = 120,68 + 46,23 \log d + [1,78 - 0,51 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L \text{ (dB)} = 122,46 + 45,72 \log d + [5,15 + 3,5 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

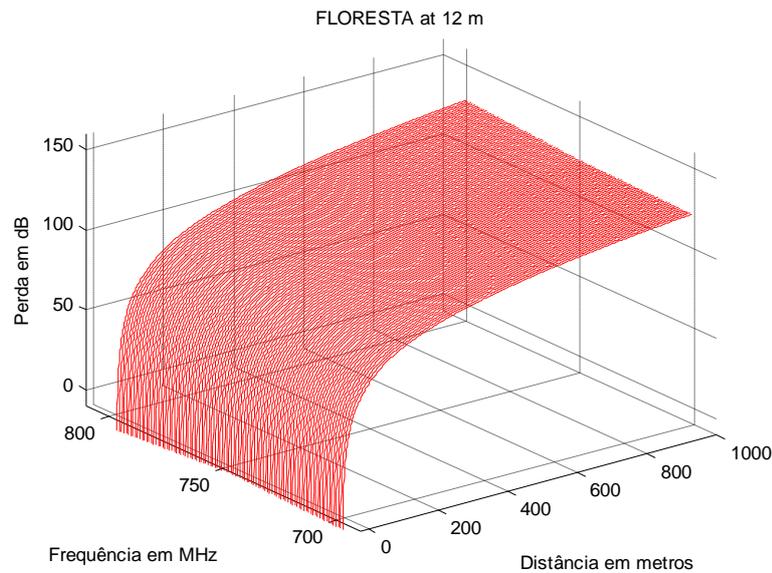


Figura 8.60 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 12 metros.

8.2.2

Ambiente bosque urbano

a) Altura de transmissão de 1,5 metro (fig. 8.61):

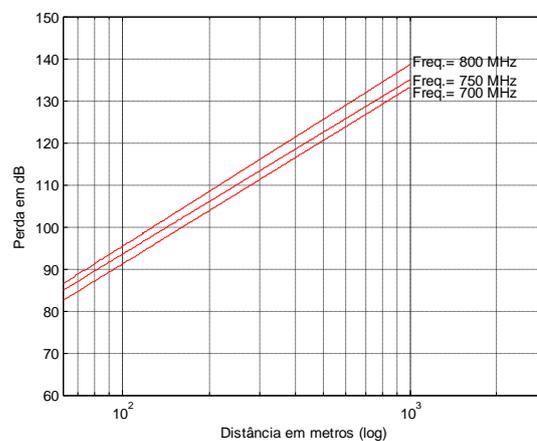


Figura 8.61 - Curvas de ajuste na altura de 1,5 metro.

Interpolação (fig. 8.62):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L \text{ (dB)} = 133,10 + 41,96 \log d + [1,79 - 0,57 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L \text{ (dB)} = 134,89 + 41,39 \log d + [3,58 + 1,71 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

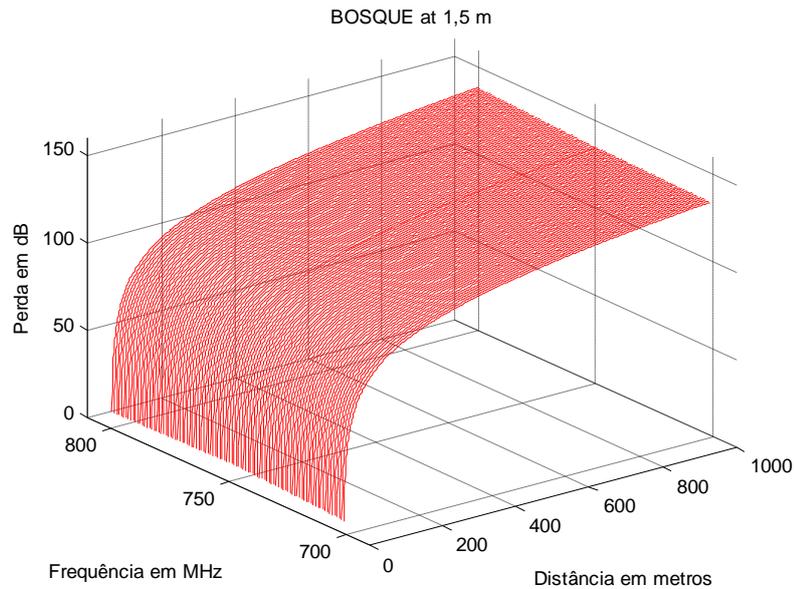


Figura 8.62 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 1,5 metro.

b) Altura de transmissão de 6 metros (fig. 8.63):

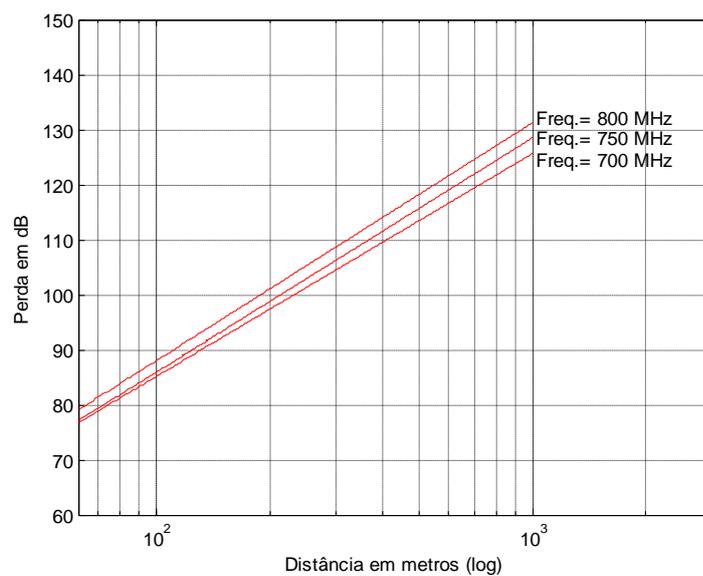


Figura 8.63 - Curvas de ajuste na altura de 6 metros.

Interpolação (fig. 8.64):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L \text{ (dB)} = 127,59 + 40,46 \log d + [0,85 + 2,07 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L \text{ (dB)} = 128,44 + 42,53 \log d + [2,74 + 0,64 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

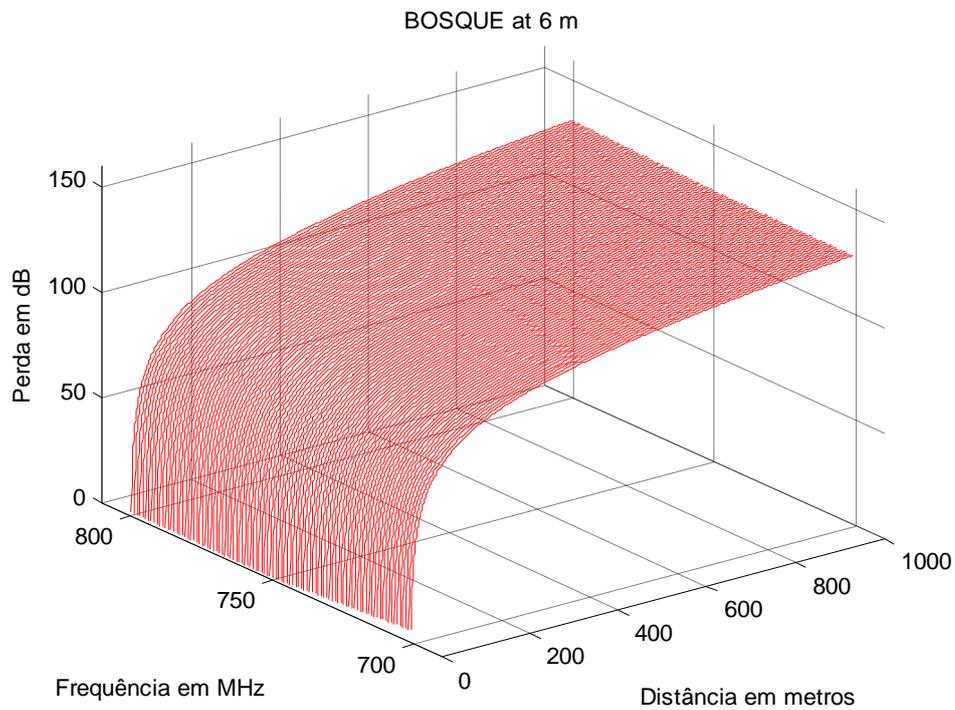


Figura 8.64 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 6 metros.

c) Altura de transmissão de 12 metros (fig. 8.65):

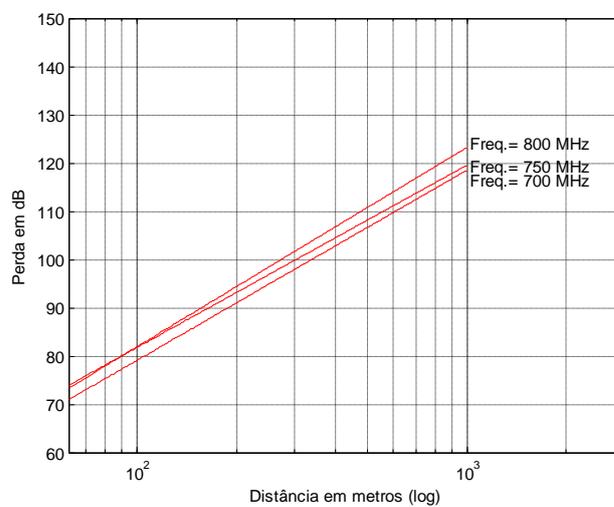


Figura 8.65 - Curvas de ajuste na altura de 12 metros.

Interpolação (fig. 8.66):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L (dB) = 118,42 + 39,33 \log d + [1,04 - 1,62 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L (dB) = 119,46 + 37,71 \log d + [3,68 + 3,53 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

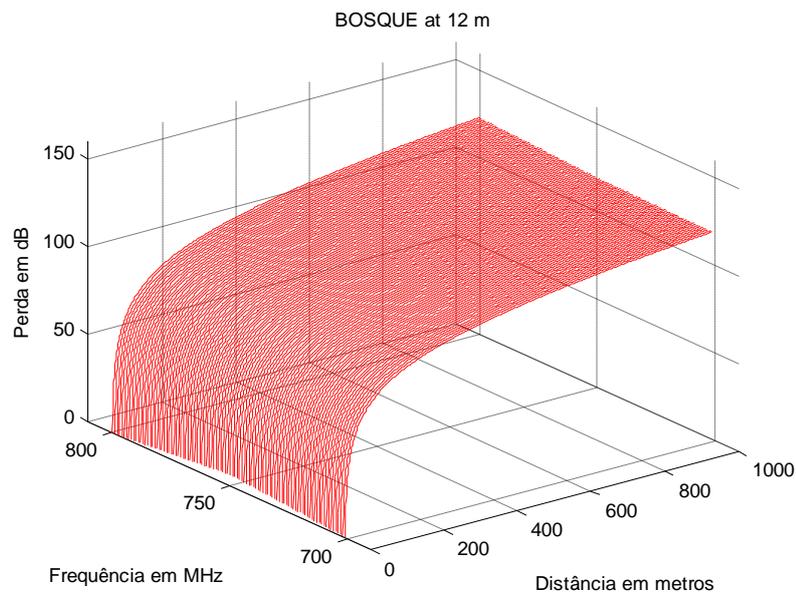


Figura 8.66 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 12 metros.

8.2.3

Ambiente linha de árvores

a) Altura de transmissão de 1,5 metro (fig. 8.67):

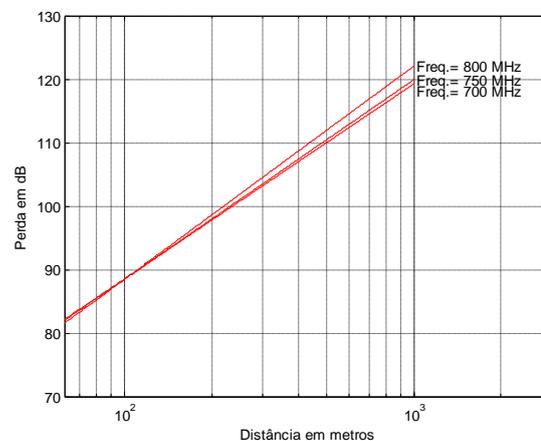


Figura 8.67 - Curvas de ajuste na altura de 1,5 metro, distância em escala log..

Interpolação (fig. 8.68):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L (dB) = 119,18 + 30,67 \log d + [0,67 + 0,69 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L (dB) = 119,85 + 31,36 \log d + [2,13 + 2,14 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

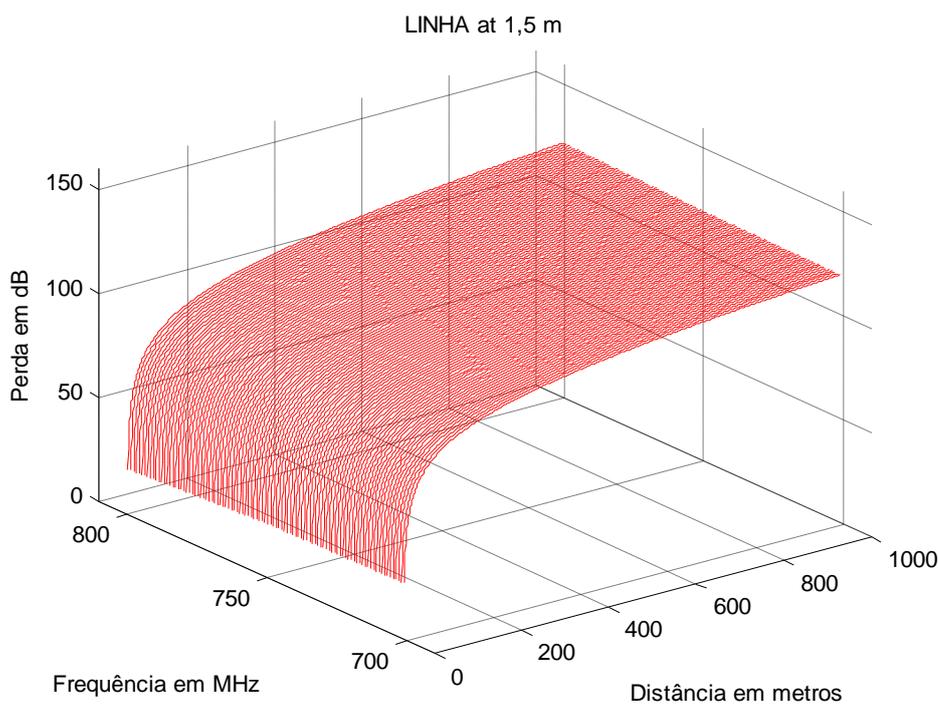


Figura 8.68 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 1,5 metro.

b) Altura de transmissão de 6 metros (fig. 8.69):

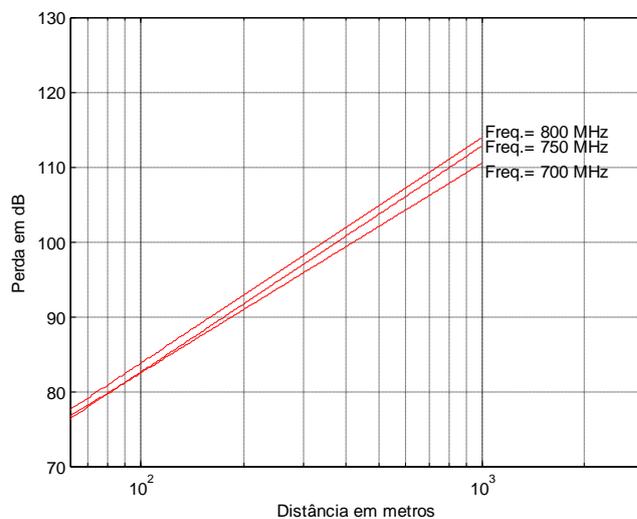


Figura 8.69 - Curvas de ajuste na altura de 6 metros, distância em escala log..

Interpolação (fig. 8.70):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L \text{ (dB)} = 110,43 + 27,97 \log d + [2,28 + 2,17 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L \text{ (dB)} = 112,71 + 30,14 \log d + [1,13 + 0,07 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

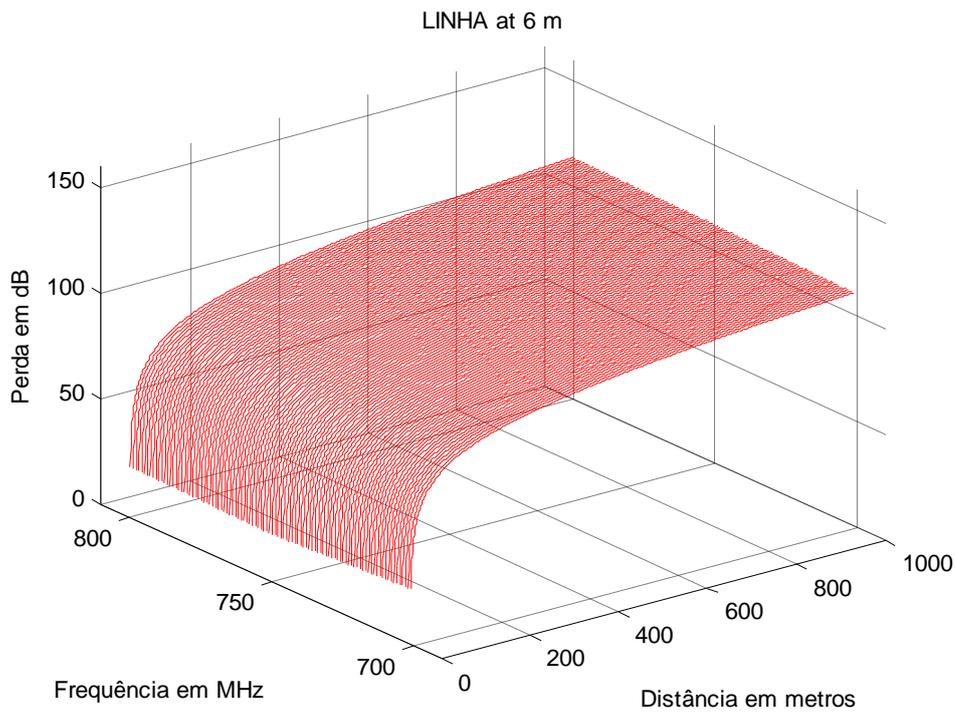


Figura 8.70 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 6 metros.

c) Altura de transmissão de 12 metros (fig. 8.71):

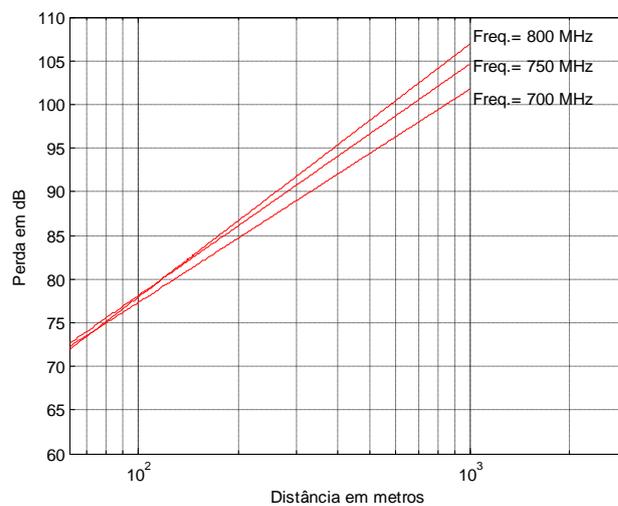


Figura 8.71 - Curvas de ajuste na altura de 12 metros, distância em escala log..

Interpolação (fig. 8.72):

$$\begin{cases} 700 \leq f < 750 : L (dB) = 103,70 + 24,39 \log d + [0,87 + 2,09 \log d] \left[\frac{f}{50} - 14 \right] \\ 750 \leq f \leq 800 : L (dB) = 104,57 + 26,48 \log d + [1,28 + 2,45 \log d] \left[\frac{f}{50} - 15 \right] \end{cases}$$

Com d em quilômetros e f em megahertz.

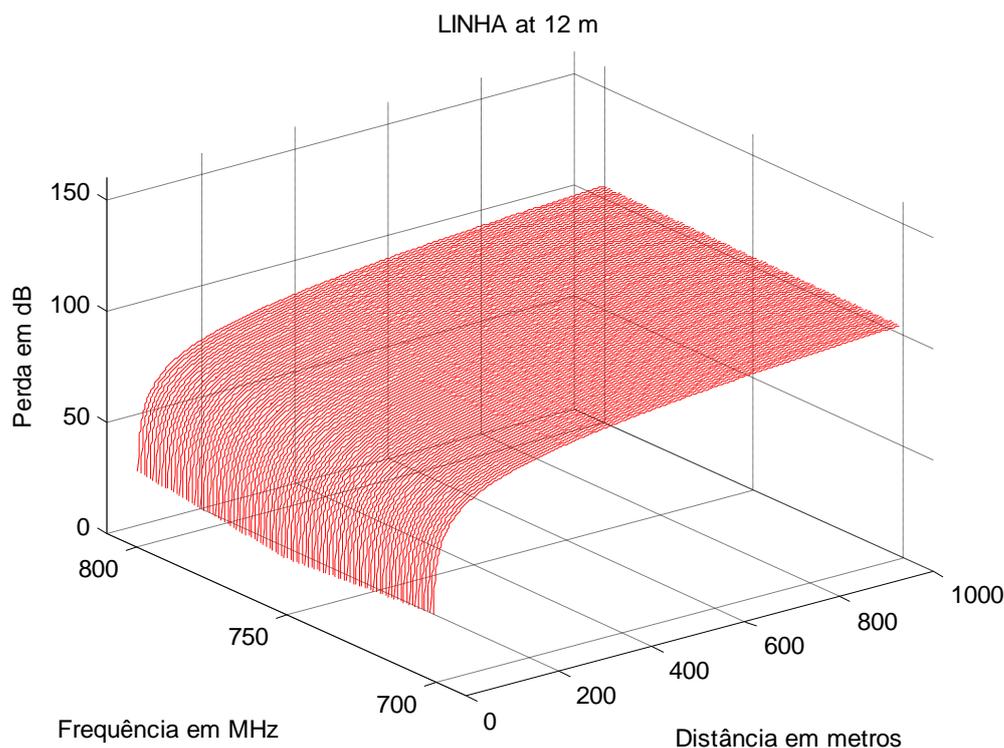


Figura 8.72 - Perda interpolada em função da distância e frequência, 12 metros.

Observa-se, independentemente da altura de transmissão, que a perda aumenta com a distância e com a frequência, com alguns desvios pontuais pouco representativos.

As funções da perda de propagação, interpoladas em função da distância e da frequência, oferecem uma solução contínua no intervalo de 700 MHz a 800 MHz para cada altura de transmissão.

8.2.4

Análise individual dos parâmetros da reta

Nesta seção será feita uma análise mais minuciosa sobre os parâmetros perda inicial e *slope* que caracterizam a reta logarítmica em função da variação da frequência. Inicialmente será estudado o efeito com a altura de transmissão fixa, para cada altura em cada morfologia e depois será feita um estudo geral em todas as alturas, onde será utilizada uma reta de melhor ajuste nas amostras, e verificado o tipo de dependência entre a perda e as frequências utilizadas com a intenção de caracterizar o efeito no intervalo contínuo entre 700 MHz e 800 MHz.

8.2.4.1

Floresta

a) Altura de transmissão de 1,5 metro..

a.1) Perda inicial em função da frequência (fig. 8.73):

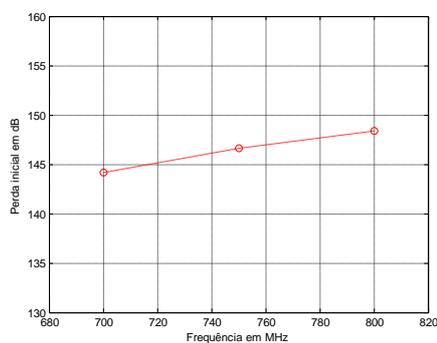


Figura 8.73 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 1,5 metro.

a.2) Slope em função da frequência (fig. 8.74):

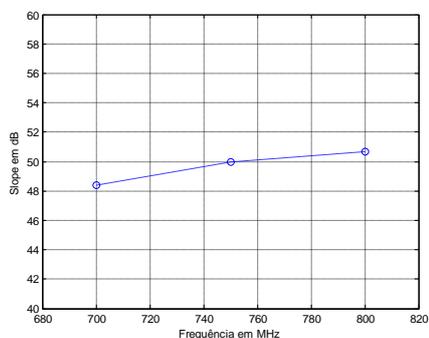


Figura 8.74 - Slope com a frequência de transmissão, 1,5 metro.

b) Altura de transmissão de 6 metros.

b.1) Perda inicial em função da frequência (fig. 8.75):

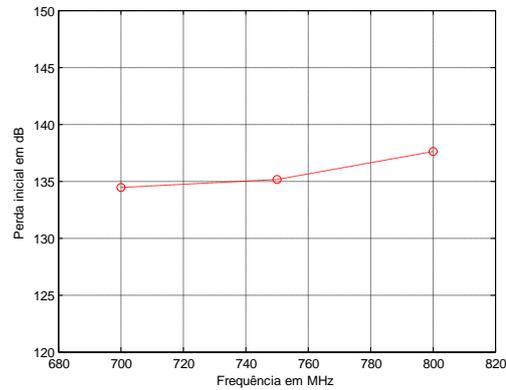


Figura 8.75 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 6 metros.

b.2) Slope em função da frequência (fig. 8.76):

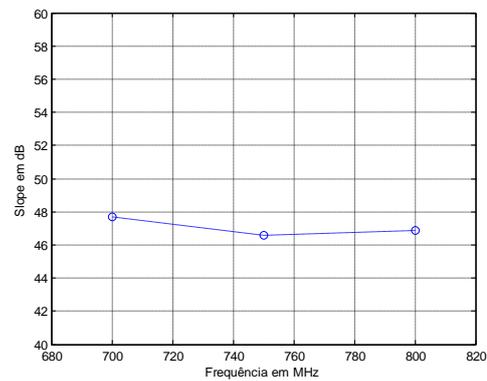


Figura 8.76 - Slope com a frequência de transmissão, 6 metros.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

c.1) Perda inicial em função da frequência (fig. 8.77):

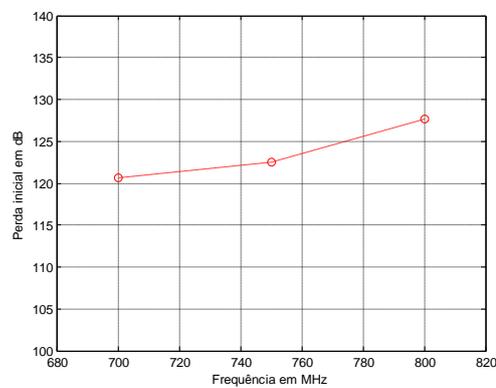


Figura 8.77 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 12 metros.

c.2) Slope em função da frequência (fig. 8.78):

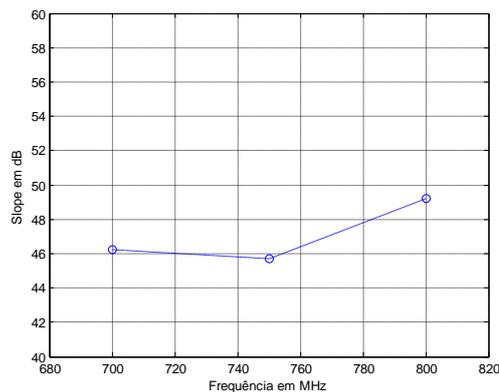


Figura 8.78 - Slope com a frequência de transmissão, 12 metros.

8.2.4.1.1

Análise geral da perda inicial para floresta

Nesta seção é analisado o comportamento do parâmetro perda inicial, para todas as alturas de transmissão, em função da frequência. A figura 8.79 deixa claro que L_0 é mais dependente da altura de transmissão. A variação nas frequências para uma mesma altura altera muito pouco a perda inicial. De qualquer forma é proposta uma reta de ajuste e com o auxílio da equação paramétrica da reta, que quantifica o parâmetro em função da frequência.

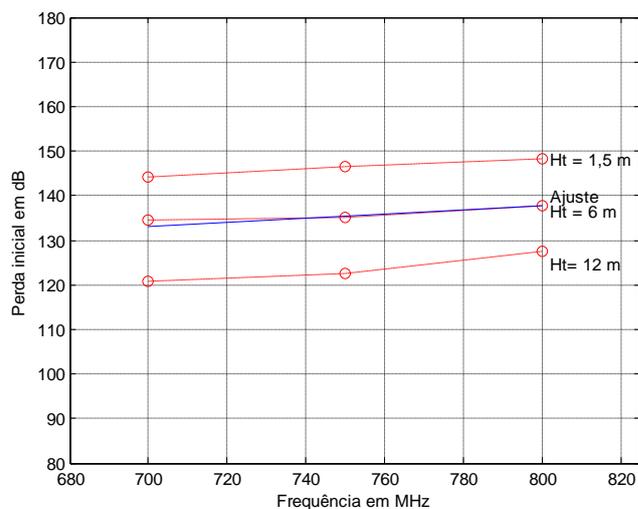


Figura 8.79 - Perda inicial com a frequência em todas as alturas de transmissão.

Reta de ajuste:

$$L_0(dB) = 0,0478 f(MHz) + 99,62 \quad (A)$$

A expressão acima é contínua na faixa de [700, 800] megahertz e pode ser usada para calcular o nível da atenuação inicial para as frequências utilizadas neste ambiente, ainda que com precisão menor que a reta interpolada, contudo com mais generalidade.

8.2.4.1.2

Análise geral do *slope* para floresta

Similarmente à seção anterior aqui é estudado os efeitos da frequência sobre o fator de atenuação com a distância. É utilizada a mesma métrica, e pode-se observar a pouca variação do *slope* com a frequência. Os resultados podem ser vistos na figura 8.80.

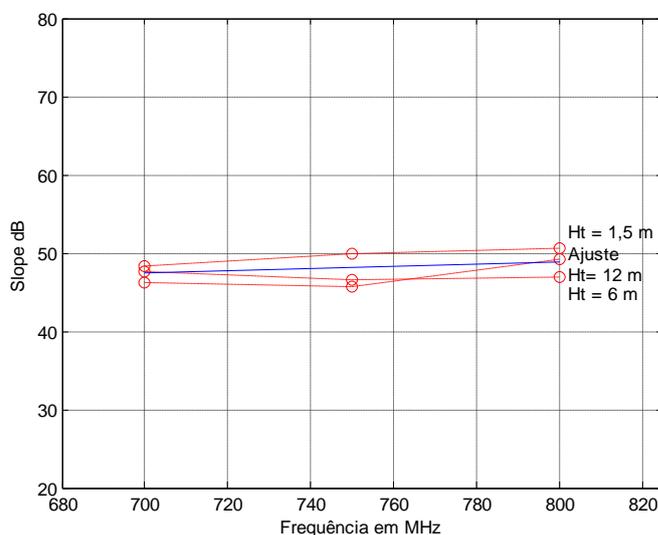


Figura 8.80 - *Slope* com a frequência em todas as alturas de transmissão.

Melhor ajuste:

$$\varphi(dB) = 0,015 f(MHz) + 36,93$$

A equação acima é contínua na faixa de [700, 800] megahertz e pode ser usada para calcular o nível do *slope* em função da frequência.

8.2.4.2

Bosque

a) Altura de transmissão de 1,5 metro.

a.1) Perda inicial em função da frequência, figura 8.81.

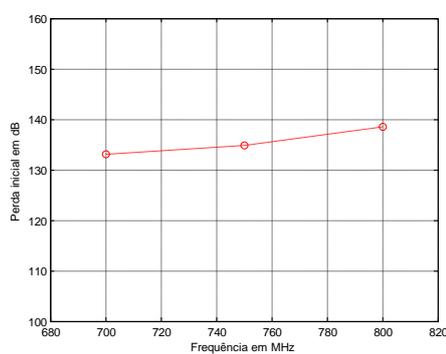


Figura 8.81 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 1,5 metro.

a.2) Slope em função da frequência, figura 8.82.

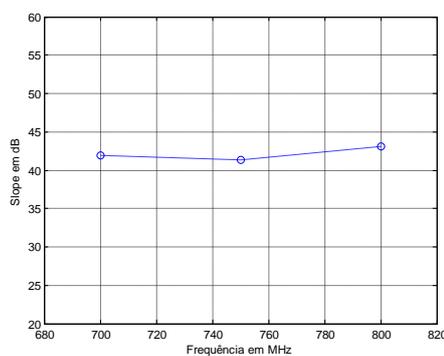


Figura 8.82 - Slope com a frequência de transmissão, 1,5 metro.

b) Altura de transmissão de 6 metros.

b.1) Perda inicial em função da frequência, figura 8.83.

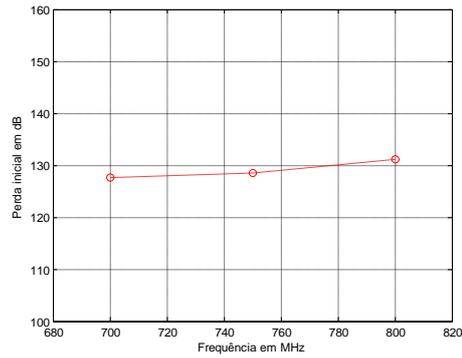


Figura 8.83 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 6 metros.

b.2) Slope em função da frequência, figura 8.84.

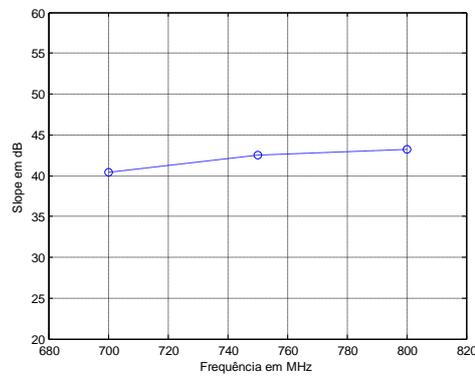


Figura 8.84 - Slope com a frequência de transmissão, 6 metros.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

c.1) Perda inicial em função da frequência, figura 8.85.

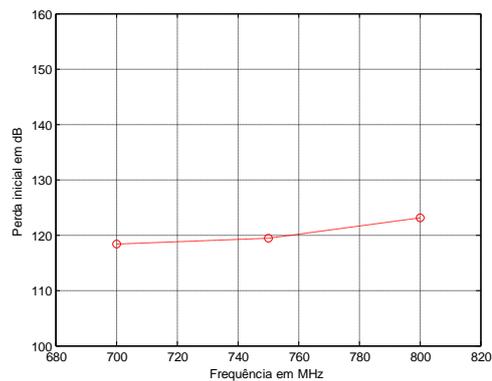


Figura 8.85 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 12 metros.

c.2) Slope em função da frequência, figura 8.86.

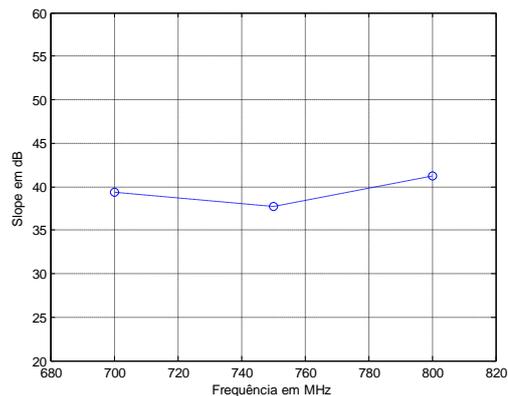


Figura 8.86 - Slope com a frequência de transmissão, 12 metros.

8.2.4.2.1

Análise geral da perda inicial para bosque

Nesta seção é analisado o comportamento do parâmetro perda inicial para a morfologia bosque. As mesmas métricas da floresta foram usadas aqui. Pode-se notar que a atenuação inicial neste ambiente também varia pouco com a frequência (fig. 8.87).

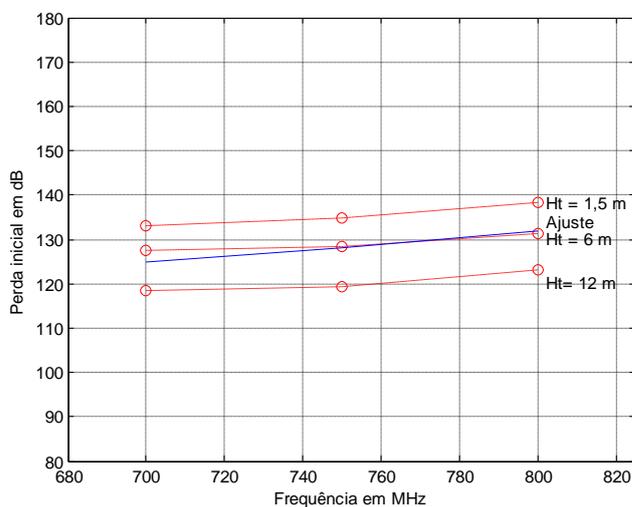


Figura 8.87 - Perda inicial com a frequência em todas as alturas de transmissão.

Reta de ajuste:

$$L_0(dB) = 0,085 f(MHz) + 65,5$$

A expressão acima é contínua na faixa de [700, 800] megahertz e pode ser usada para calcular o nível da atenuação inicial para as frequências utilizadas no neste ambiente.

8.2.4.2.2

Análise geral do *slope* para bosque

Pode-se observar a pouca variação do *slope* com a frequência. Os resultados podem ser vistos na figura 8.88.

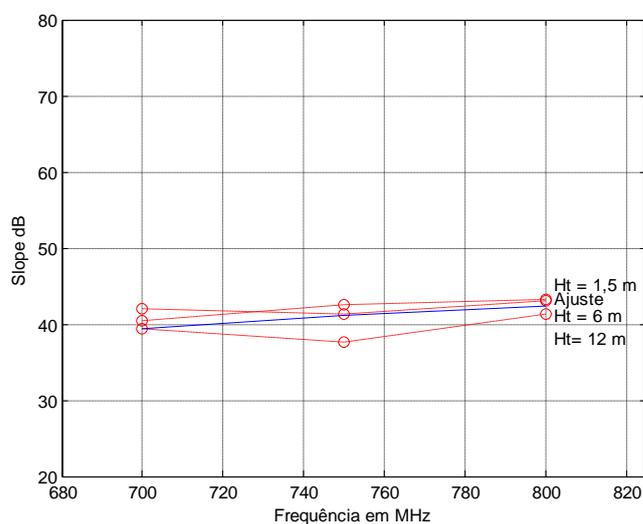


Figura 8.88 - *Slope* com a frequência em todas as alturas de transmissão.

Melhor ajuste:

$$\varphi(\text{dB}) = 0,0292 f(\text{MHz}) + 19,2$$

A equação acima é contínua na faixa de [700, 800] megahertz e pode ser usada para calcular o nível do *slope* em função da frequência.

8.2.4.3

Linha de árvores

a) Altura de transmissão de 1,5 metro.

a.1) Perda inicial em função da frequência (fig. 8.89)

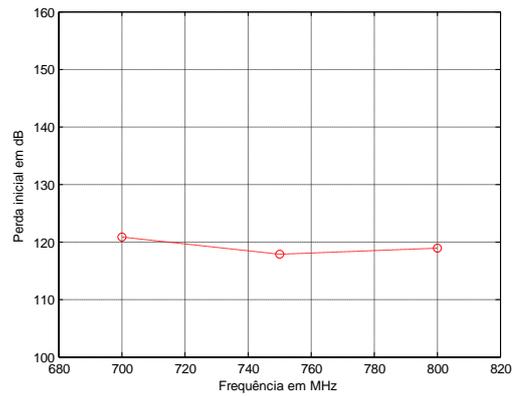


Figura 8.89 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 1,5 metro.

a.2) Slope em função da frequência, figura 8.90.

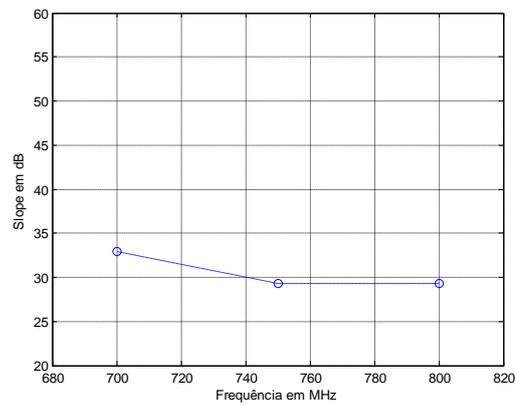


Figura 8.90 - Slope com a frequência de transmissão, 1,5 metro.

b) Altura de transmissão de 6 metros.

b.1) Perda inicial em função da frequência (fig. 8.91)

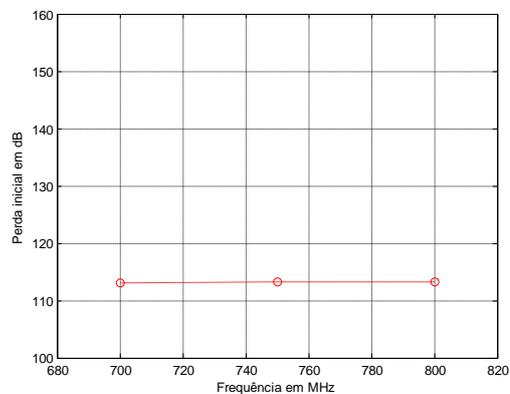


Figura 8.91 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 6 metros.

b.2) Slope em função da frequência, figura 8.92.

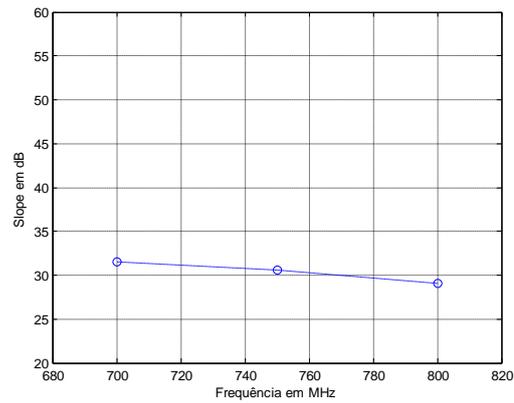


Figura 8.92 - Slope com a frequência de transmissão, 6 metros.

c) Altura de transmissão de 12 metros.

c.1) Atenuação inicial em função da frequência (fig. 8.93)

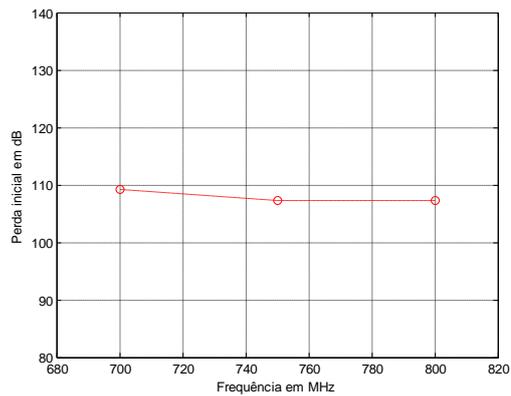


Figura 8.93 - Perda inicial com a frequência de transmissão, 12 metros.

c.2) Slope em função da frequência (fig. 8.94)

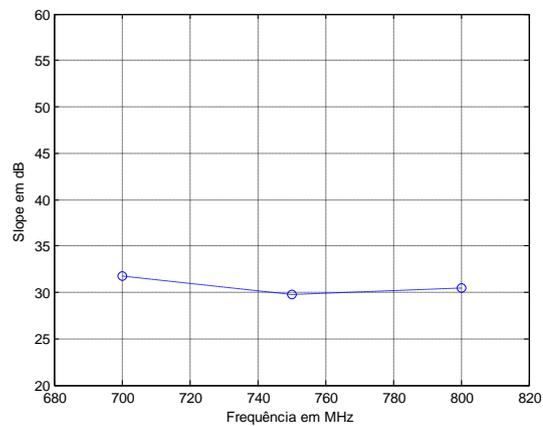


Figura 8.94 - Slope com a frequência de transmissão, 12 metros.

8.2.4.3.1

Análise geral da perda inicial para linha de árvores

A linha de árvores tem a mesma tendência de pouca variação da perda inicial com a frequência, figura 8.95.

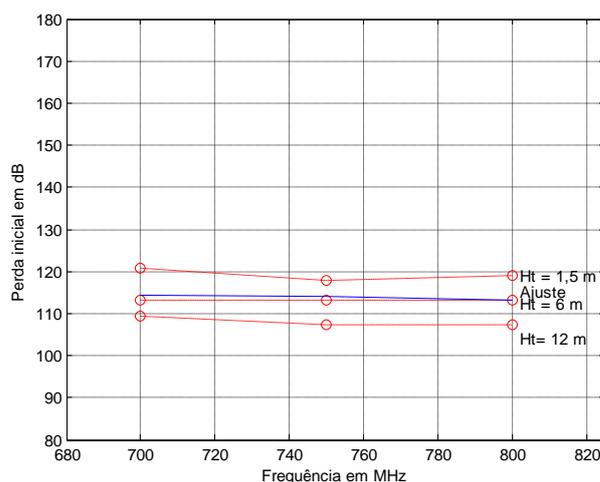


Figura 8.95 - Perda inicial com a frequência em todas alturas de transmissão.

Reta de ajuste:

$$L_0(dB) = -0,0124 f(MHz) + 123,05$$

A expressão acima é contínua na faixa de [700, 800] megahertz e pode ser usada para calcular o nível da atenuação inicial para as frequências utilizadas no neste ambiente.

8.2.4.3.2

Análise geral do *slope* para linha de árvores

Pode-se observar a pouca variação do *slope* com a frequência para esta morfologia. Os resultados podem ser vistos na figura 8.96.

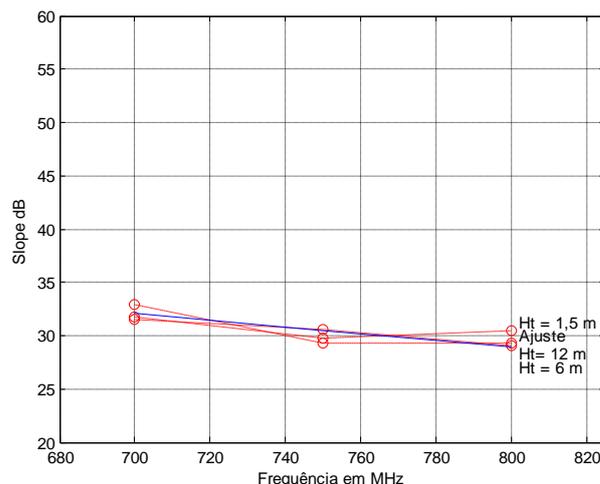


Figura 8.96 - *Slope* com a frequência em todas as alturas de transmissão.

Melhor ajuste:

$$\varphi(\text{dB}) = -0,0248 f(\text{MHz}) + 49,43$$

A equação acima é contínua na faixa de [700, 800] megahertz e pode ser usada para calcular o nível do *slope* em função da frequência.

8.3

Dependência da perda com a altura de transmissão

Nesta seção será avaliada a perda em função da altura de transmissão para cada morfologia. Espera-se que à medida que a altura de transmissão aumente a perda de propagação se comporte de maneira inversa. Um efeito que ocorre em ambientes vegetados diz respeito à mudança da geometria da propagação de vários mecanismos presentes no enlace em relação às estruturas vegetais.

Com a antena a 1,5 metro espera-se grande parte da energia propagante abaixo da linha das copas [28] onde há predominância de troncos absorvendo e espalhando a onda propagante. Com a antena a 6 metros o raio direto propaga-se, na dependência da espécie vegetal, principalmente pelas folhagens, que são obstáculos menos opacos que troncos. A 12 metros ou mais, na dependência da altura das árvores, o raio direto pode não sofrer muita influência de indivíduos mais baixos e espera-se menos difração na copa das árvores [28].

Em relação aos *sites* medidos, apenas no Inmetro a altura das árvores é da ordem de 12 metros, o que dificulta uma análise mais apurada. O tema será tratado com mais ênfase na análise de indivíduos isolados, onde os parâmetros estrutura vegetal e altura de transmissão estão mais bem caracterizados e com mais dados.

As morfologias serão analisadas em função da altura de transmissão em frequências fixas, onde os parâmetros perda inicial (L_0) e *slope* (ϕ) serão avaliados em métricas semelhantes as já utilizadas.

8.3.1

Ambiente floresta

a) Frequência de 700 MHz (fig. 8.97):

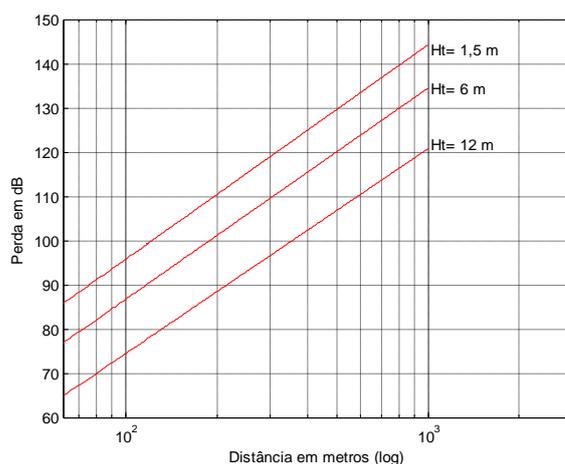


Figura 8.97 - Curvas de ajuste na frequência de 700 MHz.

a.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.98):

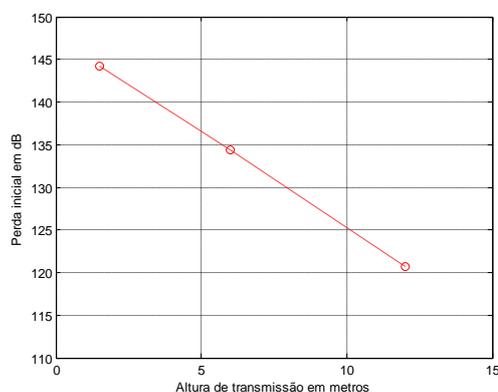


Figura 8.98 - Perda inicial com a altura de transmissão, 700 MHz.

a.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.99):

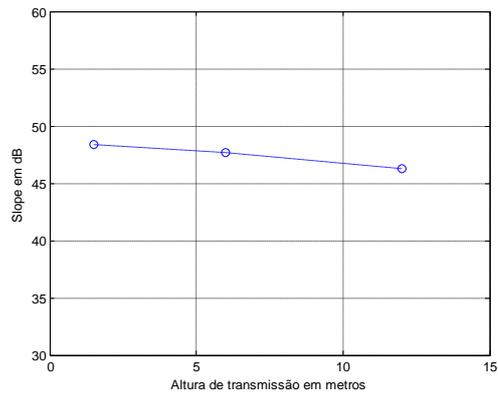


Figura 8.99 - Slope com a altura de transmissão, 700 MHz.

b) Frequência de 750 MHz (fig. 8.100):

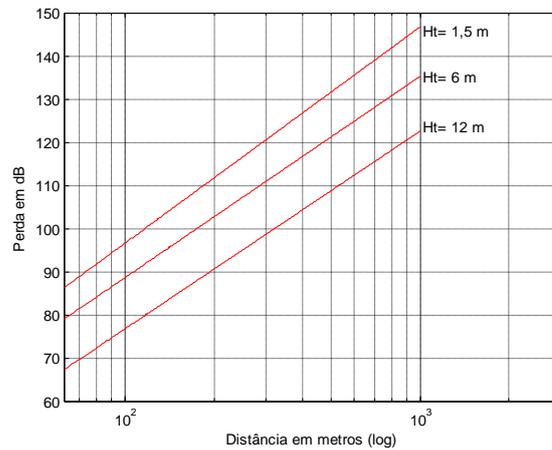


Figura 8.100 - Curvas de ajuste na frequência de 750 MHz.

b.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.101):

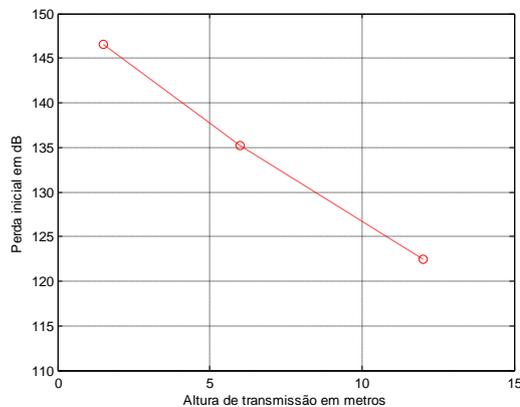


Figura 8.101 - Perda inicial com a altura de transmissão, 750 MHz.

b.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.102):

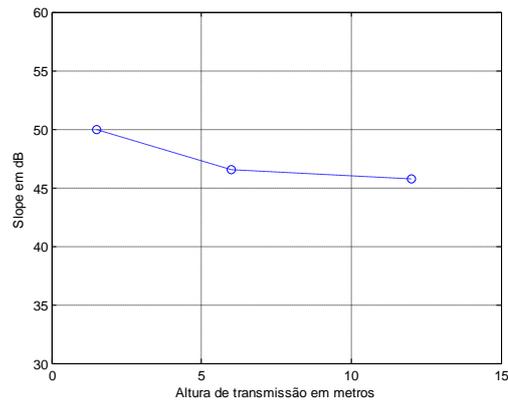


Figura 8.102 - Slope com a altura de transmissão, 750 MHz.

c) Frequência de 800 MHz (fig. 8.103):

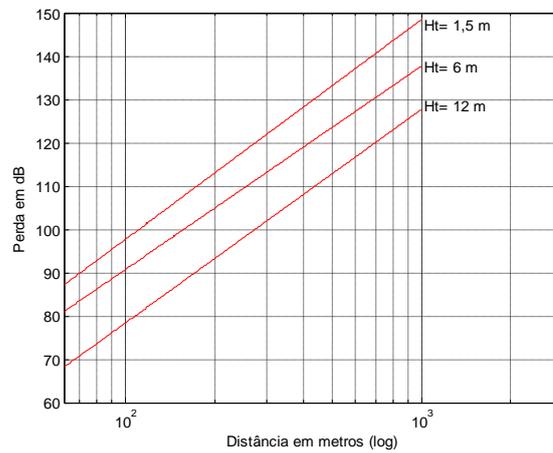


Figura 8.103 - Curvas de ajuste na frequência de 800 MHz.

c.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.104):

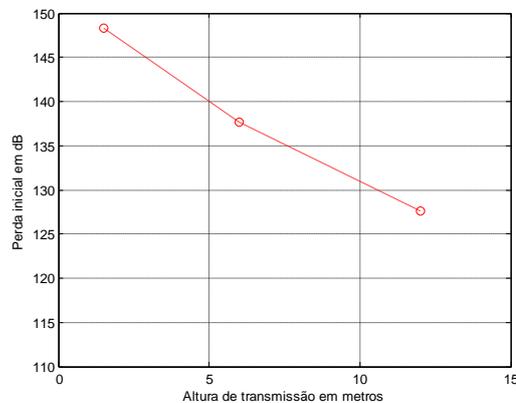


Figura 8.104 - Perda inicial com a altura de transmissão, 800 MHz.

c.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.105):

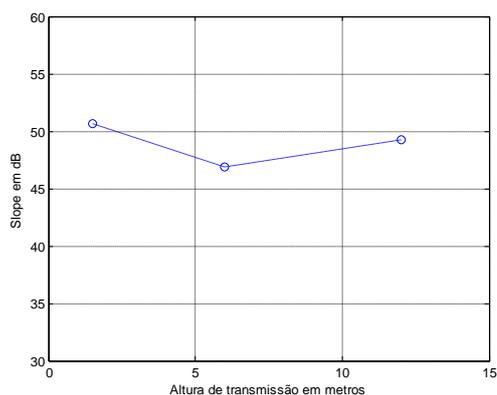


Figura 8.105 - *Slope* com a altura de transmissão, 800 MHz.

8.3.1.1

Análise geral da perda com a altura de transmissão para floresta

Pode-se verificar nitidamente a grande variação sofrida pela atenuação inicial e a pouca variação do *slope* nas diversas frequências. A altura das árvores no *site* é bem maior que 12 metros, assim em toda a faixa de alturas de transmissão medidas não houve expressiva mudança na geometria da propagação, o que reflete a pouca variabilidade do *slope*, que não mostra uma tendência clara. Em relação à atenuação inicial é clara a tendência de queda, que mostra um decaimento próximo ao linear.

Tal comportamento pode ser verificado em vários modelos de perda em propagação, onde o termo que relaciona a altura de transmissão com a perda não modifica o *slope* do modelo, apenas acrescenta um ganho à perda.

Com a intenção de caracterizar a perda no intervalo contínuo de 1,5 a 12 metros de altura de transmissão, será feita uma análise geral da perda inicial e *slope* com o uso de curva de melhor ajuste do tipo linear.

a) Atenuação inicial em todas as frequências e reta de melhor ajuste (fig. 8.106):

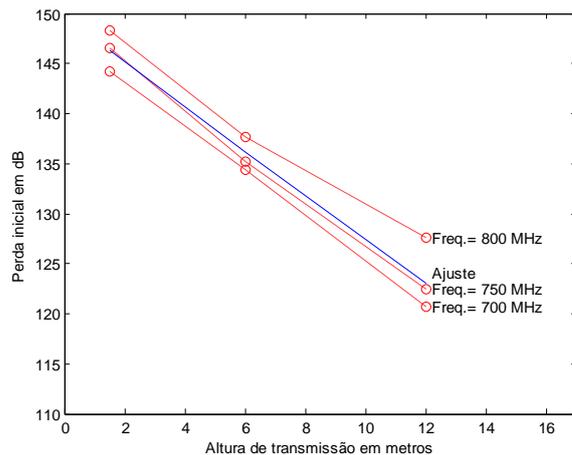


Figura 8.106 - Perda inicial com a altura de transmissão e reta de ajuste.

Reta de ajuste:

$$L_0(\text{dB}) = 149,7 - 2,22h_t(\text{m}) \quad (\text{B})$$

A perda inicial calculada a partir da reta de ajuste para a altura de transmissão de 1,5 metro é 146,37 dB e o seu valor para 12 metros é 123,05 dB, uma excursão de -23,32 dB na faixa de alturas.

É simples demonstrar que o aumento na altura de transmissão representa uma diminuição na perda de propagação. A expressão é contínua na faixa de [1,5, 12] metros e pode ser usada para calcular o nível da atenuação inicial em todas as frequências utilizadas.

b) *Slope* em todas as frequências e reta de melhor ajuste (fig. 8.107):

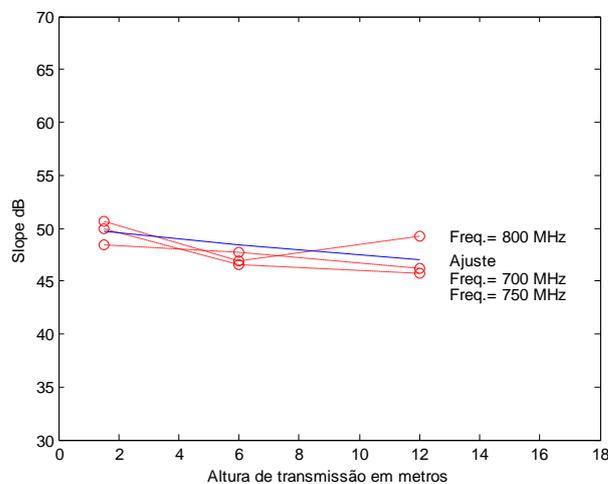


Figura 8.107 - *Slope* com a altura de transmissão e reta de ajuste.

Reta de ajuste:

$$\varphi(\text{dB}) = -0,251 h_t(\text{m}) + 50,06$$

A reta de melhor ajuste para o *slope* em função da altura mostra uma leve tendência de queda com a altura de transmissão.

8.3.2

Ambiente bosque

a) Frequência de 700 MHz (fig. 8.108):

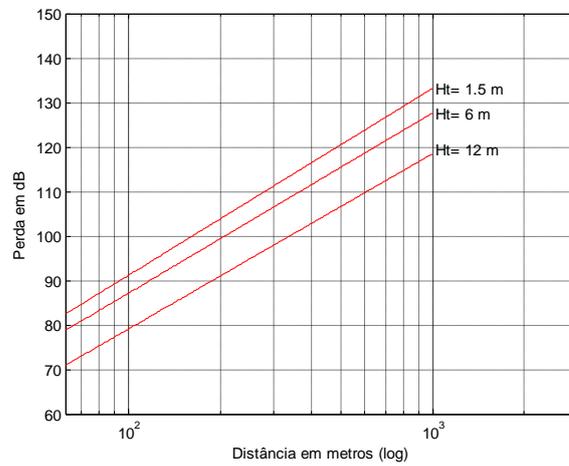


Figura 8.108 - Curvas de ajuste na frequência de 700 MHz.

a.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.109):

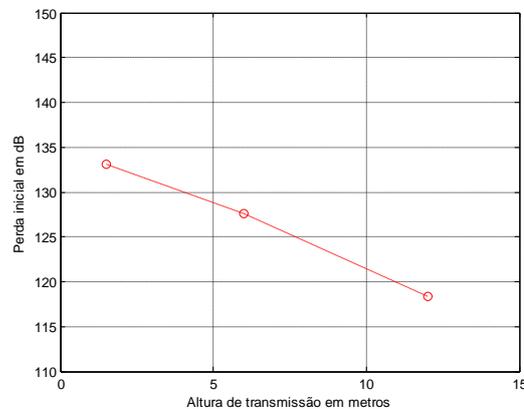


Figura 8.109 - Perda inicial com a altura de transmissão, 700 MHz.

a.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.110):

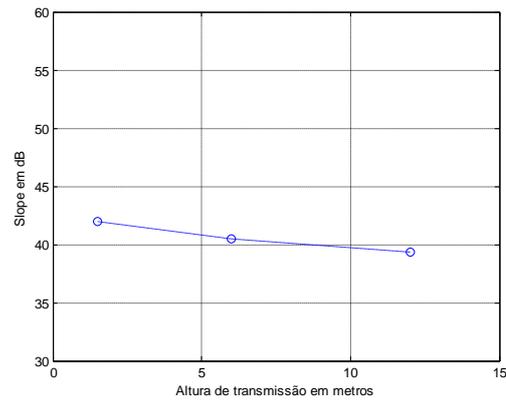


Figura 8.110 - Slope com a altura de transmissão, 700 MHz.

b) Frequência de 750 MHz (fig. 8.111):

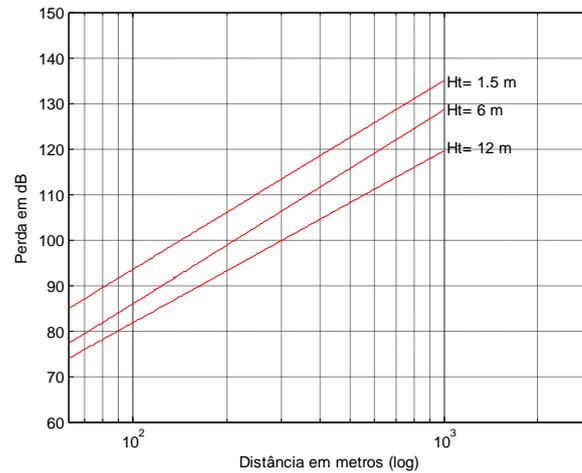


Figura 8.111 - Curvas de ajuste na frequência de 750 MHz.

b.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.112):

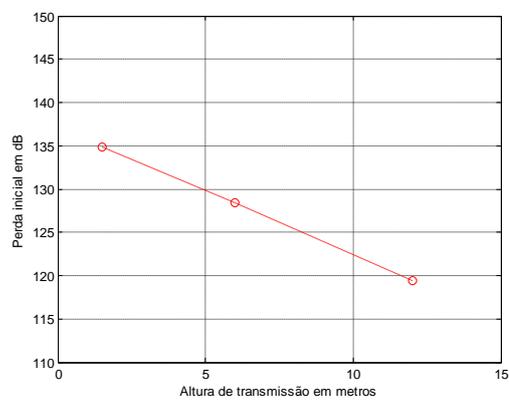


Figura 8.112 - Perda inicial com a altura de transmissão, 750 MHz.

b.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.113):

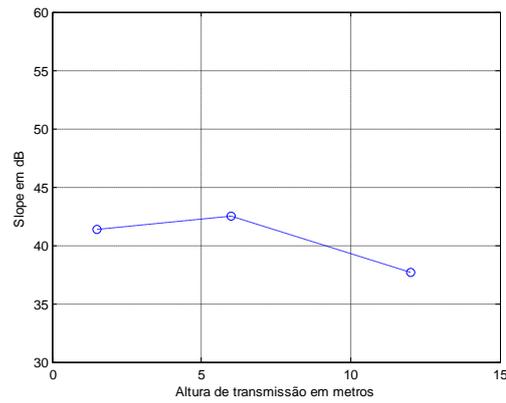


Figura 8.113 - Slope com a altura de transmissão, 750 MHz.

c) Frequência de 800 MHz (fig. 8.114):

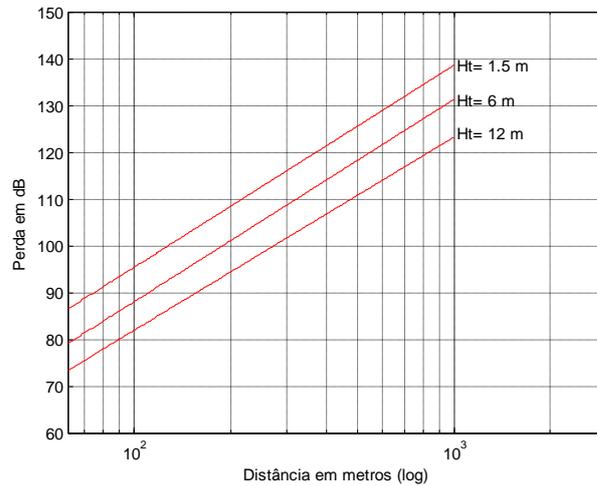


Figura 8.114 - Curvas de ajuste na frequência de 800 MHz.

c.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.115):

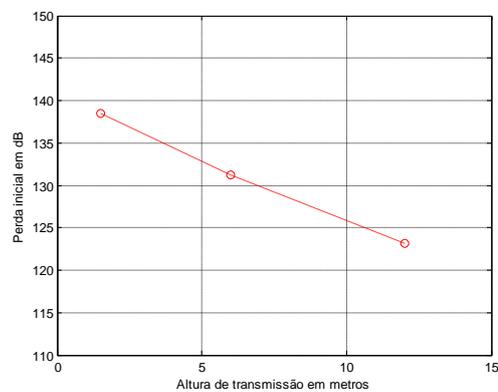


Figura 8.115 - Perda inicial com a altura de transmissão, 800 MHz.

c.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.116):

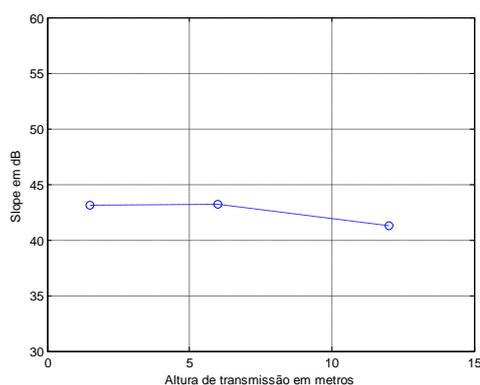


Figura 8.116 - Slope com a altura de transmissão, 800 MHz.

As mesmas considerações e tendências podem ser observadas neste ambiente, em virtude de suas semelhanças.

8.3.2.1

Análise geral da perda com a altura de transmissão para bosque

Será feita uma análise nas mesmas métricas utilizadas para a floresta.

a) Atenuação inicial em todas as frequências e reta de melhor ajuste (fig. 8.117):

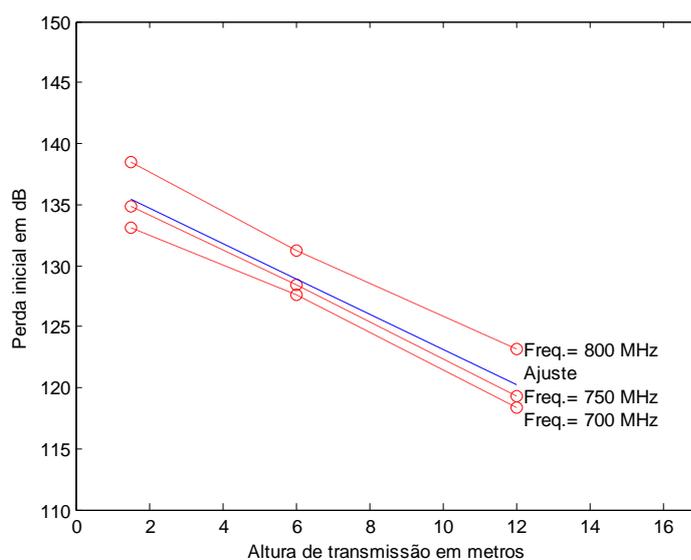


Figura 8.117 - Perda inicial com a altura de transmissão e reta de ajuste.

Reta de ajuste:

$$L_0(dB) = 137,65 - 1,44h_t(m)$$

A perda inicial calculada a partir da reta de ajuste para a altura de transmissão de 1,5 metro é 135,48 dB e o seu valor para 12 metros é 120,27 dB, uma excursão de -15,21 dB na faixa de alturas, mais baixa que a encontrada na floresta.

b) *Slope* em todas as frequências e reta de melhor ajuste (fig. 8.118):

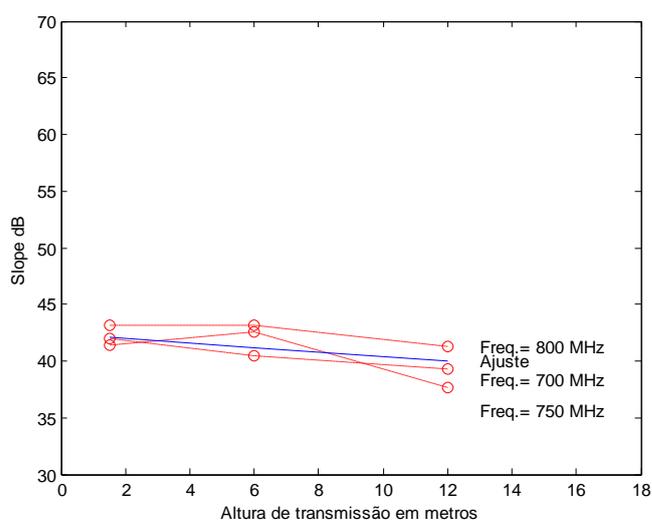


Figura 8.118 - *Slope* com a altura de transmissão e reta de ajuste.

Reta de ajuste:

$$\varphi(dB) = -0,204 h_t(m) + 42,45$$

A reta de melhor ajuste para o *slope* em função da altura mostra uma leve tendência de queda com a altura de transmissão, analogamente à floresta.

8.3.3

Ambiente linha de árvores

a) Frequência de 700 MHz (fig. 8.119):

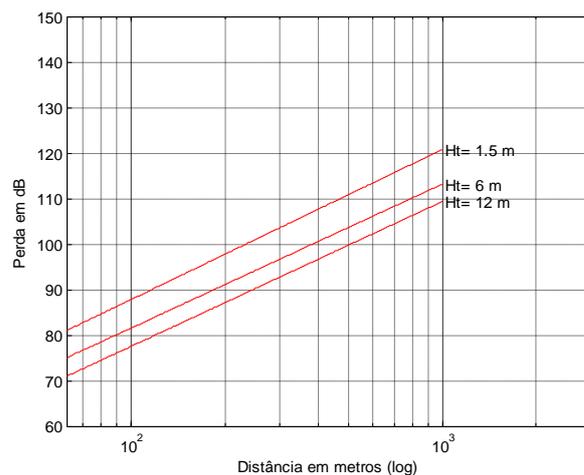


Figura 8.119 - Curvas de ajuste na frequência de 700 MHz.

a.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.120):

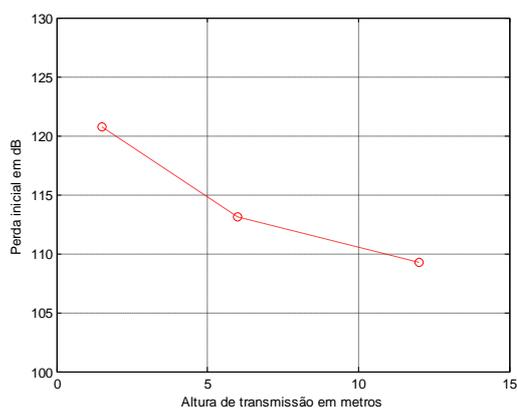


Figura 8.120 - Perda inicial com a altura de transmissão, 700 MHz.

a.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.121):

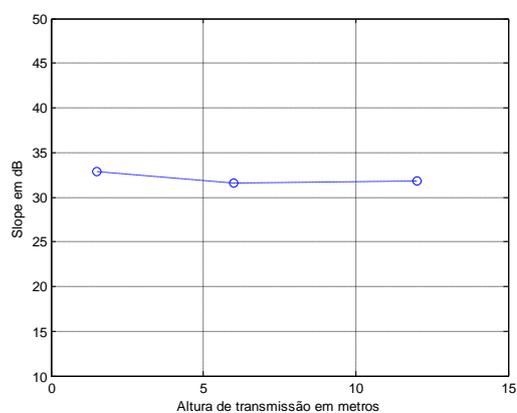


Figura 8.121 - Slope com a altura de transmissão, 700 MHz.

b) Frequência de 750 MHz (fig. 8.122):

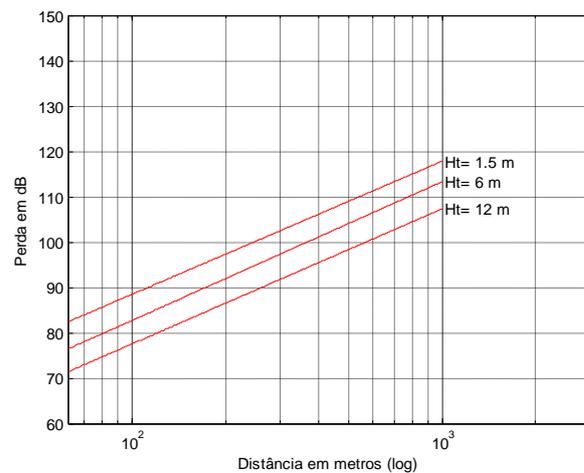


Figura 8.122 - Curvas de ajuste na frequência de 750 MHz.

b.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.123):

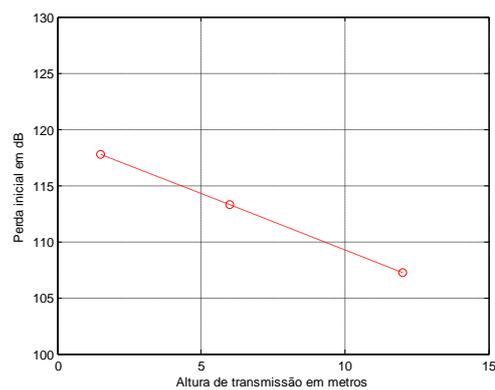


Figura 8.123 - Perda inicial com a altura de transmissão, 750 MHz.

b.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.124):

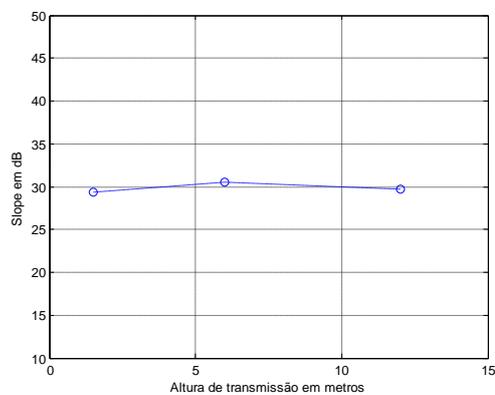


Figura 8.124 - Slope com a altura de transmissão, 750 MHz.

c) Frequência de 800 MHz (fig. 8.125):

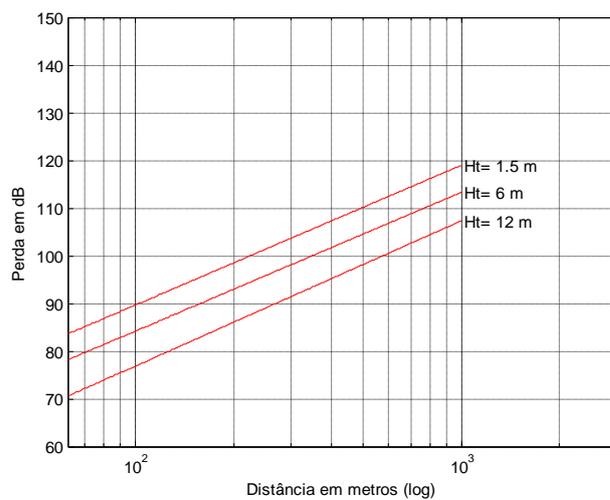


Figura 8.125 - Curvas de ajuste na frequência de 800 MHz.

c.1) Atenuação inicial em relação as alturas de transmissão (fig. 8.126):

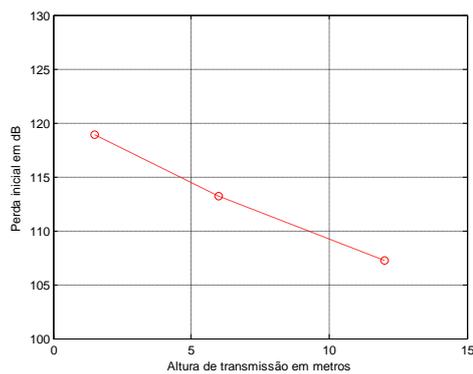


Figura 8.126 - Perda inicial com a altura de transmissão, 800 MHz.

c.2) Atenuação com a distância em relação as alturas de transmissão (fig. 8.127):

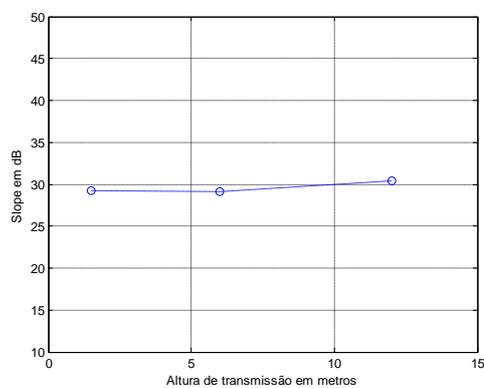


Figura 8.127 - Slope com a altura de transmissão, 800 MHz.

O ambiente linha de árvores comporta-se como o esperado. Será feita uma análise nas mesmas métricas da seção anterior.

8.3.3.1

Análise geral da perda com a altura de transmissão para linha de árvores

O ambiente linha de árvores comporta-se de forma muito semelhante com os outros ambientes estudados. Será feita uma análise nas mesmas métricas da seção anterior.

a) Atenuação inicial em todas as frequências e reta de melhor ajuste (fig. 8.128):

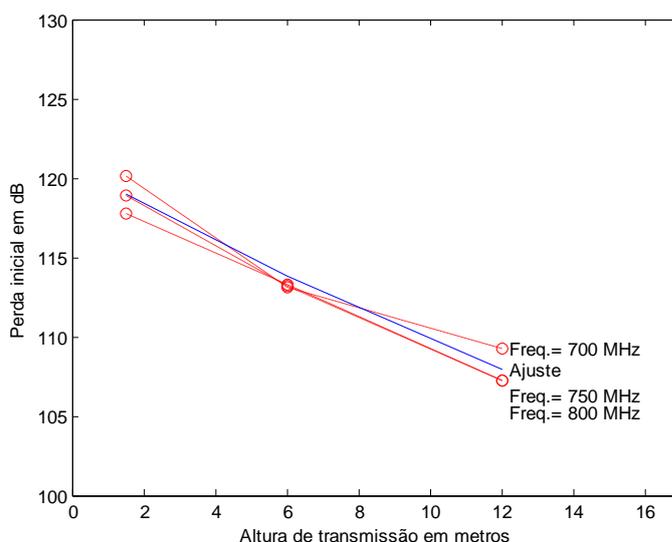


Figura 8.128 - Perda inicial com a altura de transmissão e reta de ajuste.

Reta de ajuste:

$$L_0(dB) = 120,54 - 1,05h_t(m)$$

A perda inicial calculada a partir da reta de ajuste para a altura de transmissão de 1,5 metro é 135,48 dB e o seu valor para 12 metros é 120,27 dB, uma excursão de -11,02 dB na faixa de alturas, mais baixa que a encontrada na floresta e no bosque.

b) *Slope* em todas as frequências e reta de melhor ajuste (fig. 8.129):

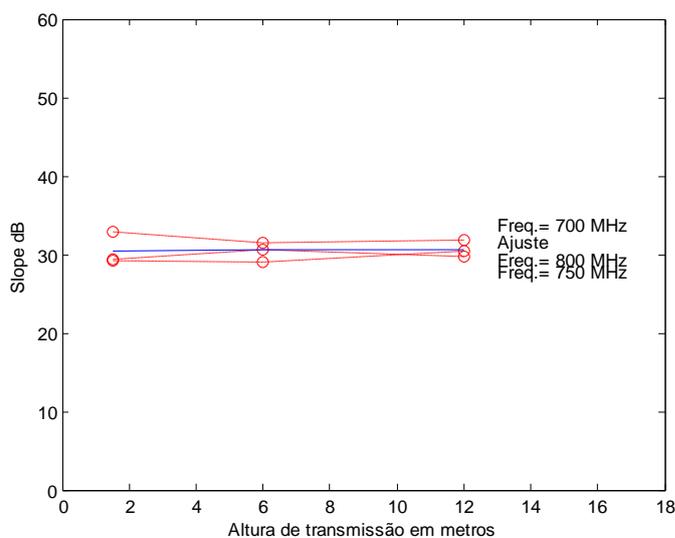


Figura 8.129 - *Slope* com a altura de transmissão e reta de ajuste.

Reta de ajuste:

$$\varphi(dB) = 0,0142 h_t(m) + 30,46$$

A reta de melhor ajuste para o *slope* em função da altura mostra uma leve tendência de aumento, praticamente nulo com a altura de transmissão.

8.4

Considerações sobre as estatísticas do sinal nos ambientes

O nível de sinal recebido em um ponto é proveniente da composição dos vários mecanismos de propagação. Em ambientes vegetados, onde existe grande variedade de estruturas distribuídas aleatoriamente, a perfeita caracterização destes mecanismos e suas contribuições é uma tarefa bastante complexa, o que motiva a sua análise estatística.

Nesta seção, serão avaliadas as estatísticas de erro absoluto médio e desvio padrão absoluto médio dos dados coletados nas medições para cada morfologia.

8.4.1

Morfologia floresta

O erro médio na floresta está em patamares relativamente altos, o que pode estar associado à grande quantidade de espalhadores de energia [39]. Observando a análise da perda com a distância, neste ambiente, é possível notar que à medida que a distância aumenta, podem-se esperar erros maiores em virtude do maior espalhamento. A alta diretividade das antenas utilizadas atua de forma similar a um filtro espacial na medida em que capta com maior ganho os multipercursos que chegam à faixa de cobertura do diagrama de irradiação. No diagrama de dispersão do erro médio não é possível observar nenhuma tendência clara (fig. 8.130).

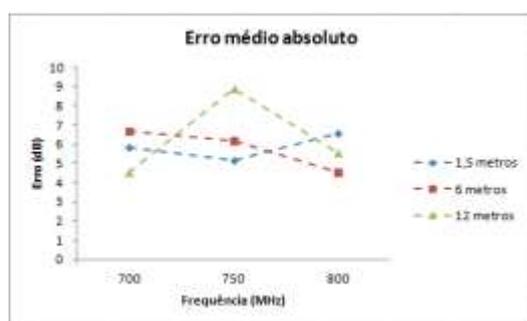


Figura 8.130 - Dispersão do erro com a frequência, para todas as alturas.

O desvio padrão também apresenta valores elevados e pode-se observar leve tendência de aumento com a frequência e com a altura de transmissão. Os valores altos do desvio em geral são associados a níveis mais baixos de sinal, que ficam mais sujeitos ao ruído térmico e sofrem mais variação com os multipercursos [39] (fig. 8.131).

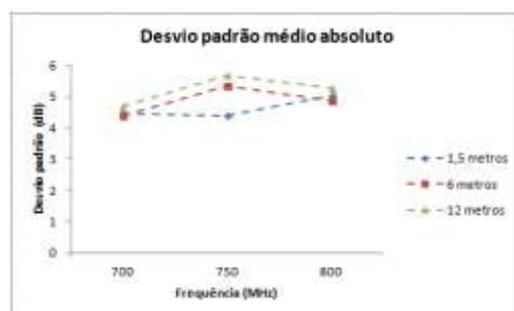


Figura 8.131 - Dispersão do desvio padrão com a frequência, para todas as alturas.

8.4.2

Morfologia bosque

Para o bosque o erro está em patamares relativamente altos, revelando certa semelhança com a floresta. Pode-se observar leve tendência de aumento com a frequência e com a altura de transmissão (fig. 8.132).

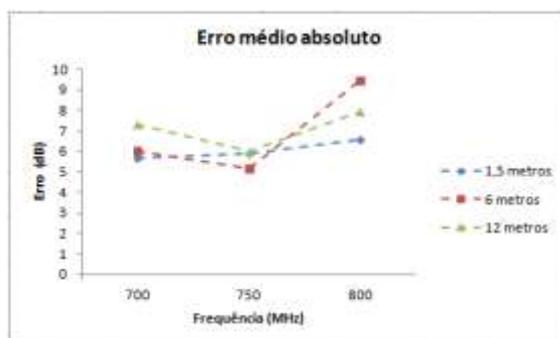


Figura 8.132 - Dispersão do erro com a frequência, para todas as alturas.

O desvio padrão médio absoluto não segue uma tendência clara (fig. 8.133). É possível observar que na frequência de 750 MHz o erro e o desvio têm valores relativamente mais baixos, revelando um comportamento anômalo ou possível erro de medição. As estatísticas são tomadas com base em todas as amostras em determinadas frequência e altura de transmissão, o que tem um efeito de suavização das ocorrências isoladas, que se diluem no cálculo das médias. A proximidade dos valores das frequências amostradas e a relativamente baixa variação na altura de transmissão, torna mais difícil a interpretação dos dados na medida em que aproxima os resultados obtidos, enquanto excursões maiores destes parâmetros provavelmente indicariam tendências mais claras.

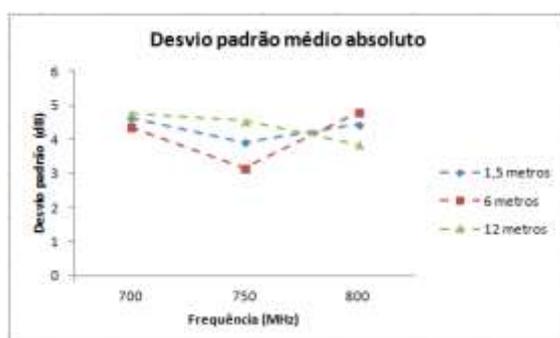


Figura 8.133 - Dispersão do desvio padrão com a frequência, para todas as alturas.

8.4.3

Morfologia linha de árvores

Nesta morfologia, os valores do erro e desvio padrão estão em patamares mais baixos que nas outras. O erro e o desvio possuem leve tendência de aumento com a frequência e com a altura, figuras 8.134 e 8.135.

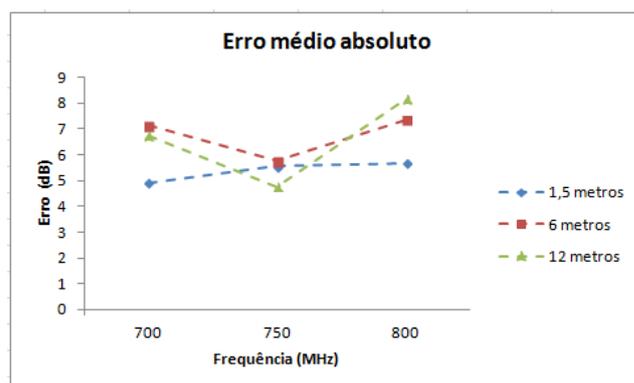


Figura 8.134 - Dispersão do erro com a frequência, para todas as alturas.

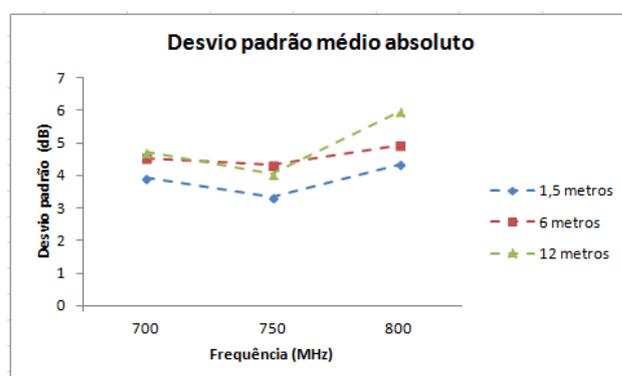


Figura 8.135 - Dispersão do desvio padrão com a frequência, para todas as alturas.

8.5

Espécimes isolados

Nesta seção, será abordado o caso da propagação nas proximidades de uma árvore isolada com a intenção de analisar e quantificar seus efeitos sobre a propagação na faixa de interesse.

Dois casos foram analisados: um Jambeiro (*Sygygium malaccense*), árvore de boa distribuição no Brasil, com altura de 10,5 metros, diâmetro do tronco de 0,33 metro e altura até a copa de 2,5 metros. O Jambeiro analisado possuía boa copa com folhas elipsóides de comprimento aproximado de 20 centímetros.

O segundo espécime foi um Cajazeiro (*Spondias mombin*), árvore de bom porte com, aproximadamente, 25 metros de altura, diâmetro do tronco de 0,58 metro e altura até a copa de, aproximadamente, 18 metros e possui pouca copa com folhas pequenas.

Ambos os espécimes estão plantados isolados, sem construções ou outras árvores nas proximidades e em terreno plano. As medições foram tomadas à altura de transmissão de 1,5 metro, 6 metros e 12 metros nas frequências de 700 MHz, 750 MHz e 800 MHz. A antena de transmissão foi posicionada a 40 metros do tronco e a linha de maior diretividade foi posicionada de forma a interceptar o espécime. A antena de recepção foi posicionada a 38 metros a partir do transmissor, antes da obstrução, depois a 41 metros, após o tronco (1 metro após o tronco), e em seguida 50 metros, 60 metros, 70 metros e 80 metros, sempre à altura de 1,5 metro. O arranjo pode ser visto na figura 8.136.



Figura 8.136 - Medição na espécie isolada.

Com a intenção de manter a antena de recepção na zona de boa cobertura quando da utilização de transmissão a 12 metros, foi usado um *donwtilt* de 20 graus. Devido à incapacidade do analisador de espectro efetuar leituras de potência acima de 0 dBm e o amplificador ser de potência de saída fixa de 20 Watts, foi utilizado um atenuador de 30 dB (fig. 8.137), para manter o sinal no intervalo de leitura.



Figura 8.137 - Atenuador de potência.

A análise concentra-se na caracterização da perda em propagação provocada nas proximidades do espécime. A variação na altura de transmissão possibilita melhor caracterização da perda em função da mudança de geometria da propagação e estruturas vegetais (troncos, copas) enfrentada pelos mecanismos de propagação, notadamente o raio direto.

8.5.1

Jambeiro

a) Altura de transmissão de 1,5 metro:

Nesta altura de transmissão e considerando os principais mecanismos de propagação nesta faixa, tem-se a geometria representada, simplificada, na figura 8.138.

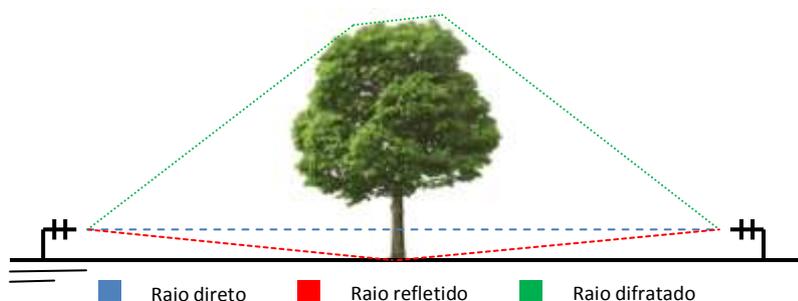


Figura 8.138 - Geometria simplificada.

Embora a ilustração acima seja uma representação bastante simplificada do problema, pode-se notar o raio direto interceptando o tronco, sofrendo absorção e difração, o mesmo acontecendo com o raio refletido. A copa atua espalhando e difratando a energia que se propaga. Este arranjo não se modifica à medida que a recepção é tomada com distâncias maiores. Os valores da atenuação medidos em todas as frequências podem ser vistos na figura 8.139, baixo:

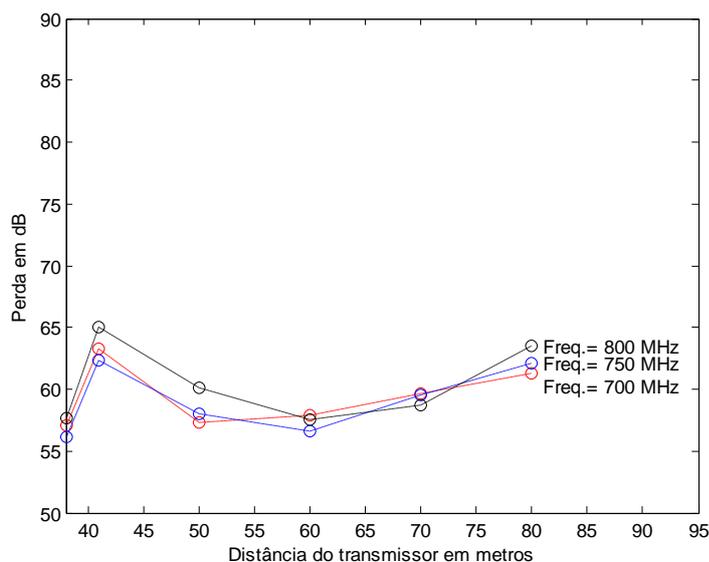


Figura 8.139 - Perda com a distância para todas as frequências.

Claramente pode ser notado um súbito aumento da perda nas proximidades da árvore posicionada a 40 metros, em termos médios, tomados das amostras em todas as frequências têm-se (fig. 8.140):

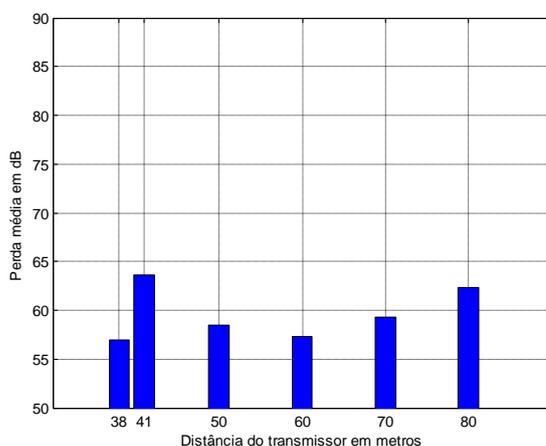


Figura 8.140 - Perda média com a distância para todas as frequências.

A diferença da perda entre as distâncias 38 metros (antes da árvore) e 41 metros (1 metro após) é de 6,64 dB em apenas 3 metros de propagação. Em seguida, o sinal sofre um leve aumento e continua sua tendência de queda devido ao espalhamento natural da energia com a distância.

b) Altura de transmissão de 6 metros:

Com esta altura de transmissão o raio direto propaga-se interceptando a copa da árvore com a antena de transmissão posicionada aproximadamente em 51,4 metros, calculados considerando a altura da copa em 2,5 metros usando a semelhança de triângulos, conforme o modelo simplificado da figura 8.141.

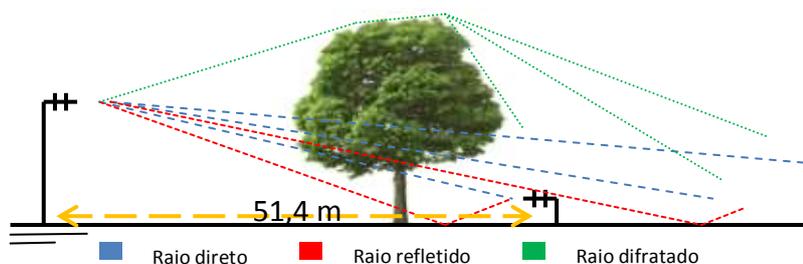


Figura 8.141 - Modelo geométrico simplificado.

Os valores da atenuação medidos em todas as frequências podem ser vistos na figura 8.142:

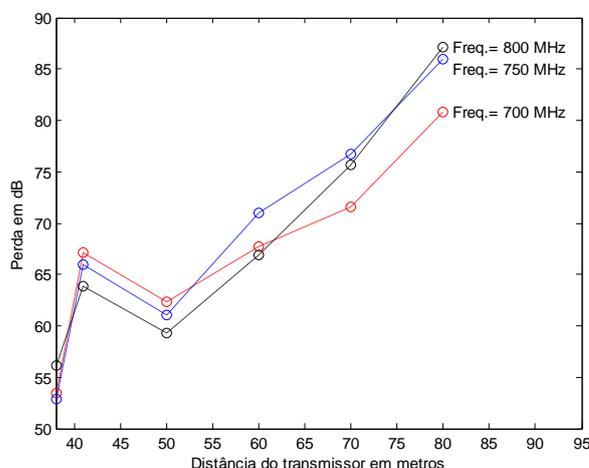


Figura 8.142 - Perda com a distância para todas as frequências.

Pode-se notar que a perda de proximidade com a árvore está bem definida na posição 41 metros e ainda que a perda em distâncias maiores atinge patamares bem mais elevados que na altura de 1,5 metro. Nas proximidades da posição 51 metros o raio direto propaga-se interceptando a copa, o que pode ser a causa da elevação da perda. Outra hipótese seria de que havendo componentes com caminhos próximos do raio direto que sofrem difração no tronco na altura de transmissão de 1,5 metro com boa simetria, poderiam se combinar no receptor, baixando os níveis da perda. Em todo caso, as análises seguintes podem denotar tendências mais claras.

Utilizando a mesma métrica adotada no caso anterior, em termos médios, têm-se (fig. 8.143):

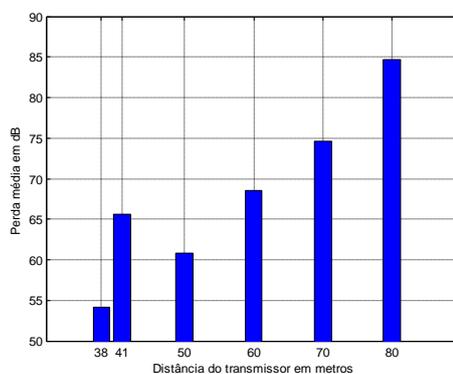


Figura 8.143 - Perda média com a distância para todas as frequências.

A diferença da perda entre as distâncias 38 metros e 41 metros é de 11,52 dB. À medida que se afasta da árvore os níveis de perda continuam mais altos que no caso anterior.

c) Altura de transmissão de 12 metros:

Nesta altura de transmissão, o raio direto propaga-se interceptando a copa da árvore com a antena de transmissão posicionada, aproximadamente, em 44,2 metros e tem visada a partir da posição 280 metros, que está além da máxima distância medida. Os valores foram calculados da mesma forma que a análise anterior. Assim, o modelo simplificado pode ser visto na figura 8.144.

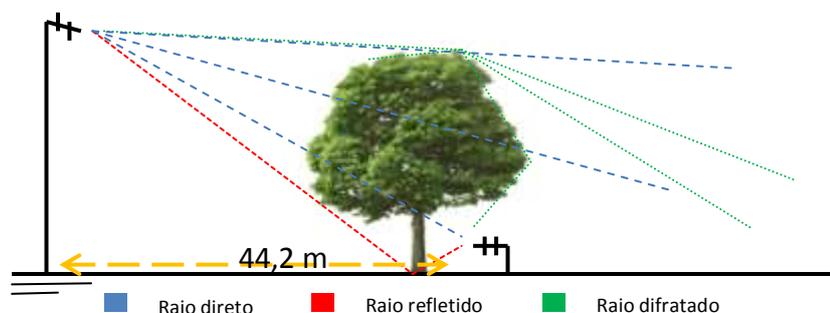


Figura 8.144 - Modelo geométrico simplificado.

Os valores da atenuação medidos em todas as frequências podem ser vistos na figura 8.145, abaixo.

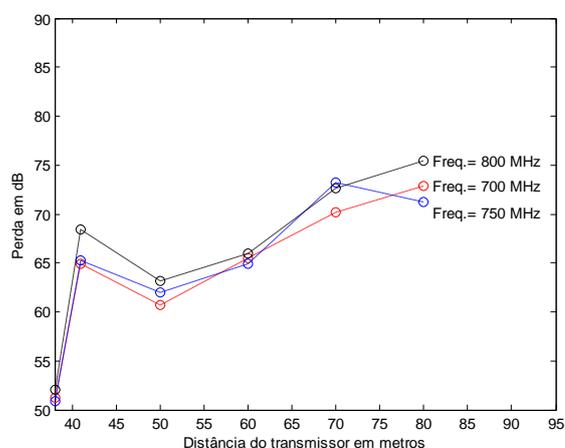


Figura 8.145 - Perda com a distância para todas as frequências.

As amostras da perda em todas as frequências denotam o mesmo comportamento da altura de transmissão de 6 metros, apenas os valores estão ligeiramente mais baixos em virtude do ganho pela elevação da transmissão. Pode-se notar, ainda, que para distâncias maiores o gradiente da perda está menor que no caso anterior, o que pode ser devido a menor difração proveniente da copa das árvores, já que a antena de transmissão encontra-se mais elevada que o espécime.

Utilizando a mesma métrica adotada no caso anterior, em termos médios, tem-se (fig. 8.146):

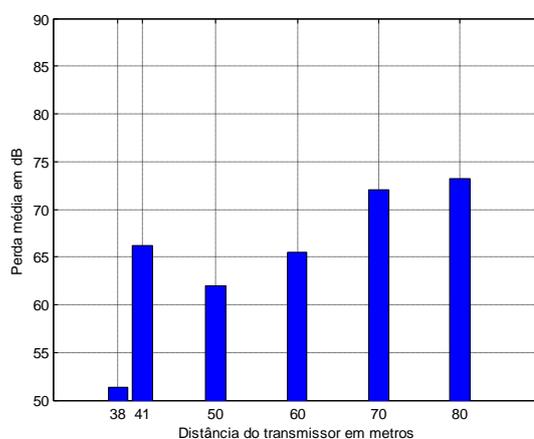


Figura 8.146 - Perda média com a distância para todas as frequências.

O aumento da perda nas posições antes e após o tronco aqui denota 14,81 dB. Estudos anteriores em outras espécies, como o de Vogel e Goldhirsh [13], apontam que uma árvore isolada pode causar uma perda até 10 dB em suas proximidades. Embora os resultados obtidos possuam relativa concordância com os relatos destes dois autores, o Jambeiro medido mostrou que pode atenuar mais nas mesmas condições deste atual experimento.

8.5.2

Cajazeiro

a) Altura de transmissão de 1,5 metro:

Este espécime possui grande estatura e pouca copa situada num nível bem mais alto que a máxima altura de medição, assim o modelo simplificado (fig. 8.147) abaixo pode representar a geometria do caso nas diversas alturas.

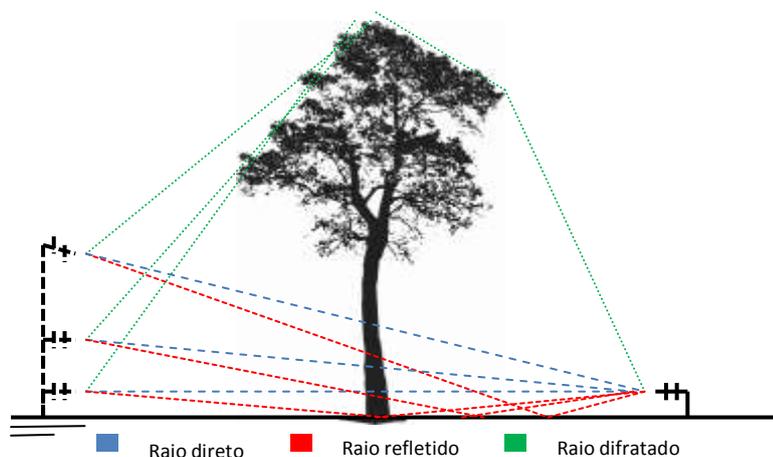


Figura 8.147 - Modelo geométrico simplificado.

Esta árvore possui tronco mais grosso que o Jambuí, e em nenhuma hipótese a linha do raio direto intercepta a copa, que começa, aproximadamente, na altura de 18 metros. Utilizando as mesmas análises do caso anterior, têm-se as amostras da perda nas distâncias fixas representadas na figura 8.148.

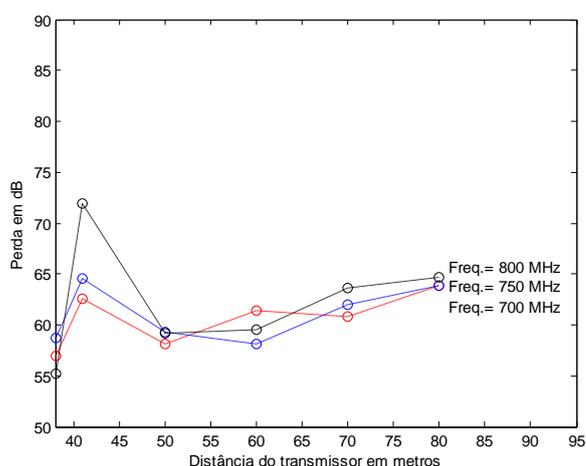


Figura 8.148 - Perda com a distância para todas as frequências.

As amostras sugerem um comportamento parecido com o do Jambuí a 1,5 metro, apenas a perda provocada nas proximidades da árvore está mais alta, o que pode ser devido ao maior diâmetro do tronco.

Pode-se notar que na frequência de 800 MHz, que possui o menor comprimento de onda, os efeitos da proximidade com a árvore estão bem marcados.

Utilizando a mesma métrica adotada no caso anterior, em termos médios, têm-se (fig. 8.149):

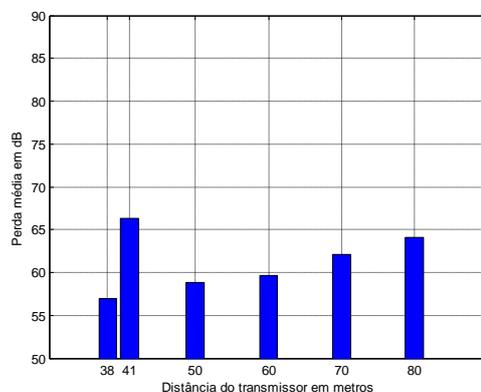


Figura 8.149 - Perda média com a distância para todas as frequências.

O aumento da perda nas posições antes e após o tronco em valores médios é de 9,38 dB, mais alto que no Jambeiro nas mesmas condições, embora o comportamento apresente similaridades.

b) Altura de transmissão de 6 metros:

Nenhuma modificação significativa na geometria, em relação à altura de 1,5 metro. As amostras para todas as frequências estão representadas na figura 8.150.

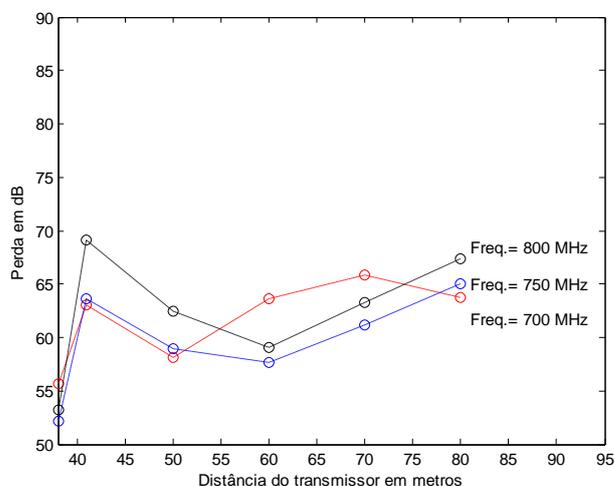


Figura 8.150 - Perda com a distância para todas as frequências.

Os resultados para esta altura demonstram uma leve diminuição na perda em relação à transmissão em 1,5 metro, o que é esperado. Os valores mais altos da perda na proximidade do tronco para a frequência de 800 MHz reforçam as observações tomadas sobre o maior efeito nessa frequência.

Utilizando a mesma métrica adotada no caso anterior, em termos médios, obtém-se a fig. 8.151:

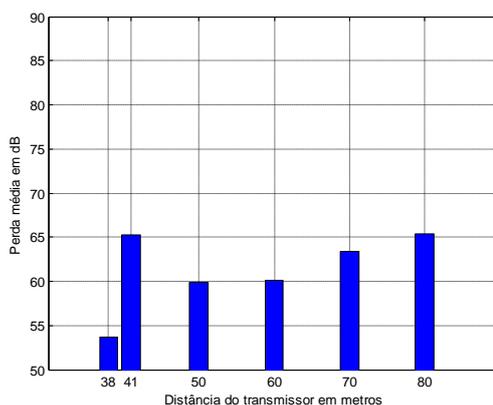


Figura 8.151 - Perda média com a distância para todas as frequências.

O resultado para esta última análise apresenta grande semelhança de comportamento e valores com os obtidos com a transmissão a 1,5 metro. A perda em proximidade atinge 11,56 dB, levemente mais alto, que o caso anterior.

c) Altura de transmissão de 12 metros:

As amostras para esta altura de transmissão podem ser vistas na figura 8.152. A geometria simplificada da propagação pode ser vista na figura 8.147.

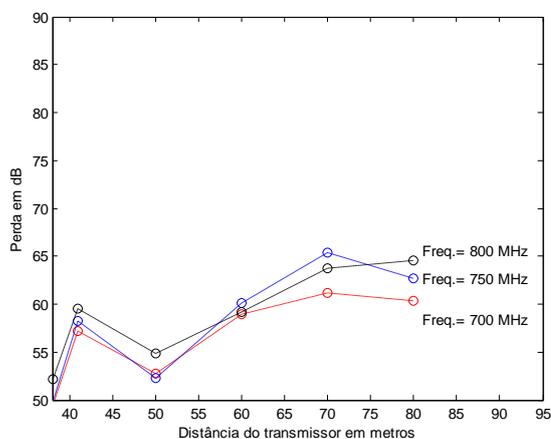


Figura 8.152 - Perda com a distância para todas as frequências.

Os resultados para esta altura comportam-se como o esperado com valores mais baixos em função da maior altura de transmissão. Utilizando valores médios dos pontos tomados em todas as frequências, obtém-se a fig. 8.153:

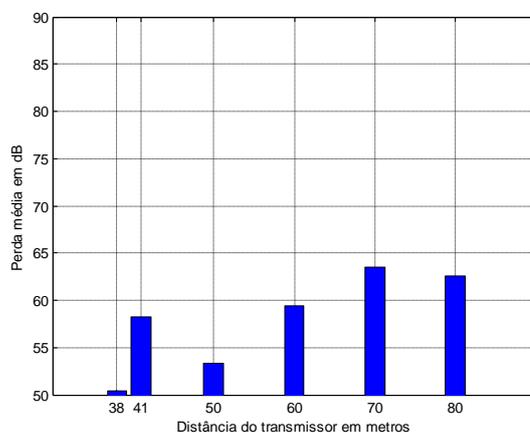


Figura 8.153 - Perda média com a distância para todas as frequências.

Esta última análise apresenta boa semelhança de valores com os obtidos com a transmissão a 6 metros. A perda em proximidade atinge 7,89 dB, mostrando uma tendência esperada de queda com a altura de transmissão.

8.5.3

Considerações sobre a perda devido à proximidade com uma árvore

A presença de uma árvore deixa uma "assinatura" clara na potência recebida em suas proximidades. Pela análise dos dados é possível prever que a perda é tão maior quanto mais perto do espécime esteja o receptor e maior o diâmetro do tronco e maior e mais densa e mais próxima é a copa. Os efeitos também são aumentados pelo aumento da frequência.

Os resultados apresentados para árvores isoladas, ainda que observadas apenas duas espécimes, com poucas variações na geometria da propagação, mostram que o sinal sofre grande diminuição na energia captada na suas proximidades imediatas. Para quantificar esse efeito neste trabalho, o valor da perda será tomado da média aritmética da perda obtida pela diferença entre o seu valor antes da árvore e imediatamente após (1 metro após o tronco) para todas as coleções de amostras, o que perfaz -10,29 dB.