

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS PARA CÁLCULO DE
ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA**

BENEDITO ALENCAR DE ARRUDA

Uberlândia - MG, 30 de setembro de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS PARA CÁLCULO DE
ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA**

Benedito Alencar de Arruda

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de mestre em ciências,
junto ao Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica da Faculdade de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Uberlândia.

Orientador: Professor Dr. Pós-Doc. Gilberto
Arantes Carrijo

Uberlândia-MG, 30 de setembro de 2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A779e Arruda, Benedito Alencar de, 1956-
Estudo comparativo das técnicas para cálculo de atenuação devido à
chuva / Benedito Alencar de Arruda. - 2008.
68 f. : il.

Orientador: Gilberto Arantes Carrijo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Radio – Interferência - Teses. 2. I. Carrijo, Gilberto Arantes. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.39

ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS PARA CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA

Esta dissertação foi apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Prof^o. Dr. Darizon Alves de Andrade
Coordenador do Programa de Pós-graduação

Banca Examinadora

Prof^o. Dr. Edgar Silva Junior
Examinador – Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Prof^o. Dr. Antonio C. Paschoarelli Veiga
Examinador – Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Prof^o. Dr. Gilberto Arantes Carrijo
Orientador – Universidade Federal de Uberlândia - UFU

AGRADECIMENTO

Agradecer neste momento me causa certo receio, pois é possível esquecer de alguém que, de alguma forma, contribuiu para que este trabalho se concretizasse. O importante é que mesmo não citados os nomes, reconheço cada intenção entre os muitos colaboradores que tive.

No entanto cito o professor Alcides Teixeira da Silva, amigo, de quem recebi valioso apoio todo o tempo.

Em especial agradeço o meu orientador professor Dr^o Gilberto Arantes Carrijo a quem devo muito pelo aprendizado que obtive e que resultou na elaboração desta dissertação.

Pela sua dedicação e pela busca incessante de um trabalho de qualidade, a minha admiração e respeito.

Mais uma vez e, sempre...

Muito obrigado!!!

RESUMO

A atenuação devido à chuva pode provocar sérios impactos nos serviços de comunicação por rádio que operam em frequências acima de 10 GHz. Para frequências acima deste valor, mais danos devido à chuva ocorrem no enlace seja via satélite, seja via terrestre. Em geral para se calcular com grau de confiança a atenuação devido à chuva de certo local, necessita-se do histórico da precipitação e mais do que isto, este histórico deve ser de longo prazo, ou seja, de um período de registros acima de 10 anos de observação.

Os dados deste trabalho foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia e do livro "Drenagem Urbana", publicado pela Companhia de Tecnologia em Saneamento Ambiental de São Paulo. Deste livro obteve-se dados da intensidade de chuva cuja previsão de retorno (tempo em que a chuva pode voltar a ocorrer) foi de 2, 5, 10, 15, 20 e mais anos. Tomando-se as intensidades de chuvas de retorno de 2 anos, converte-se estas para o equivalente a 1 ano. Com o vetor de dados de 1 ano pode-se chegar àquele referente a 0,01% deste tempo, ou seja, 53 minutos, que foram empregados nas rotinas matemáticas, destinadas a se conhecer as atenuações causadas pelas chuvas nas cidades selecionadas.

Pegou-se, portanto, dados de dez cidades, Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Cuiabá (MT), Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Belo Horizonte (MG), Salvador (BA), Natal (RN), São Gonçalo (PB) e Quixeramobim (CE), propositadamente escolhidas, pois o seu conjunto forma um corredor geográfico, abrangendo quase que a totalidade do território brasileiro, que está mencionada na literatura referenciada para cálculo de atenuação devido à chuva [3] e [4] com valores iguais de taxa de chuva a 0,01% do tempo, seja pelo modelo CCIR que é 95 mm/h, seja pelo modelo Crane que é de 67 mm/h.

Embora este trabalho não tenha a pretensão de contestar a validade destes valores nos cálculos, estes nos balizaram para comparar com àqueles conseguidos para cada cidade, que obviamente são diferentes, não só pela distância entre elas, mas pelo conhecido índice de precipitação anual de suas regiões. Mesmo levando em conta o fato de que as taxas de intensidades de chuvas de curta duração tendem a se aproximar para as diversas regiões, as taxas para as cidades escolhidas são diferentes entre si, que por sua vez são bem diferentes daquelas recomendadas pelos modelos mencionados.

Com a intensidade de chuva de cada cidade pôde-se, portanto, calcular as atenuações de sinais pelos modelos existentes, obtendo-se as estatísticas e as probabilidades de ocorrências seja em enlace via satélite como em enlace via terrestre.

Palavras chaves: Atenuação de sinal devido a chuvas, enlace via satélite, enlace via terrestre, propagação, chuva.

ABSTRACT

Attenuation caused by rain can cause serious impact on communication services by radio that operate in frequencies over 10 GHz. For frequencies above this, more damage caused by rain occurs in satellite or terrestrial links. In general, to calculate with a degree of certainty the attenuation caused by rain in a certain locality, a history of precipitation is needed and more than this, the history must be long, that is, a period of registers of over 10 years of observation.

The data in this study was obtained at the National Institute of Meteorology and from the book "Drenagem Urbana" published by Companhia de Tecnologia em Saneamento Ambiental de São Paulo. Information was obtained from this book concerning the intensity of rain which had a return prevision (when the rain can occur again). This information was of 2, 5, 10, 15, 20 and more years. The intensities of the return of rain of 2 years were converted to the equivalent in 1 year. With the data vector of 1 year, it is possible to arrive at that referent to 0,01% of this time, or 53 minutes, and apply it in the mathematical routines used to find the attenuations caused by rains in the selected cities.

Data from ten cities was collected: Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Cuiabá (MT), Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Belo Horizonte (MG), Salvador (BA), Natal (RN), São Gonçalo (PB), and Quixeramobim (CE). These were chosen due to the fact that, as a group, they form a geographical corridor covering almost the totality of the Brazilian territory that is mentioned in the literature which refers to calculations of attenuation due to rain [3] and [4], with values of rain equal to 0,01% of the time either by the CCIR model that is 95 mm/h, or by the Crane model that is 67mm/h.

Although this study does not intend to question the validity of these values in calculations, they marked the boundaries to compare with those obtained for each city, which are obviously different, not only because of the distance between them, but by the known annual rate in the regions. Even considering the fact that intensity rates of short rain tend to approximate for the several regions, the rates for the chosen cities are different from each other and these in turn are different from those recommended by the models mentioned.

With the rain intensity of each city being known, it was possible, therefore to calculate the attenuations of signal using the models, obtaining the statistics and probabilities of occurrences either in satellite or terrestrial links.

Keywords: Rain attenuation, satellite link, terrestrial link, propagation, rain.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Distribuição dos tamanhos das gotas usados para cálculo de atenuação devido a chuva	34
Tabela 1.2 - Coeficientes de atenuação para sinais na chuva $T = 0^{\circ}\text{C}$	35
Tabela 1.3 - Coeficientes de atenuação levando em conta a polarização da onda.....	35
Tabela 1.4 - Atenuação Específica (dB/km) – Cuiabá – MT.....	37
Tabela 2.1 - Coeficientes para cálculo da atenuação específica devido aos gases.....	42
Tabela 2.2 - Coeficientes para cálculo da atenuação atmosférica total Zenital ($\theta=90^{\circ}$)	43
Tabela 2.3 - Atenuação total devido aos gases $T_o = 20^{\circ}\text{C}$ $\rho_o = 7,5 \text{ g/m}^3$ unidade relativa= 42%.....	43
Tabela 2.4 - Atenuação total devido aos gases $T_o = 26,78^{\circ}\text{C}$ $\rho_o = 11,74 \text{ g/m}^3$ unidade relativa = 73,30%.....	44
Tabela 2.5 - Distribuição da taxa de chuva do modelo do CCIR.....	47
Tabela 2.6 - Pontos de distribuição de taxa de chuva por região conforme Modelo Crane Global.....	50
Tabela 2.7 - Altura isotérmica 0° (km) como uma função da localização do grupo de estações (latitude) e a probabilidade de ocorrência para o Modelo de Crane.....	50
Tabela 3.1 - Coeficientes de aproximação para o modelo Moupfouma.....	58
Tabela 4.1 – Precipitação – Duração – Frequência, Rio Branco - AC.....	62
Tabela 4.2 – Precipitação – Duração – Frequência, Porto Velho - RO.....	62
Tabela 4.3 – Precipitação – Duração – Frequência, Cuiabá – MT.....	63
Tabela 4.4 – Precipitação – Duração – Frequência, Porto Alegre - RS.....	63
Tabela 4.5 – Precipitação – Duração – Frequência, Curitiba – PR.....	64
Tabela 4.6 – Precipitação – Duração – Frequência, Belo Horizonte - MG.....	64
Tabela 4.7 – Precipitação – Duração – Frequência, Salvador – BA.....	65
Tabela 4.8 – Precipitação – Duração – Frequência, Natal – RN.....	65
Tabela 4.9 – Precipitação – Duração – Frequência, São Gonçalo - PB.....	66

Tabela 4.10 – Precipitação – Duração – Frequência, Quixeramobim - CE.....	66
Tabela 4.11 – Taxa de distribuição de chuva em mm/h das cidades em estudo para 0,01% do tempo anual, ou seja 53 minutos.....	67
Tabela 4.12 – Altura isotérmica 0º (km) como função das latitudes do grupo de estações das cidades em estudo e a probabilidade de ocorrência para o Modelo Crane.....	67
Tabela 4.13 – Precipitação em mm/h, retorno de 1 ano.....	68
Tabela 4.14 – Precipitação em mm/h, retorno de 1 ano (cont.).....	68
Tabela 4.15 – Probabilidade de ocorrer chuva em mm/h, em 1 ano.....	69
Tabela 4.16 – Probabilidade média de ocorrer chuva em mm/h, em 1 ano para todas as cidades em estudo.....	71
Tabela 5.1 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo CCIR.....	74
Tabela 5.2 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo CCIR.....	75
Tabela 5.3 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo CCIR.....	76
Tabela 5.4 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo CCIR.....	77
Tabela 5.5 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo CCIR.....	78
Tabela 5.6 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo CCIR.....	79
Tabela 5.7 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo CCIR.....	80
Tabela 5.8 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo CCIR.....	81
Tabela 5.9 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo CCIR.....	82
Tabela 5.10 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo CCIR.....	83
Tabela 5.11 – Altura isotérmica em função da probabilidade e da latitude.....	84
Tabela 5.12 – Altura isotérmica em função da probabilidade e da latitude (continuação).....	84

Tabela 5.13 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo Crane.....	86
Tabela 5.14 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo Crane.....	87
Tabela 5.15 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo Crane.....	88
Tabela 5.16 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo Crane.....	89
Tabela 5.17 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo Crane.....	90
Tabela 5.18 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo Crane.....	91
Tabela 5.19 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo Crane.....	92
Tabela 5.20 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo Crane.....	93
Tabela 5.21 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo Crane.....	94
Tabela 5.22 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo Crane.....	95
Tabela 5.23 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane para a cidade de Cuiabá.....	96
Tabela 5.24 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane para a cidade de Belo Horizonte	96
Tabela 5.25 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane para a cidade de Quixeramobim.....	97
Tabela 6.1 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo ITU-R para 5 km.....	99
Tabela 6.2 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo ITU-R para 5 km	100
Tabela 6.3 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo ITU-R para 5 km	101
Tabela 6.4 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo ITU-R para 5 km	102

Tabela 6.5 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo ITU-R para 5 km	103
Tabela 6.6 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo ITU-R para 5 km	104
Tabela 6.7 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo ITU-R para 5 km.....	105
Tabela 6.8 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo ITU-R para 5 km	106
Tabela 6.9 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo ITU-R para 5 km	107
Tabela 6.10 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo ITU-R para 5 km	108
Tabela 6.11 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo Moupfouma para 5 km...	109
Tabela 6.12 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo Moupfouma para 5 km ..	110
Tabela 6.13 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo Moupfouma para 5 km	111
Tabela 6.14 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo Moupfouma para 5 km ..	112
Tabela 6.15 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo Moupfouma para 5 km	113
Tabela 6.16 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo Moupfouma para 5 km	114
Tabela 6.17 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo Moupfouma para 5 km.....	115
Tabela 6.18 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo Moupfouma para 5 km	116
Tabela 6.19 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo Moupfouma para 5 km	117

Tabela 6.20 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo Moupfouma para 5 km	118
Tabela 6.21 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo Crane terrestre para 5 km.....	119
Tabela 6.22 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo Crane terrestre para 5 km	120
Tabela 6.23 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo Crane terrestre para 5 km	121
Tabela 6.24 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo Crane terrestre para 5 km	122
Tabela 6.25 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo Crane terrestre para 5 km	123
Tabela 6.26 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo Crane terrestre para 5 km	124
Tabela 6.27 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo Crane terrestre para 5 km.....	125
Tabela 6.28 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo Crane terrestre para 5 km	126
Tabela 6.29 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo Crane terrestre para 5 km	127
Tabela 6.30 – Tabela de atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo Crane terrestre para 5 km	128

Tabela 6.31 – Atenuação em dB para as taxas de chuvas medidas e as sugeridas para os modelos em Cuiabá (MT) – polarização horizontal.....129

Tabela 6.32 – Atenuação em dB para as taxas de chuvas medidas e as sugeridas para os modelos em Belo Horizonte (MG) – polarização horizontal.....130

Tabela 6.33 – Atenuação em dB para as taxas de chuvas medidas e as sugeridas para os modelos em Quixeramobim (CE) – polarização horizontal.....130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Chuvas convectivas ou de convecção.....	26
Figura 1.2 – Chuvas ciclônicas ou frontais.....	26
Figura 1.3 – Chuvas orográficas ou de relevo.....	27
Figura 1.4 – Atenuação específica devido aos gases atmosféricos (oxigênio e vapor de água) em função da frequência.....	29
Figura 1.5 – Radiação em um volume de gotas de água esféricas.....	32
Figura 1.6 – relação da atenuação específica e a frequência para a cidade de Cuiabá-MT.....	38
Figura 2.1 - Enlace de comunicação via satélite.....	39
Figura 2.2 - Atenuação Total Zenital devido aos gases atmosféricos (oxigênio e vapor de água) calculada pelo processo de regressão múltipla	45
Figura 2.3 - Regiões das Américas para usar o modelo do CCIR.....	48
Figura 2.4 - Regiões das Américas para usar o modelo do Crane.....	49
Figura 2.5 - Altura isotérmica 0º como uma função da localização do grupo de estações (latitude) para o Modelo de Crane.....	51
Figura 2.6 - Probabilidade de tempo de ocorrer a atenuação pelo Modelo Global Crane em várias latitudes.....	53
Figura 2.7 - Atenuação em dB em relação a frequência, considerando várias latitudes Modelo Global Crane.....	54
Figura 3.1 – Enlace de comunicação via terrestre.....	55
Figura 4.1 (a) e (b) – Probabilidade de ocorrer a precipitação.....	70
Figura 4.2 – Precipitação histórica anual das cidades.....	71
Figura 4.3 – Especificação da intensidade de chuva média anual em porcentagem de tempo excedido	72
Figura 5.1 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC).....	74
Figura 5.2 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO).....	75

Figura 5.3 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT).....	76
Figura 5.4 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS).....	77
Figura 5.5 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR).....	78
Figura 5.6 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG)....	79
Figura 5.7 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Salvador (BA).....	80
Figura 5.8 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Natal (RN).....	81
Figura 5.9 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB).....	82
Figura 5.10 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE).....	83
Figura 5.11 – Figura 5.11 – Relação entre as probabilidades e as alturas isotérmicas das cidades de Quixeramobim (CE), Cuiabá (MT) e Belo Horizonte (MG).....	85
Figura 5.12 – Figura 5.12 - Relação entre as alturas isotérmicas e as latitudes das dez cidades estudadas, exclusivamente para a probabilidade de 0,01	85
Figura 5.13 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC).....	86

Figura 5.14 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO).....	87
Figura 5.15 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT).....	88
Figura 5.16 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS).....	89
Figura 5.17 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR).....	90
Figura 5.18 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG).....	91
Figura 5.19 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Salvador (BA).....	92
Figura 5.20 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Natal (BA).....	93
Figura 5.21 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB).....	94
Figura 5.22 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane para vários índices de probabilidade de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE).....	95
Figura 6.1 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC).....	99
Figura 6.2 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO).....	100

Figura 6.3 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT).....	101
Figura 6.4 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS).....	102
Figura 6.5 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR).....	103
Figura 6.6 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz , devido a polarização horizontal,pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG).....	104
Figura 6.7 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA).....	104
Figura 6.8 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz , devido a polarização horizontal,pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN).....	106
Figura 6.9 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz , devido a polarização horizontal,pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB).....	107
Figura 6.10 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE).....	108
Figura 6.11 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC) - 5 km	109
Figura 6.12 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO) - 5 km...	110
Figura 6.13 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz , devido a polarização horizontal,pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT) - 5 km	111

Figura 6.14 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS) - 5 km ..	112
Figura 6.15 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz , devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR) - 5 km	113
Figura 6.16 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG) - 5 km	114
Figura 6.17 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA) - 5 km	115
Figura 6.18 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN) - 5 km	116
Figura 6.19 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB) - 5 km .	117
Figura 6.20 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE) - 5 km	118
Figura 6.21 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC) - 5 km	119
Figura 6.22 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO) - 5 km	120
Figura 6.23 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT) - 5 km	121

Figura 6.24 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS) - 5 km	122
Figura 6.25 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR) - 5 km	123
Figura 6.26 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG) - 5 km	124
Figura 6.27 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA) - 5 km	125
Figura 6.28 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN) - 5 km	126
Figura 6.29 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB) - 5 km	127
Figura 6.30 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz, devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE) - 5 km	128

LISTA DE ABREVIATURAS

CCIR - International Radio Consultive committee

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

ITU-R - International Telecommunications Union – Radiocommunication

DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica – São Paulo

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS PARA CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: MODELO TEÓRICO DE PERDAS DEVIDO AOS GASES E À CHUVA	25
1.1 Introdução.....	25
1.2 Precipitação.....	25
1.3 Perdas devido aos gases.....	27
1.3.1 Fórmulas de Van Vleck e Weisskopf.....	27
1.3.2 Cálculo da concentração do vapor d'água.....	30
1.4 Perdas devido à chuva	31
1.4.1 Cálculo da taxa de precipitação excedida.....	31
1.4.2 Atenuação devido à chuva pelo espalhamento de Mie e seção reta de espalhamento de Rayleigh.....	32
1.5 Conclusão.....	38
 CAPÍTULO II: MODELOS DE CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA E GASES EM ENLACE VIA SATÉLITE.....	 39
2.1 Introdução.....	39
2.2 A atenuação zenital total em função da atenuação específica do oxigênio e do vapor de água pelo processo de regressão múltipla.....	40
2.3 Modelo do CCIR para atenuação devido à chuva.....	45
2.4 Modelo de Crane	48
2.5 Conclusão.....	54

CAPÍTULO III: MODELOS DE CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA EM ENLACE TERRESTRE.....55

3.1 Introdução.....	55
3.2 Modelo ITU-R.....	55
3.3 Modelo de Crane	56
3.4 Modelo de Moupfouma.....	58
3.5 Conclusão.....	59

CAPÍTULO IV: MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO DE CHUVA.....60

4.1 Introdução.....	60
4.2 Medidas do INPE / INMET.....	60
4.3 Dados e Medidas	60
4.4 Análise probabilística da precipitação.....	67
4.5 Conclusão	72

CAPÍTULO V: CÁLCULO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA USANDO OS MODELOS PARA ENLACE VIA SATÉLITE.....73

5.1 Introdução.....	73
5.2 Cálculo pelo modelo do CCIR	73
5.3 Cálculo pelo modelo de Crane.....	84
5.4 Comparação entre as atenuações calculadas pelos modelos CCIR e Crane	96
5.5 Conclusão.....	97

CAPÍTULO VI: CÁLCULO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA USANDO OS MODELOS PARA ENLACE VIA TERRESTRE.....97

6.1	Introdução.....	97
6.2	Cálculo pelo modelo do ITU-R	97
6.3	Cálculo pelo modelo de Moupfouma.....	108
6.4	Cálculo pelo modelo Crane para enlace terrestre.....	118
6.5	Comparação entre as atenuações calculadas pelos modelos ITU-R, Moupfouma e Crane (terrestre) para a mesma probabilidade.....	128
6.6	Conclusão.....	130

CAPÍTULO VII: CONCLUSÕES GERAIS, CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES.....131

7.1	Conclusões Gerais.....	131
7.2	Contribuições deste Trabalho.....	133
7.3	Sugestões.....	133

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....135

CAPÍTULO I

MODELO TEÓRICO DE PERDAS DEVIDO AOS GASES E À CHUVA

1.1 Introdução

Quando se trata de atenuação deve-se considerar para projetos de enlaces via satélite e via terrestre os efeitos atmosféricos.

Um desses efeitos é o dos gases, cujas moléculas interagem com as ondas de rádio, produzindo uma absorção molecular, a qual resulta em redução da amplitude do sinal. A absorção muda o nível quântico na energia rotacional da molécula ocorrendo uma ressonância em uma frequência específica ou em uma faixa de frequência. Esta frequência de ressonância depende do nível de energia inicial e dos estados de energia rotacional da molécula.

Com relação à chuva, as gotas de água dispersas ao longo do enlace interagem com a radiação, causando variação no nível de sinal. Os efeitos da chuva tornam-se mais severos quando os comprimentos de onda se aproximam do tamanho da gota de água [1]. De um modo geral, a atenuação é maior quanto mais alta for a frequência de operação.

Hidrometeoros é de maneira geral o termo para se referenciar aos produtos da condensação do vapor de água na atmosfera, tais como: chuva, nuvens, neblina, neve. A presença dos hidrometeoros em um enlace de comunicação causam absorção e espalhamento de energia da onda, resultando em uma atenuação que degrada a confiabilidade e o desempenho do enlace, sendo o principal causador de atenuação do sinal em frequências acima de 10 GHz.

Neste capítulo será feita uma abordagem teórica das perdas devido aos gases atmosféricos e às chuvas, cujos exemplos foram feitos através de programas codificados na linguagem MATLAB 6.1 os quais se geram gráficos diversos para que sejam feitas análises estatísticas dos sinais.

1.2 Precipitação

Precipitação [2]: É a libertação de água proveniente da atmosfera sobre a superfície da Terra, sob a forma de chuvisco, chuva, granizo, saraiva ou neve.

Formas de precipitação

Chuvisco - precipitação de água líquida em que o diâmetro da gota é inferior a 0,5 mm.

Chuva - precipitação de água líquida em que o diâmetro da gota é superior a 0,5 mm.

Granizo - pequenos pedaços de gelo, com um diâmetro inferior a 5 mm, que se formam a grandes altitudes e atingem a superfície.

Saraiva - pequenos pedaços de gelo, com um diâmetro superior a 5 mm, que se formam a grandes altitudes e atingem a superfície.

Neve - precipitação de cristais de gelo provenientes da sublimação do vapor de água ou da congelação lenta das gotículas de água nas altas camadas da troposfera e que, em certas condições, podem aglomerar-se produzindo flocos.

Tipos de chuva

Chuvas convectivas ou de convecção - chuva que resulta de um sobre aquecimento da superfície terrestre, originando a ascensão do ar, que assim arrefece e se aproxima do ponto de saturação, aumentando a umidade relativa e consequente condensação e precipitação, figura 1.1. Esta chuva manifesta-se de forma intensa e é de curta duração (podem durar apenas 10 minutos). São típicas da região intertropical, nomeadamente equatorial, e de Verão no interior dos continentes, devido às altas temperaturas.

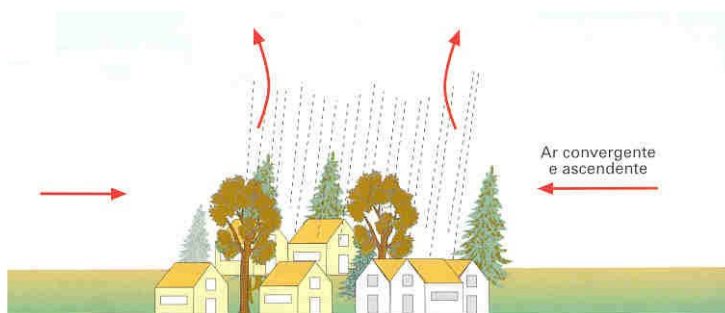


Figura 1.1 - Chuvas convectivas ou de convecção

Chuvas ciclónicas ou frontais - chuva que resulta do encontro de duas massas de ar com características diferentes de temperatura e de umidade. Desse encontro, a massa de ar quente sobe, o ar arrefece, aproximando-se do ponto de saturação, dando origem à formação de nuvens e consequente precipitação, figura 1.2. São do tipo chuveiro à passagem de uma frente quente ou do tipo aguaceiro, à passagem da frente fria. São chuvas características das zonas de convergência, isto é, das zonas de baixas pressões e, por isso, é este tipo de chuva que predomina nas regiões temperadas, principalmente no Inverno.

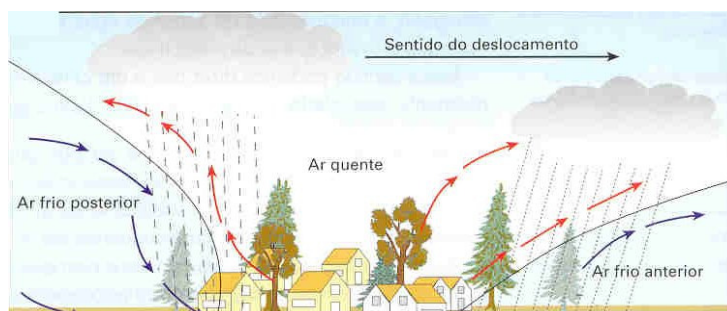


Figura 1.2 - Chuvas ciclónicas ou frontais

Chuvas orográficas ou de relevo - chuva que resulta de uma subida forçada do ar quando, no seu trajeto, se apresenta uma elevação. O ar ao

subir, arrefece, o ponto de saturação diminui, a umidade relativa aumenta e dá-se a condensação e consequente formação de nuvens, dando origem à precipitação, figura 1.3. São frequentes nas áreas de relevo acidentado ao longo das vertentes do lado de onde sopram ventos úmidos. As chuvas monçônicas (no sul e sudeste da Ásia) podem ser consideradas deste tipo.



Figura 1.3 - Chuvas orográficas ou de relevo

1.3 Perdas Devido aos Gases

A principal atenuação devido aos gases é proveniente do oxigênio e do vapor de água. A degradação do sinal pode ser menor ou mais intensa, dependendo da frequência, temperatura, pressão e concentração do vapor de água.

A seguir tem-se o cálculo da atenuação específica do oxigênio γ_o e do vapor de água γ_{H_2O} na temperatura de 20^0 C, baseadas no perfil de Van Vleck e Weisskopf [3].

1.3.1 Fórmulas de Van Vleck e Weisskopf

O oxigênio tem uma série de linhas de absorção perto de 60 GHz e linhas isoladas em 118,74 GHz. O vapor de água possui linhas de absorção em 22,3 GHz, 183,3 GHz e 323,8 GHz.

As atenuações do vapor de água e oxigênio são baseadas no perfil de Van Vleck e Weisskopf.

A atenuação específica do oxigênio γ_o e do vapor de água γ_w à temperatura de 20^0 C na superfície é dada pelas equações:

Para $f < 57$ GHz,

$$\gamma_o (dB / Km) = \left[\frac{6.6}{f^2 + 0,33} + \frac{9}{(f - 57)^2 + 1,96} \right] f^2 10^{-3} \quad (1.12)$$

Para $57 \leq f \leq 63$ GHz

$$\gamma_o (dB/km) = 14,9 \quad (1.13)$$

Para $63 < f \leq 350$ GHz

$$\gamma_o (dB / Km) = \left[\frac{4,13}{(f - 63)^2 + 1,1} + \frac{0,19}{(f - 118,7)^2 + 2} \right] f^2 10^{-3} \quad (1.14)$$

Para $f < 350$ GHz a atenuação específica do vapor d'água é:

$$\gamma_w (dB / Km) = \left[\frac{2,4}{(f - 22,3)^2 + 6,6} + \frac{7,33}{(f - 183,5)^2 + 5} + \frac{4,4}{(f - 328,8)^2 + 10} + 0,067 \right] f^2 \rho 10^{-4} \quad (1.15)$$

Onde f é a frequência em GHz, e ρ concentração do vapor de água em (g/m^3) .

A atenuação total A_a para um dado trecho de comprimento r_0 km, é determinada pela integração da atenuação específica ao longo de r , isto é,

$$A_a = \int_0^{r_0} [\gamma_o(r) + \gamma_w(r)] dr, \text{ dB} \quad (1.16)$$

Onde γ_o e γ_w são as atenuações para o oxigênio e o vapor de água respectivamente dadas pelas equações 1.12, 1.13, 1.14, 1.15.

Via programação foi gerada a figura 1.4, empregando as equações 1.12, 1.13, 1.14 e 1.15, e ela mostra os valores da atenuação específica para um vetor de frequências de 3 até 350 GHz, usando a densidade de vapor d'água $\rho = 7,5 \text{ g/m}^3$, a temperatura de 20°C e a umidade relativa do ar de 42%. Estas variáveis são aquelas utilizadas por Van Vleck e Weisskopf em laboratório, preparado para o experimento.

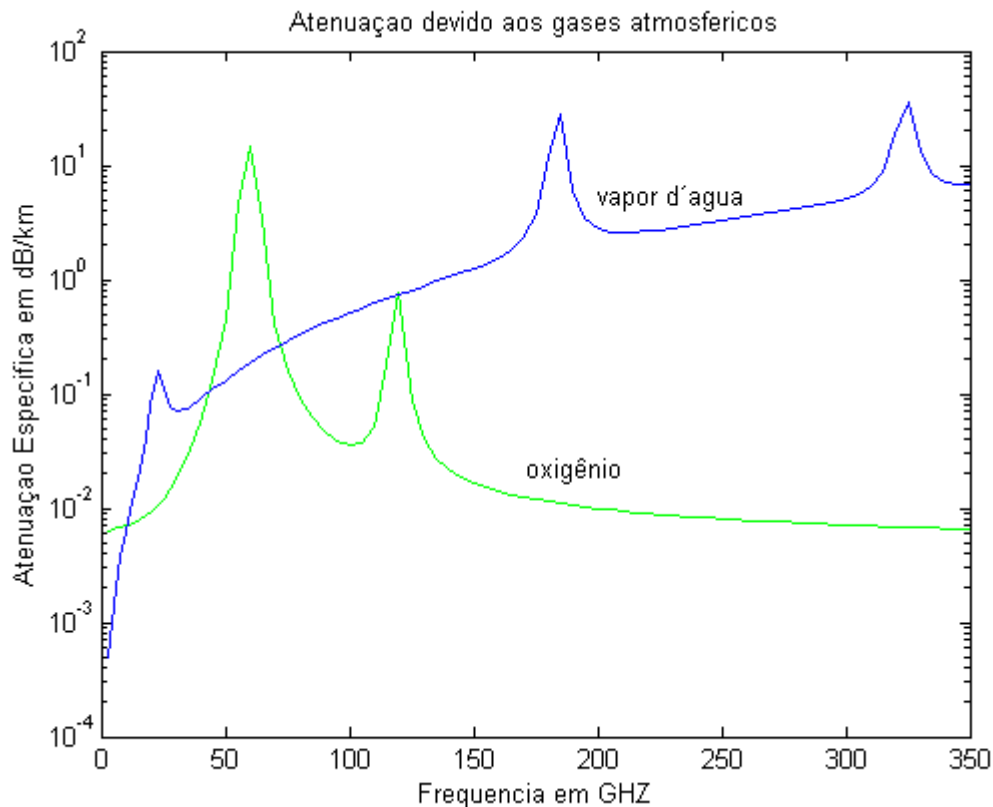


Figura 1.4 – Atenuação específica devido aos gases atmosféricos (oxigênio e vapor de água) em função da frequência

Pela figura 1.4, nota-se que para a frequência de 60 GHz a atenuação devido ao oxigênio é 14,9 dB/km, enquanto que a atenuação devido ao vapor d'água é de 0,18 dB/Km.

A variação da atenuação específica para outra temperatura é dada por,

$$\Delta\gamma \text{ (dB/km)} = 0,01(20 - T_0) \quad (1.17)$$

onde T_0 é a temperatura da superfície em graus Celsius.

Logo a atenuação específica para outras temperaturas é dada por,

$$\gamma_{\text{Outras temp.}} = \gamma_{20} + \Delta\gamma \quad (1.18)$$

onde γ_{20} é a atenuação específica a 20 °C.

Comparando com a leitura acima feita a partir da figura 1.4 e aplicando a equação 1.18 temos, para uma temperatura de 30 °C:

a - Atenuação específica para o oxigênio

$$\gamma_{30} = \gamma_{20} + 0,01(20 - 30)$$

$$\gamma_{30} = 14,9 - 0,1$$

$$\gamma_{30} = 14,8 \text{ dB/km}$$

b-Atenuação específica para o vapor d'água

$$\gamma_{30} = \gamma_{20} + 0,01(20 - 30)$$

$$\gamma_{30} = 0,18 - 0,1$$

$$\gamma_{30} = 0,08 \text{ dB/km}$$

Nota-se que o coeficiente da atenuação diminui em cerca de 1% para cada grau de aumento da temperatura.

1.3.2 Cálculo da concentração do vapor d'água [4]

Exemplo hipotético:

Dados: Temperatura = 26 °C

Umidade Relativa, UR= 92 %

Pressão atmosférica, Patm =103,1 Kpa (kilo Pascal)

1 - Pressão de saturação

$$P_{sat} = 0,61808 \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}}$$

T = Temperatura em graus celsius

$$P_{sat} = 0,61808 \times 10^{\frac{7,5 \times 26}{237,3 + 26}} \quad (1.19)$$

$$P_{sat} = 3,4013 \text{ Kpa}$$

2 - Pressão parcial do vapor d'água

Umidade Relativa (UR) do Ar é definida como sendo a relação entre a quantidade de vapor existente no ar e a quantidade que existiria se o ar estivesse saturado de vapor, na mesma temperatura. Desta forma a UR é expressa como a relação entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de saturação de vapor de água.

$$P_{parcial(H_2O)} = \frac{P_{sat} \times UR\%}{100} \quad (1.20)$$

$$P_{parcial(H_2O)} = \frac{3,4013 \times 92}{100}$$

$$P_{parcial(H_2O)} = 3,1292 \text{ Kpa}$$

3 - Concentração ou Umidade Absoluta

A concentração ou umidade absoluta pode ser encontrada pela fórmula que segue (equação 1.21).

$$\rho_{H_2O(Kg/m^3)} = \frac{UR \times 0,622 \times P_{parcial(H_2O)}}{P_{atm}} \quad (1.21)$$

$$\rho_{H_2O(Kg/m^3)} = \frac{0,92 \times 0,622 \times 3,1292}{101,3}$$

$$\rho_{H_2O(Kg/m^3)} = 17(g/m^3)$$

1.4 Perdas devido à chuva

O efeito da precipitação no enlace de transmissão é o principal causador de atenuação do sinal em frequências acima 10 GHz. Como já mencionado a presença dos hidrometeoros em um enlace de comunicações causa absorção e espalhamento da energia da onda, resultando em uma atenuação que degrada a confiabilidade e o desempenho do enlace.

O problema clássico para determinação da atenuação devido à chuva começou com estudos logo após a segunda guerra mundial. Mais tarde, o cientista Medhurst, comparou a teoria com um conjunto de dados obtidos na prática e produziu um modelo empírico. O desenvolvimento para o cálculo da atenuação devido à chuva se baseia em três princípios, descrevendo a natureza das ondas se propagando em uma precipitação.

1 - A intensidade da onda decai exponencialmente com a propagação através do volume de chuva.

2 - As gotas de chuva são assumidas esféricas, as quais espalham e absorvem a energia de uma onda incidente.

3 - As contribuições de cada gota são somadas e são independentes das outras gotas.

1.4.1 Cálculo da taxa da precipitação excedida

A intensidade da precipitação é medida através da taxa de queda da chuva R expressada em mm/h . A estatística de precipitação temporal é obtida através da distribuição da probabilidade cumulativa, a qual indica a porcentagem de tempo no ano $p(\%)$ durante o qual um dado valor da taxa de queda da chuva R_p (mm/h) é excedido (usualmente o valor adotado em uma análise é de $p = 0,01\%$, o que corresponde a aproximadamente 53 minutos por ano). Na Europa, por exemplo, pode-se considerar uma taxa de chuva $R_{0,01}$ em torno de $30 mm/h$, enquanto em regiões equatoriais temos $R_{0,01} = 120 mm/h$ [5].

Encontrar a taxa de precipitação $R_{0,01}$ para o local desejado é a principal tarefa quando se deseja calcular atenuação de um sinal de radio em enlaces de comunicação.

Quando não se tem dados disponíveis a bibliografia sugere utilizar tabelas previamente elaboradas, que fazem aproximações bastante grosseiras, porém aceitas, como o caso o modelo CCIR e Crane, que serão abordados no Capítulo II.

1.4.2 Atenuação devido à chuva pelo espalhamento de Mie e seção reta de espalhamento de Rayleigh.

Esta seção baseia-se no trabalho de Louis Ippolito [6]. A atenuação de uma onda de rádio em um volume de chuva de extensão L na direção de propagação, conforme figura 1.5, onde P_t é a potência transmitida e P_r a potência recebida, pode ser expressa por,

$$A = \int_0^L \gamma dx \quad (1.25)$$

onde γ é a atenuação específica do volume de chuva, expresso em dB/Km, e a integral é feita ao longo do percurso de propagação de $x = 0$ até $x = L$.

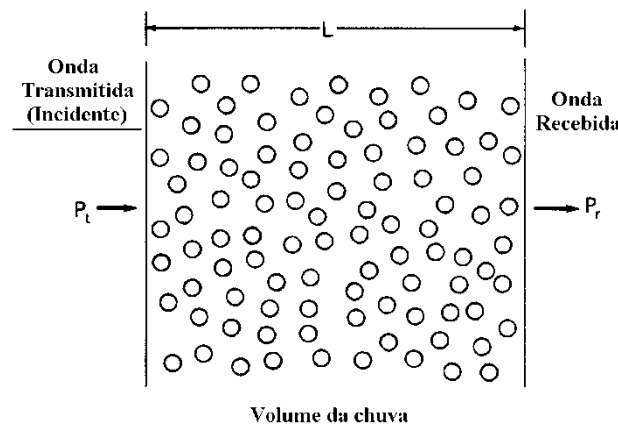


Figura 1.5 - Radiação em um volume de gotas de água esféricas.

Considerando uma onda plana incidente em um volume com gotas uniformemente distribuídas, todas de raio r ao longo da distância L , tem-se:

$$P_r = P_t e^{-kL} \quad (1.26)$$

onde P_t é a potência transmitida, P_r a potência recebida e k é o coeficiente de atenuação.

A atenuação da onda pode ser normalmente expressa em dB, como

$$A(\text{dB}) = 10 \log(P_t/P_r) \quad (1.27)$$

Convertendo para logaritmo na base e, tem-se:

$$A(\text{dB}) = 4,3434 k L \quad (1.28)$$

O coeficiente de atenuação k pode ser expresso como:

$$k = \rho Q_t \quad (1.29)$$

onde ρ é a densidade da gota, isto é, o número de gotas por unidade de volume, e Q_t é a seção reta de atenuação, expressa em unidades de área. Q_t é a soma da seção reta de espalhamento Q_s e da seção reta de absorção Q_a .

A seção reta de atenuação é função do raio da gota, r , do comprimento de onda λ , e do índice de refração da gota, m . Isto é,

$$Q_t = Q_s + Q_a = Q(r, \lambda, m) \quad (1.30)$$

O conceito de seção reta foi desenvolvido nos primeiros estudos de radar, e descreve o perfil físico que um objeto reflete a onda. Ele é definido como a razão da potência (watts) extraída de uma onda pela densidade de potência da onda incidente (em watts por metro quadrado).

As gotas em uma chuva real não são uniformes, e o coeficiente de atenuação precisa ser determinado pela integral sobre todos os tamanhos das gotas, isto é,

$$k = \int Q_t(r, \lambda, m) n(r) dr \quad (1.31)$$

Onde $n(r)$, é a distribuição do tamanho da gota e $n(r)dr$ pode ser interpretado como o número de gotas por unidade de volume com raio entre r e $r + dr$.

A atenuação específica é achada a partir da equação (1.28) com $L = 1$ km.

$$\gamma(\text{dB} / \text{km}) = 4,343 \int Q_t(r, \lambda, m) n(r) dr \quad (1.32)$$

A solução da equação exige o conhecimento de Q_t e de $n(r)$ como função do tamanho da gota. Q_t é calculado empregando a teoria clássica do espalhamento de Mie para uma onda plana radiando em uma esfera absorvente. O cálculo de Q_t é dado pela equação,

$$Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1.33)$$

onde a_n e b_n são os coeficientes de espalhamento de Mie, os quais são funções complexas de r , λ e m . Re indica “a parte real de”.

A equação, conhecida como seção reta de espalhamento de Mie, é difícil de calcular; ela pode ser simplificada quando,

$$2\pi r \ll \lambda \quad (1.34)$$

Isto é, quando o tamanho das gotas é muito menor do que o comprimento de onda. Esta condição conhecida como aproximação de Rayleigh, é válida para frequência de 40-80 GHz. Sob esta condição, Q_t pode ser

$$Q_t = \frac{8\pi^2}{\lambda} r^3 \text{Im} \left[\frac{m_2 - 1}{m_2 + 1} \right] \quad (1.35)$$

A equação é conhecida como seção reta de espalhamento de Rayleigh.

Diversos pesquisadores têm estudado a distribuição da densidade de probabilidade do tamanho das gotas em função do tipo de chuva, e a distribuição pode ser dada pela equação,

$$n(r) = N_0 e^{-\Lambda r} = N_0 \exp(-(cR^d)r) \quad (1.36)$$

Onde R é a taxa de precipitação, em mm/h, r raio da gota em mm, N_0 , Λ , c e d são constantes empíricas determinadas a partir de medidas.

Dois modelos são conhecidos na literatura, conforme a tabela 1.1:

- 1- Modelo de Marshal-Palmer
- 2- Modelo de Joss: Brisa, Chuva Leve e Chuva Torrencial

A atenuação específica usada na equação (1.32), pode ser escrita como,

$$\gamma = (dB/km) = 4,343 N_0 \int Q_t(r, \lambda, m) e^{-\Lambda r} dr \quad (1.37)$$

onde Q_t é obtido pela equação (1.33).

A integral acima pode ser obtida numericamente para um dado valor do índice de refração e distribuição do tamanho das gotas.

Tabela 1.1- Distribuição dos tamanhos das gotas usados para cálculo de atenuação devido a chuva.

Modelo de distribuição do tamanho da gota	Constante empíricas	
	$N_0(1/(m^2 \cdot mm))$	$\Lambda(1/mm)$
Marshal-Palmer	$8 \cdot 10^3$	$8,2R^{-21}$
Joss:		
Brisa	$30 \cdot 10^3$	$11,4R^{-21}$
Chuva leve	$7 \cdot 10^3$	$8,2R^{-21}$
Chuva torrencial ..	$1,4 \cdot 10^3$	$6R^{-21}$

R = mm/h

Ao comparar a atenuação em enlaces com valores medidos nota-se que a atenuação específica pode ser aproximada por:

$$\gamma \text{ (dB/km)} = aR^b \quad (1.38)$$

onde R é a precipitação em mm/h, a e b são parâmetros que dependem da temperatura e frequência.

A tabela 1.2, mostra estes coeficientes desenvolvidos por Olsen, Roger e Hodge para chuva de 0° C, quando os mesmos usam o modelo de Marchall-Palmer de distribuição do tamanho das gotas.

Tabela 1.2 - Coeficientes de atenuação para sinais na chuva T = 0°C

Frequência (GHz)	Coeficientes		Atenuação específica (dB/Km)		
	a	b	R = 10	R = 50	R = 100
2	0,000345	0,891	0,003	0,01011	0,021
4	0,00147	1,016	0,015	0,078	0,158
6	0,00371	1,124	0,049	0,30	0,657
12	0,0215	1,136	0,29	1,83	4,02
15	0,0368	1,118	0,48	2,92	6,34
20	0,0719	1,097	0,90	5,25	11,24
30	0,186	1,043	2,05	11,0	22,7
40	0,362	0,972	3,39	16,2	31,8
94	1,402	0,744	7,78	25,8	43,1

Os coeficientes da tabela 1.2 são independentes da polarização da onda e considera as gotas esféricas.

Os coeficientes a e b para gotas não esféricas podem ser utilizados os obtidos através da teoria de Mie [7], cujos resultados estão apresentados na tabela 1.3.

Tabela 1.3 - Coeficientes de atenuação levando em conta a polarização da onda

Frequência (GHz)	a _h	a _v	b _h	b _v
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
7	0,00301	0,00265	1,332	1,312
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,030
30	0,187	0,167	1,021	1,000
35	0,263	0,233	0,979	0,963
40	0,350	0,310	0,939	0,929
45	0,442	0,393	0,903	0,897
50	0,536	0,479	0,873	0,868
60	0,707	0,642	0,826	0,824
70	0,851	0,784	0,793	0,793
80	0,975	0,906	0,769	0,769
90	1,06	0,999	0,753	0,754
100	1,12	1,06	0,743	0,744
120	1,18	1,13	0,731	0,732
150	1,31	1,27	0,710	0,711
200	1,45	1,42	0,689	0,690
300	1,36	1,35	0,688	0,689
400	1,32	1,31	0,683	0,684

Quando a polarização é circular, os coeficientes usados são [7]

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2} \quad (1.39)$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2a_c} \quad (1.40)$$

Quando a polarização é linear, mas não é horizontal nem vertical, usa-se os coeficientes

$$a_\delta = \frac{1}{2} [a_h + a_v + (a_h - a_v) \cos^2 \theta \cos(2\delta)] \quad (1.41)$$

$$e \quad b_\delta = \frac{1}{2 a_\delta} [a_h b_h + a_v b_v + (a_h b_h - a_v b_v) \cos^2 \theta \cos(2\delta)] \quad (1.42)$$

onde θ é o ângulo de elevação e δ o ângulo de inclinação do campo com respeito à horizontal.

Por programa MATLAB 6.1 calculou-se as atenuações para Polarização Vertical, Horizontal e Circular devido a Chuva.

A polarização das ondas é determinada pela orientação do campo elétrico em um ponto fixo do espaço. A polarização linear de uma onda é aquela que a resultante do campo elétrico está sempre ao longo de uma reta fixa em um ponto no espaço como uma função do tempo. A direção do campo elétrico determina o sentido da polarização linear, isto é horizontal ou vertical ou qualquer outro ângulo com respeito a uma referência.

Para polarização circular a onda possui um vetor campo elétrico que gira em taxa igual à frequência da onda, descrevendo um círculo centrado em um ponto fixo, como função do tempo.

A polarização segue o sentido horário ou sentido anti-horário se o observador olhar na direção de propagação da onda.

Para exemplificar, codificou-se um programa para calcular e gerar gráficos da Atenuação Específica de sinal de transmissão via satélite devido às polarizações vertical, horizontal e circular para os valores mensais da precipitação em Cuiabá no ano de 2003, devidamente convertidas para 0,01% do tempo, neste caso 53 minutos de um ano.

Usa-se também a matriz de coeficientes da atenuação levando em conta a polarização da onda, temperatura de 20 °C pelos coeficientes de espalhamento de Mie, derivada da tabela 1.3. A temperatura de 20 °C é aquela utilizada no experimento em laboratório.

Assim, em baixa frequência a atenuação do sinal é praticamente desprezível usando tanto a polarização vertical, a horizontal ou a circular (teoria de Mie). À medida que crescem a precipitação e a frequência, a atenuação cresce exponencialmente.

A tabela 1.4, mostra os valores das atenuações específicas, polarização da onda horizontal, vertical e circular, usando espalhamento de Mie, em relação às frequências, com a precipitação de Cuiabá.

Tabela 1.4 - Atenuação Específica (dB/km) – Cuiabá - MT

Frequência GHz	Horizontal	Vertical	Circular
1	0.0012	0.0010	0.0011
2	0.0059	0.0045	0.0052
4	0.0452	0.0345	0.0397
6	0.2470	0.1859	0.2157
7	0.4652	0.3797	0.4222
8	0.6885	0.5617	0.6248
10	1.2629	1.0599	1.1611
12	1.8804	1.5756	1.7271
15	2.8921	2.3925	2.6391
20	4.8061	3.8883	4.3382
25	6.8727	5.5697	6.2106
30	8.9085	7.3480	8.1219
35	10.6880	8.9125	9.7958
40	12.2256	10.4263	11.3239
45	13.4729	11.7103	12.5908
50	14.5847	12.7895	13.6865
60	16.1032	14.5124	15.3077
70	17.0874	15.7606	16.4240
80	17.8986	16.6320	17.2653
90	18.3158	17.3272	17.8215
100	18.6339	17.7025	18.1682
120	18.7606	18.0337	18.3971
150	19.2364	18.7197	18.9780
200	19.4436	19.3317	19.3871
300	18.3753	18.3093	18.3423
400	17.5006	17.4338	17.4672

A figura 1.6 foi gerada a partir da tabela 1.4. Ela estabelece a relação entre a atenuação específica e a frequência para a cidade de Cuiabá – MT. Neste gráfico utilizou-se das frequências de 1 até 100 GHz, pois aquelas a partir desse valor é de pouco uso em telecomunicação.

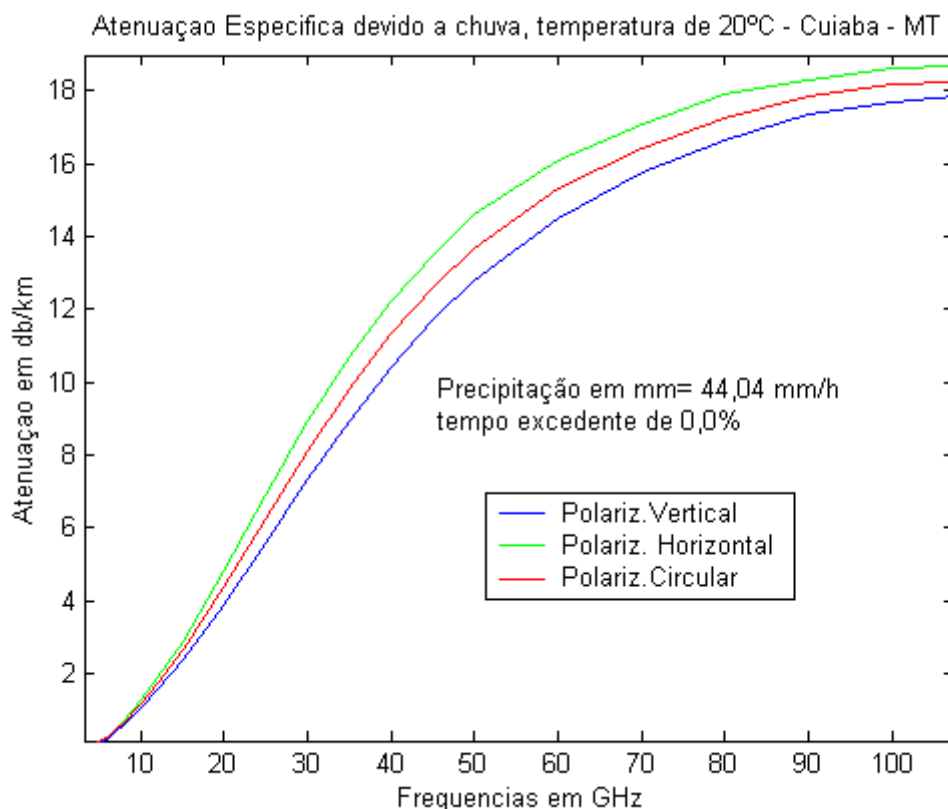


Figura 1.6 - Relação da atenuação específica e a frequência para a cidade de Cuiabá – MT.

1.5 Conclusão

Viu-se neste capítulo a abordagem teórica da precipitação por esta ser de grande relevância neste trabalho.

Foi explanada a forma pela qual se encontra a taxa de precipitação excedida em 0,01% do tempo, necessária para todos os cálculos das atenuações devido os efeitos das chuvas.

Abordou-se também, os procedimentos matemáticos para se obter a concentração do vapor d'água. Este cálculo é importante porque normalmente as fontes de dados fornecem apenas o valor em percentual da umidade relativa do ar. Com este dado, pode-se transformá-lo em concentração de vapor em g/m^3 , exigida pelos cálculos.

Qualquer projeto que se faça de enlace de comunicação, além da escolha do local das antenas tanto transmissoras quanto receptoras e do cálculo para dimensionar os equipamentos, deve-se merecer atenção especial a presença de formações meteorológicas, como nuvens e chuva que constituem uma camada absorvente e emissiva de energia interferindo em muito na qualidade do sinal em tráfego.

CAPÍTULO II

MODELOS DE CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA E GASES EM ENLACE VIA SATÉLITE

2.1 Introdução

Viu-se no capítulo I a forma de calcular a atenuação, segundo Van Vleck and Wesskop [3]. É uma maneira direta de se obter a atenuação devida os gases e ao vapor d'água.

Neste capítulo, serão mostrados os procedimentos para o cálculo da atenuação para um enlace de comunicação via satélite, figura 2.1, devido aos gases pelo processo de regressão múltipla e a atenuação devido à chuva pelos modelos do CCIR [3], [6], Crane [8].

O processo de múltipla regressão, para determinar a atenuação total, foi desenvolvido para o oxigênio e vapor de água com medidas diretas de satélite através de radio sondas. Este processo proporciona uma atenuação total em qualquer local e ângulo de elevação, baseado na temperatura da superfície, combinando a concentração do oxigênio e do vapor de água.

O modelo do CCIR é resultado de pesquisa feita através de sucessivas medições ao longo de vários anos em muitos países o que resultou em uma formatação específica para regiões de clima marítimo, clima continental e clima tropical.

O modelo Crane, para enlace via satélite, utiliza a altura isotérmica 0° em km, como função da latitude do local onde se encontra a estação terrena e a probabilidade de ocorrência de chuva a uma determinada altura (Km).

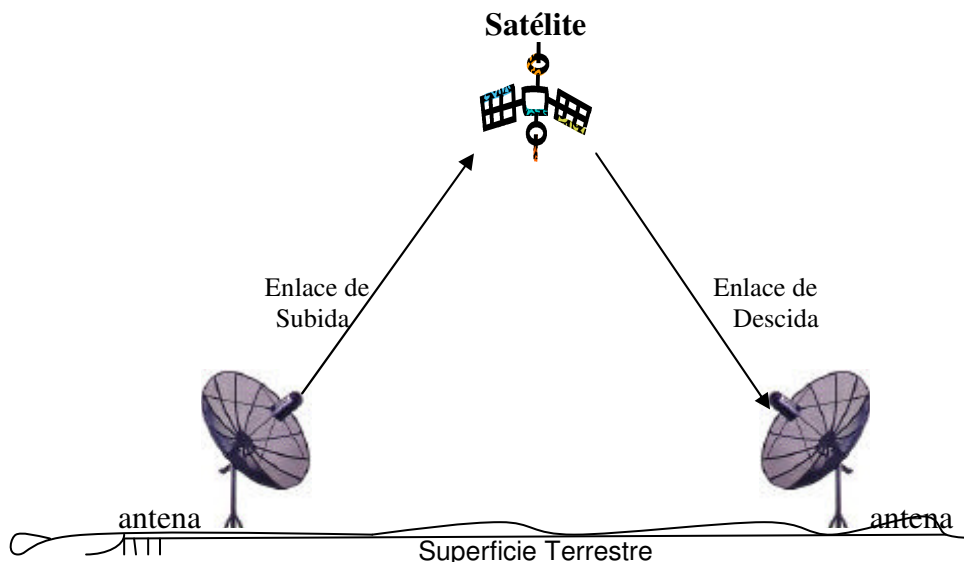


Figura 2.1 – Enlace de comunicação via satélite

2.2 A atenuação zenital total em função da atenuação específica do oxigênio e do vapor de água pelo processo de regressão múltipla

O processo combina as atenuações específicas do oxigênio e vapor de água as quais estão relacionadas à concentração do vapor de água e oxigênio na superfície, através de um conjunto de coeficientes, conforme tabelas 2.1 e 2.2. A atenuação atmosférica zenital, A_a é determinada por um processo de análise de regressão através de um conjunto de coeficientes empíricos os quais também dependem da frequência [9].

O cálculo da atenuação específica γ_a é dado pela equação,

$$\gamma_a = a(f) + b(f)\rho_o - c(f)T_o \quad (\text{dB/km}) \quad (2.1)$$

o total da atenuação zenital A_a ($\theta = 90^\circ$), é dado por,

$$A_a = \alpha(f) + \beta(f)\rho_o - \xi(f)T_o \quad (\text{dB}) \quad (2.2)$$

onde ρ_o é a concentração média de vapor de água na superfície da terra em g/m^3 , T_o é a temperatura média na superfície da terra em $^\circ\text{C}$.

Os coeficientes $a(f)$, $b(f)$, $c(f)$, $\alpha(f)$, $\beta(f)$ e $\xi(f)$ são dados pela tabela 2.1 e 2.2.

Para determinar os coeficientes em outras frequências que não estão no gráfico usa-se uma interpolação logarítmica.

A altura de escala é dada por,

$$H_a = \frac{A_a(90^\circ)}{\gamma_a} = \frac{\alpha(f) + \beta(f)\rho_o - \xi(f)T_o}{a(f) + b(f)\rho_o - c(f)T_o} \quad (2.3)$$

A tabela 2.3, mostra a atenuação como função do ângulo de elevação e frequência para o caso de uma atmosfera.

Assim, resumidamente, o cálculo da atenuação pode ser dado pelo procedimento abaixo e é exigido como dados de entrada:

Frequência de operação: f_o em GHz

Ângulo de elevação: θ em graus Celsius

Concentração de vapor de água: ρ_o em g/m^3

Temperatura na superfície: T_o , em graus Celsius.

Passo 1.

Calcular a atenuação específica γ_a usando a equação (2.1), na frequência f_o , com os coeficientes da tabela 2.1.

$$\gamma_a(f_o) = a(f_o) + b(f_o)\rho_o - c(f_o)T_o \quad (2.4)$$

Passo 2.

Determinar a atenuação zenital $A_a(90^\circ)$ a partir da equação (2.2), na frequência f_o com os coeficientes da tabela 2.2

$$Aa(90^\circ) = \alpha(f_o) + \beta(f_o) \rho_o - \xi(f_o) T_o \quad (2.5)$$

Passo 3.

Calcular a altura de escala H_a , para um trecho inclinado

$$H_a = \frac{Aa(90^\circ)}{\gamma_a(f_o)} \quad (2.6)$$

Passo 4.

A atenuação total A_a para um trecho inclinado com ângulo de elevação θ é dado por:

Para $\theta \geq 10^\circ$

$$Aa(\theta) = \frac{H_a Aa(90^\circ)}{\text{sen}\theta} \quad (2.7)$$

para $\theta < 10^\circ$

$$Aa(\theta) = \frac{2H_a Aa(90^\circ)}{\sqrt{\text{sen}^2\theta + 2H_a/8500 + \text{sen}\theta}} \quad (2.8)$$

para $\theta = 0^\circ$

$$Aa(0^\circ) = \frac{2H_a Aa(90^\circ)}{\sqrt{\frac{2H_a}{8500}}} \quad (2.9)$$

$$Aa(0^\circ) = 130,38 \sqrt{H_a} \cdot Aa(90^\circ) \quad (2.10)$$

Os coeficientes em várias frequências estão nas tabelas 2.1 e 2.2

Tabela 2.1 – Coeficientes para cálculo da atenuação específica devido aos gases

Frequência (GHz)	Coeficientes		
	a(f)	b(f)	c(f)
1	0,00588	0,0000178	0,0000517
4	0,00802	0,000141	0,0000850
6	0,00824	0,000300	0,0000895
12	0,00898	0,00137	0,000108
15	0,00953	0,00269	0,000125
16	0,00976	0,00345	0,000133
20	0,0125	0,0125	0,000101
22	0,0181	0,0221	0,000129
24	0,0162	0,0203	0,0000563
30	0,0179	0,0100	0,000280
35	0,0264	0,0101	0,000369
41	0,0499	0,0121	0,000620
45	0,0892	0,0140	0,00102
50	0,267	0,0171	0,00251
55	3,93	0,0220	0,0158
70	0,449	0,0319	0,00443
80	0,160	0,0391	0,00130
90	0,113	0,0495	0,000744
94	0,106	0,0540	0,000641
110	0,116	0,0749	0,000644
115	0,206	0,0826	0,00185
120	0,985	0,0931	0,0115
140	0,123	0,129	0,000372
160	0,153	0,206	0,000784
180	1,13	1,79	-0,00237
200	0,226	0,366	0,00167
220	0,227	0,316	0,000174
240	0,258	0,356	-0,000119
280	0,336	0,497	-0,0000664
300	0,379	0,629	0,000808
310	0,397	0,812	0,00286
320	0,732	2,36	0,00467
330	0,488	1,61	0,00945
340	0,475	1,06	0,00519
350	0,528	1,23	0,00722

Tabela 2.2 – Coeficientes para cálculo da atenuação atmosférica total Zenital ($\theta=90^\circ$)

Frequência (GHz)	Coeficientes		
	$\alpha(f)$	$\beta(f)$	$\xi(f)$
1	0,0334	0,00000276	0,000112
4	0,0397	0,000276	0,000176
6	0,0404	0,000651	0,000196
12	0,0436	0,00318	0,000315
15	0,0461	0,00634	0,000455
16	0,0472	0,00821	0,000536
20	0,0560	0,0346	0,00155
22	0,0760	0,0783	0,00310
24	0,0691	0,0591	0,00250
30	0,0850	0,0237	0,00133
35	0,123	0,237	0,00149
41	0,237	0,0284	0,00211
45	0,426	0,0328	0,00299
50	1,27	0,0392	0,00572
55	24,5	0,0490	-0,00121
70	2,14	0,0732	0,0104
80	0,705	0,0959	0,00586
90	0,458	0,122	0,00574
94	0,417	0,133	0,00594
110	0,431	0,185	0,00785
115	0,893	0,203	0,0113
120	5,35	0,221	0,0363
140	0,368	0,319	0,0119
160	0,414	0,506	0,0191
180	2,81	5,04	0,192
200	0,562	0,897	0,0339
220	0,543	0,777	0,0276
240	0,601	0,879	0,0307
280	0,760	1,22	0,0428
300	0,853	1,54	0,0551
310	0,905	1,97	0,0735
320	1,66	6,13	0,238
330	1,13	3,94	0,155
340	1,07	2,56	0,0969
350	1,20	2,96	0,114

A tabela 2.3, mostra a atenuação como função do ângulo de elevação e frequência para uma atmosfera (1 atm).

Tabela 2.3 - Atenuação total devido aos gases $T_o = 20^\circ\text{C}$ $\rho_o = 7,5 \text{ g/m}^3$
unidade relativa = 42%

Frequência (GHz)	Ângulo de Elevação					
	0°	5°	10°	30°	45°	90°
6	2,45	0,47	0,236	0,082	0,058	0,041
20	15,8	3,26	1,63	0,569	0,402	0,285

Pode-se utilizar o processo de regressão múltipla para obter a atenuação total em qualquer localidade e qualquer ângulo de elevação da antena da estação terrena, baseando-se na temperatura e na concentração do vapor de água do local.

A figura 2.2, foi gerada considerando os dados da matriz de dados meteorológicos do ano de 2003 da cidade de Cuiabá. Somaram-se todos os valores das temperaturas máximas e todos os valores das umidades relativas máximas ocorridas neste ano e tirou-se a média. A temperatura máxima média de 2003 foi de 26,78 °C enquanto que a umidade média foi de 73,30%. Com estes dados mais a pressão atmosférica de 101,3 Kilo Pascal, calculou-se a concentração ou densidade do vapor d'água, obtendo-se 11,74 g/m³.

Para efeito de comparação com a tabela 2.3, criou-se a tabela 2.4 para se aferir a alteração na atenuação com a variação da temperatura e da concentração do vapor d'água, determinando as respectivas atenuações totais zenitais.

Pela figura 2.2, nota-se que no geral a atenuação é maior com ângulo de elevação menor e também cresce com o aumento da concentração de vapor d'água. As cinco curvas apresentam picos de atenuações sincronizadas.

A atenuação é maior para menor ângulo de elevação da antena da estação terrena direcionada ao satélite porque o caminho percorrido pelo sinal é maior. Ou seja, com pequeno ângulo a estação terrena estaria tendendo a ter a linha do horizonte como visada direta com o satélite, ao passo que ao aumentando o ângulo de elevação, o satélite tende a estar verticalmente acima da estação, diminuindo o caminho para o sinal percorrer.

Tabela 2.4- Atenuação total devido aos gases $T_o = 26,78^\circ\text{C}$ $\rho_o = 11,74$ g/m³ unidade relativa = 73,30%

Frequência (GHz)	Ângulo de Elevação					
	0°	5°	10°	30°	45°	90°
6	57,77	1,30	1,126	0,391	0,276	0,195
20	138,70	7,30	6,51	2,263	1,600	1,131

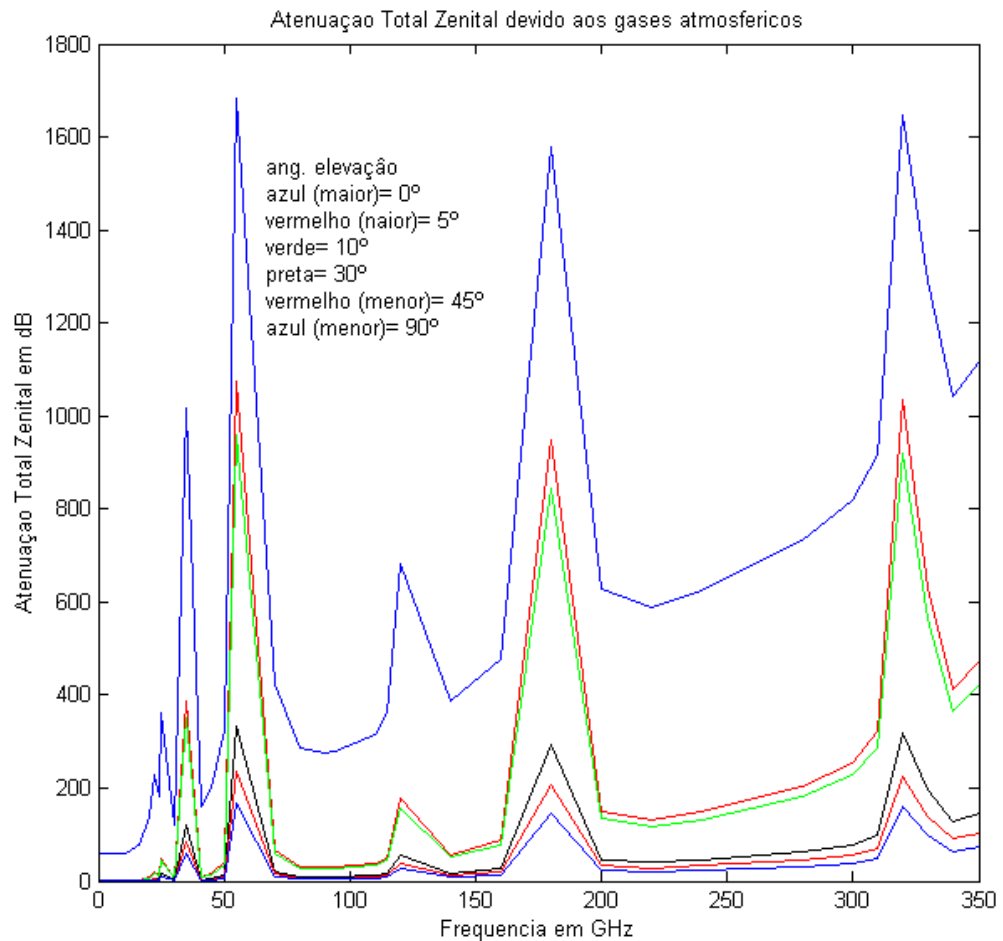


Figura 2.2 – Atenuação Total Zenital devido aos gases atmosféricos (oxigênio e vapor de água) calculada pelo processo de regressão múltipla

2.3 Modelo do CCIR para atenuação devido à chuva [6]

O modelo CCIR consiste de três métodos definidos como:

Método I : para clima marítimo

Método II : para clima continental e/ou porcentagem maior que 0,01%

Método I' : clima tropical

Os parâmetros de entrada são:

f : frequência (GHz)

θ : ângulo de elevação (graus)

G : elevação da estação terrena em relação ao nível do mar (km)

ϕ : latitude da estação terrena (graus)

Neste trabalho focalizar-se-á apenas o Método I' - Clima Tropical, os demais métodos poderão ser vistos em "Radiowave Propagation in Satellite Communications", seção 5.5 combinada com o Apêndice E [6].

Passo 1: determinar a altura da camada de chuva h_R

$$h_R = 5,1 - 2,15 \log \left[1 + 10^{[(|\phi| - 27) / 25]} \right] \quad (2.11)$$

Modifica-se o h_R aplicando o coeficiente ρ que ajusta a altura da camada de chuva em função da latitude [6].

$$h'_r = \rho h_R \quad (2.12)$$

Onde

$$\rho = \begin{cases} 0,6 & , \quad |\phi| < 20^\circ \\ 0,6 + 0,02(\phi - 20) & , \quad 20 \leq |\phi| \leq 40^\circ \\ 1,0 & , \quad |\phi| > 40^\circ \end{cases}$$

Passo 2. Calcular o comprimento do trecho L_s

$$L_s = \frac{2(h_R - G)}{\left[\sin^2 \theta + (h_R - G / 4250) \right]^{1/2} + \sin \theta} \quad (2.13)$$

O raio efetivo da Terra foi usado como 8500 km.

Para $\theta \geq 10^\circ$,

$$L_s = \frac{h_R - G}{\sin \theta} \quad (2.14)$$

Passo 3: Calcular a projeção horizontal do trecho,

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (2.15)$$

Passo 4. Calcular o fator de redução,

$$r_p = \frac{90}{90 + 4L_G} \quad (2.16)$$

Passo 5. Obter a taxa R_p excedida em 0,01% para a localidade de interesse, neste trabalho, conforme a seção 1.4.1. Se a informação não é disponível usar a tabela 2.5 combinada com as figura 2.2.

Passo 6. Obter a atenuação específica γ ,

$$\gamma = a R^b \text{ (dB/km)} \quad (2.17)$$

onde a e b são obtidos através da tabela 1.3 (capítulo I).

Passo 7. Calcular a atenuação excedida em 0,01% do tempo,

$$A_{0,01} = \gamma L_s r_p \quad (2.18)$$

Passo 8. A atenuação A_p , para outras porcentagens “p” da média anual são dadas aplicando o resultado da equação 2.18 em :

$$A_p = \begin{cases} A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-0,33} & , \quad 0,001 \leq p \leq 0,01 \\ A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-0,41} & , \quad 0,01 < p \leq 0,1 \\ A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-0,5} & , \quad 0,1 < p \leq 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

Tabela 2.5 - Distribuição da taxa de chuva do modelo do CCIR

P (%) tempo	Valores da taxa de distribuição de chuvas (mm/h)													
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
1,0	-	1	-	3	1	2	-	-	-	2	-	4	5	12
0,3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0,001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

A figura 2.3, mostra as regiões das américas para usar o modelo do CCIR. Nota-se que ela coloca a maior parte do território brasileiro na região N. Considerando que para os cálculos utiliza o percentual em valor absoluto da distribuição da taxa de chuva de 0,01% de um ano, tem-se que utilizar o valor de 95 mm/h, conforme tabela 2.5.

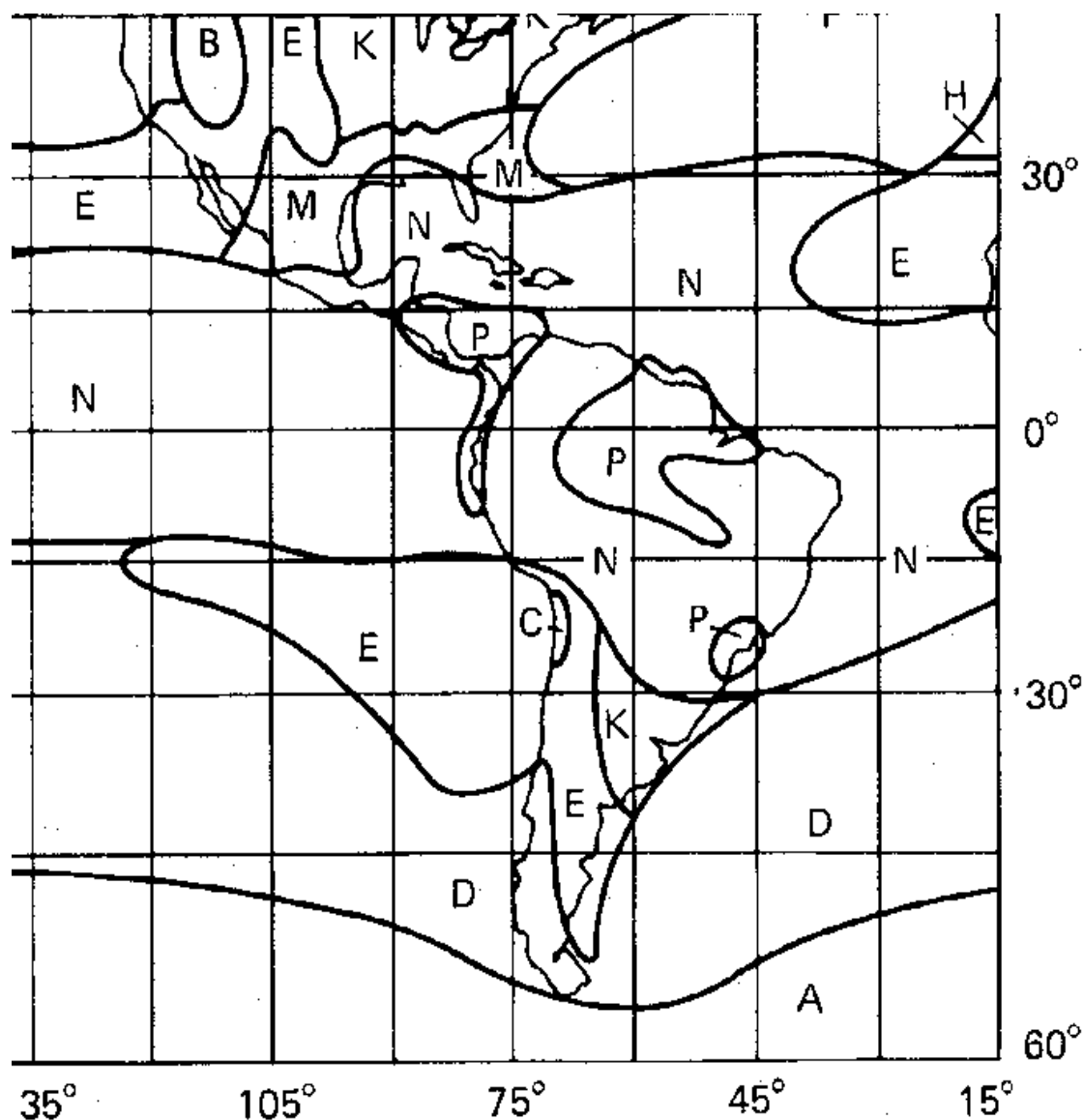


Figura 2.3 - Regiões das Américas para usar o modelo do CCIR

2.4 Modelo de Crane

Roteiro de Cálculo da Atenuação Devido à Chuva pelo Modelo Global de Crane para enlace via satélite [8] , [18] e [24].

Os parâmetros de entrada para utilizar o modelo global de Crane são:

f : frequência (GHz)

θ : ângulo de elevação da estação terrena ($^{\circ}$)

G : altura da estação terrena em relação ao nível do mar (km)

ϕ : latitude da estação terrena ($^{\circ}$)

A figura 2.4, mostra as regiões das américas para usar o modelo do Crane Global . Nota-se que ela coloca a maior parte do território brasileiro na região G. Considerando que para os cálculos utiliza o percentual em valor absoluto da distribuição da taxa de chuva de 0,01% de um ano, tem-se que utilizar o valor de 67 mm/h, conforme tabela 2.6.

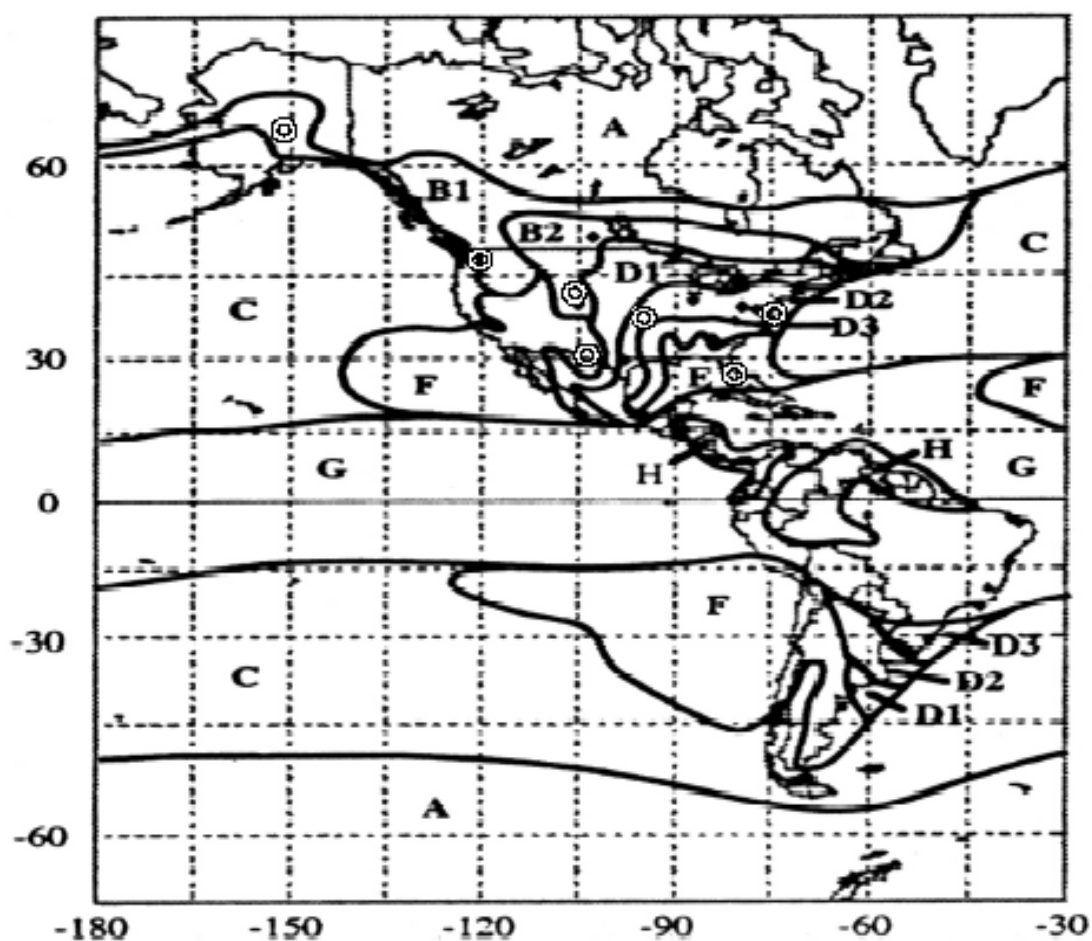


Figura 2.4 - Regiões das Américas para usar o Modelo Crane Global

Conforme indicado na figura 2.4 tem-se:

Clima Polar:

A - seco

B - moderado

Clima Temperado:

C - marítimo

D - continental

Clima Sub-Tropical:

E - úmido

F - árido

Clima Tropical:

G - moderado

H - úmido

Tabela 2.6 – Pontos de distribuição de taxa de chuva por região conforme Modelo Crane Global

P % Tempo	Pontos com taxa de distribuição de Chuvas (mm/h) para as regiões segundo o Modelo Crane Global									
	A	B	C	D1	D2	D3	E	F	G	H
0.001	28	54	80	90	102	127	164	66	129	251
0.002	24	40	62	72	86	107	144	51	109	220
0.005	19	26	41	50	64	81	117	34	85	178
0.01	15	19	28	37	49	63	98	23	67	147
0.02	12	14	18	27	35	48	77	14	51	115
0.05	8	9.5	11	16	22	31	52	8.0	33	77
0.1	6.5	6.8	7.2	11	15	22	35	5.5	22	51
0.2	4.0	4.8	4.8	7.5	9.5	14	21	2.8	14	31
0.5	2.5	2.7	2.8	4.0	5.2	7.0	8.5	2.4	7.0	13
1.0	1.7	1.8	1.9	2.2	2.0	4.0	4.0	1.7	2.7	6.4
2.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.8	2.5	2.0	1.1	1.6	2.8

Exemplo de leitura da tabela 2.6 – A probabilidade de chover mais de 67 mm/h na região G, na qual o Brasil está inserido, é de 0,01 % do ano.

A tabela 2.7 mostra alguns valores de latitudes que relacionadas com as probabilidades de ocorrência de chuva dão os valores das alturas isotérmicas.

Tabela 2.7- Altura isotérmica 0° (km) como uma função da localização do grupo de estações (latitude) e a probabilidade de ocorrência para o Modelo de Crane

Probab. p	0°	10°	15,62°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
1.0	4.7	4.6	4,4	4.2	2.6	2.5	1.3	0.3	0
0.1	4.8	4.8	4,7	4.5	4.2	2.3	2.1	1.3	1.0
0.01	5.2	5.3	5,3	5.3	4.6	4.1	2.1	2.3	1.5
0.001	5.4	6.0	6,1	6.2	5.3	4.6	4.0	2.3	2.5

A coluna para latitude de 15,62° - Cuiabá, foi criada através de cálculo por interpolação linear.

A figura 2.5, baseada na tabela 2.7, foi obtida tomando-se o vetor de latitudes (0° a 70°) e os vetores das alturas isotérmicas em função probabilidades, ou seja, para a probabilidade 1.0 tem-se altura isotérmica de 4,7 a 0 km, segunda linha da tabela. Usa-se a mesma metodologia para os vetores.

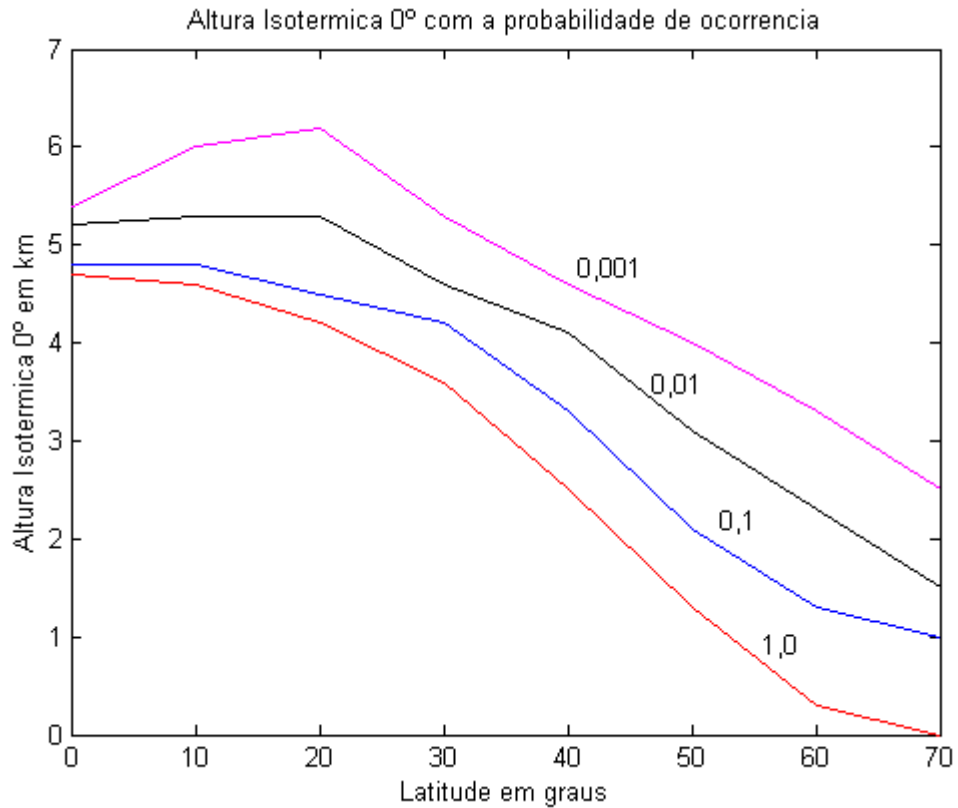


Figura 2.5 – Altura isotérmica 0° como uma função da localização do grupo de estações (latitude) para o Modelo de Crane

O método para determinar a distribuição da média anual da atenuação devido à chuva, segue os seguintes passos:

1- Obter a taxa anual da distribuição de chuva, R_p , para valores de p entre 1% a 0,001% de uma média anual para o local desejado. Se estas informações não existirem no arquivo do local em estudo, utilize a distribuição de taxa de chuva listada na tabela 2.6, como determinados pelos climas das regiões dados pelo mapa da figura 2.3

2- Determinar a altura isotérmica 0°, $H_{(p)}$, para cada percentual ano, figura 2.5. Os valores de p iguais a 0,001, 0,01, 0,1 e 1% podem ser lidos diretamente desta figura; outros valores poderão ser obtidos através da interpolação logarítmica entre as curvas.

3- Calcular o comprimento do percurso projetado D para cada p percentual do ano, conforme a seguir:

Para $\theta \geq 10^\circ$

$$D = \frac{H_{(p)} - G}{\tan \theta} \quad (2.20)$$

Onde $H_{(p)}$ são os valores das alturas isotérmicas obtidas conforme passo 2.

G é altura da estação terrena em relação ao nível do mar e θ é o ângulo de elevação da estação terrestre para o satélite.

Para ângulo de elevação menor que 10° , em função da curvatura da superfície da Terra, o D pode ser calculado como segue:

Para $\theta < 10^\circ$

$$D = R \cdot \text{sen}^{-1} \left[\frac{\cos \theta}{H_{(p)} + R} \left(\sqrt{(G + R)^2 \cdot \text{sen}^2 \theta + 2R(H_{(p)} - G) + H_{(p)}^2 - G^2} - (G + R) \cdot \text{sen} \theta \right) \right] \quad (2.21)$$

Onde R é o raio efetivo da Terra, aqui assumido como 8500 km.

4- Determinar os coeficientes a e b da atenuação específica para a frequência e polarização desejada. Recomenda-se os valores da tabela 1.3.

5- Determinar as quatro constantes empíricas da R_p para cada p desejado

$$\begin{aligned} d &= 3,8 - 0,6 \cdot \ln R_p \\ x &= 2,3 R_p^{-0,17} \\ y &= 0,026 - 0,03 \ln R_p \\ U &= \frac{\ln(xe^{yd})}{d} \end{aligned} \quad (2.22)$$

6- Obter a atenuação para cada probabilidade de ocorrência p em percurso inclinado:

(a) Se $0 < D \leq d$

$$A_{(p)} = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left[\frac{e^{Ubd} - 1}{Ub} \right] \quad (2.23)$$

(b) Se $d < D \leq 22,5$

$$A_{(p)} = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left[\frac{e^{Ubd} - 1}{Ub} - \frac{x^b e^{ybd}}{yb} + \frac{x^b e^{ybd}}{yb} \right] \quad (2.24)$$

(c) Se $D > 22,5$ calcular $A_{(p)}$ com $D = 22,5$ usando a taxa de chuva R'_p encontrando o p' como segue:

$$p' = p \left| \frac{22,5}{D} \right| \quad (2.25)$$

no lugar de R_p

7- Estimar os limites superior e inferior do método da atenuação para trecho inclinado (isto é, o desvio padrão das medidas sobre o modelo) da seguinte forma:

Percentual do ano	Desvio Padrão (%)
1,0	39
0,1	32
0,01	32
0,001	39

Desvio padrão da atenuação – é a diferença entre a média dos valores da atenuação e cada valor da atenuação.

A figura 2.6, traça a relação entre a atenuação em dB e a probabilidade de ocorrência desta em função da latitude da estação terrena.

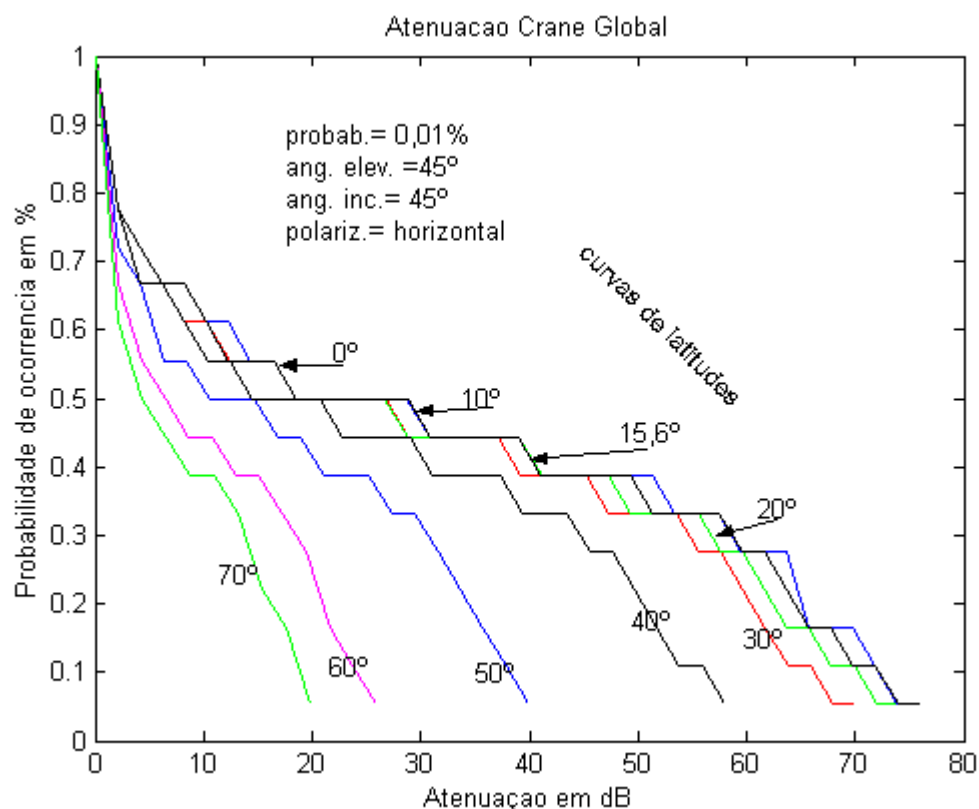


Figura 2.6 – Probabilidade de tempo de ocorrer a atenuação pelo Modelo Global Crane em várias latitudes

Na figura 2.6, têm-se as latitude de 0°; 10; 15,6°; 20°; 30°; 40°; 60° e 70° – observa-se na ordenada a probabilidade de ocorrer a atenuação na abscissa. Por exemplo, a probabilidade da atenuação ser maior que 40 dB é de 0,35% para latitude 40° e de 0,45% para latitude de 0°, 10° e 15,6°.

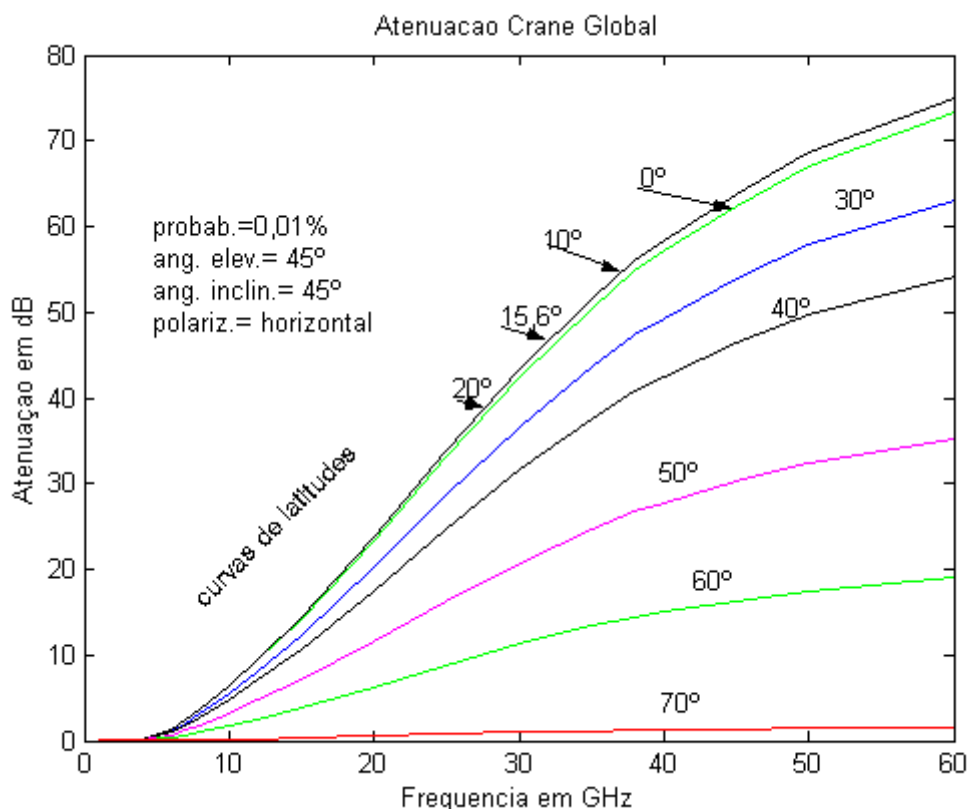


Figura 2.7 – Atenuação em dB em relação a frequência considerando várias latitudes pelo Modelo Global Crane

Pela figura 2.7 tem-se que para qualquer latitude na faixa de frequência de 7 a 12 GHz as atenuações são próximas e não ultrapassam a 10 dB. Com o aumento da frequência a atenuação cresce exponencialmente, sendo que quanto menor a latitude, maior será a atenuação.

2.5 Conclusão

Como se viu, o efeito da chuva é muito significativo na propagação de microondas. A atenuação aumenta muito quando o teor de água da atmosfera aumenta no caminho por onde as microondas trafegam. A 6 GHz, a atenuação devido ao vapor d'água no ar é apenas 0,001 dB/Km. Quando a taxa de água aumenta para neblina e depois uma chuva fraca, a atenuação cresce para 0,01 dB/km e para uma chuva muito forte, a atenuação é aproximadamente 1 dB/Km. Para uma distância de 40 km, uma chuva torrencial irá causar uma atenuação de 40 dB, o que é suficiente para causar problemas na transmissão. Normalmente, uma chuva não cobre uma distância de 40 km.

O modelo CCIR apesar de ser resultado de muitas medições em campo, faz uma aproximação muito forçada, quando recomenda aplicar o mesmo índice de taxa de chuva para a maior parte o território brasileiro (vide figura 2.3 região N). Da mesma forma, o modelo Crane, recomenda através da região G (vide figura 2.4), o mesmo tratamento a nível de taxa de chuva para o Brasil. Os procedimentos de cálculos diferenciados, considerando enlace via satélite, para diversas cidades em estudo serão mostrados nos capítulos V deste trabalho.

CAPÍTULO III

MODELOS DE CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA EM ENLACE TERRESTRE

3.1 Introdução

Neste capítulo serão mostrados os procedimentos para o cálculo da atenuação devido à chuva, aplicados por três modelos em enlace de comunicação para trechos terrestres, figura 3.1.

Primeiramente tratar-se-á do Modelo ITU-R [10], [11] e [12], cuja taxa de distribuição da chuva é solicitada para prever a atenuação com a finalidade de estimar percentual de tempo indisponível no link acima de 10 GHz. Além disto, é recomendado que a distribuição seja deduzida a partir dos dados de chuvas obtidos com um tempo de integração de 1 minuto ou menos. Entretanto, para este tempo são limitados os dados disponíveis. Há sim uma grande quantidade de dados de chuvas coletados por agências meteorológicas em muitos países e que estão disponíveis para maior tempo de integração.

Outra forma de calcular a atenuação é pelo modelo de Crane [13] e [14], versão terrestre, que emprega a informação meteorológica sobre a intensidade e a estrutura espacial das chuvas. Trata-se de um modelo baseado em ajustes de atenuações por chuvas medidas e pode ser aplicado em regiões climáticas diferentes, com diferentes geometrias e sobre uma ampla variedade de frequências.

Por último, abordar-se-á o modelo proposto por Fidele Moupfouma [15], que prevê a atenuação devido à chuva induzida num trecho terrestre a partir do conhecimento de 1 minuto de intensa chuva. Ele usou dados experimentais obtidos em links de radio terrestre na faixa de 7 a 38 GHz com comprimento de trechos de 1,3 a 58 km, feitos em vários países.

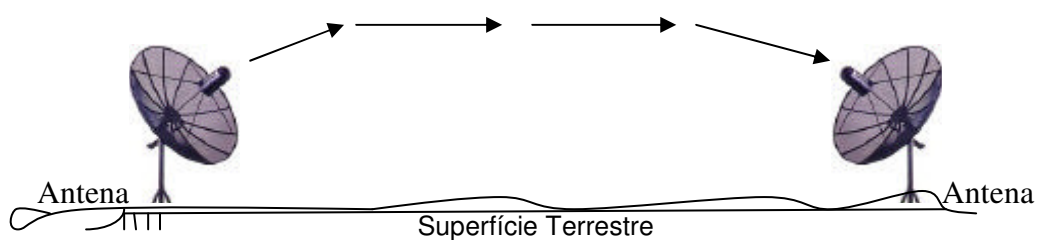


Figura 3.1 – Enlace de comunicação via terrestre

3.2 Modelo ITU-R

Este modelo baseia-se numa técnica simples que pode ser usada para estimar a longo prazo a estatística da atenuação devido à chuva.

Os passos são:

- 1- Obter a taxa de chuva $R_{0,01}$ excedida por 0,01% do tempo.
- 2- Calcular a atenuação específica $\gamma_R (dB/km)$ para a taxa de chuva com a frequência e polarização da transmissão.

- 3- Calcular o comprimento do percurso efetivo, d_{eff} , multiplicando o comprimento total d (distância que separa as antenas) pelo fator de distância r , como:

$$d_{eff} = r \cdot d \quad (3.1)$$

sendo r dado por:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (3.2)$$

onde d_0 é o fator de dependência da taxa de chuva introduzida para expressar o fato de que quanto maior for a intensidade de chuva menor será a dimensão física desta. Esta quantia é dada por [16], [17]:

$$d_0 = 35e^{-0,015 \cdot R_{0,01}} \quad (3.3)$$

Isto se $R_{0,01} \leq 100$ mm/h. Caso seja maior que 100 mm/h, o valor 100 mm/h deve ser usado no lugar de $R_{0,01}$.

Finalmente, a atenuação excedida para 0,01% do tempo é dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{eff} = \gamma_R \cdot d \cdot r \quad (3.4)$$

Se as estatísticas da atenuação forem usadas para outros tempos percentuais, elas podem ser obtidas por:

$$A_p = A_{0,01} \cdot 0,12 \cdot p^{-(0,546 - 0,0431 \cdot \log_{10} p)} \quad (3.5)$$

Onde p é o outro tempo percentual desejado no intervalo de $0,001\% \leq p \leq 1\%$ [10], [11].

3.3 Modelo Crane

Baseia-se em ajustes de atenuações por chuvas medidas e pode ser aplicado em regiões climáticas diferentes, com diferentes geometrias e sobre uma ampla variedade de frequências.

Esta forma resulta da utilização de duas funções exponenciais na faixa de comprimentos de enlace compreendidos entre 0 e 22,5 km: uma distância D que vai desde 0 até uma distância “x”, e a outra distância “L” que vai de “x” até 22,5 km. Assim, a atenuação por chuvas é dada por [8]:

$$A_{(dB)} = K \cdot R_p^\alpha \left[\frac{e^{\mu\alpha d} - 1}{\mu\alpha} - \frac{g^\alpha \cdot e^{c\alpha d}}{c\alpha} + \frac{g^\alpha \cdot e^{c\alpha D}}{c\alpha} \right] ; \quad \text{para } L \leq D \leq 22,5 \text{ Km} \quad (3.6)$$

$$A_{(dB)} = K.R_p^\alpha \left[\frac{e^{\mu\alpha D} - 1}{\mu\alpha} \right] ; \text{ para } 0 \leq D < L \text{ Km} \quad (3.7)$$

onde R_p é a taxa de precipitação para uma percentagem de tempo “p” e os restantes coeficientes são dados por:

$$g = 2.3R_p^{-0.17}$$

$$c = 0.026 - 0.031 \ln R_p$$

$$d = 3.8 - 0.6 \ln R_p$$

onde d é em Km

$$\mu = \frac{\ln(g.e^{cd})}{2} \quad (3.8)$$

Caso $D \geq 22,50$ Km, deve-se utilizar uma nova taxa de precipitação R'_p dada por

$$R'_p = R_p \left(\frac{22.5}{D} \right) \quad (3.9)$$

A atenuação específica γ é dada por:

$$\gamma_{(dB/km)} = aR^b \quad (3.10)$$

onde **a** e **b** são parâmetros de regressão que dependem da frequência e do tipo de polarização.

Para polarização linear e circular temos:

$$a = \frac{1}{2} \left[a_h + a_v + (a_h - a_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau \right] \quad (3.11)$$

$$b = \frac{1}{2a} \left[a_h \cdot b_h + a_v \cdot b_v + (a_h \cdot b_h - a_v \cdot b_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau \right] \quad (3.12)$$

onde:

θ = ângulo de elevação

τ = ângulo de inclinação da polarização em graus com respeito à horizontal, para polarização circular τ é igual a 45°.

a_h, b_h, a_v, b_v = parâmetros de regressão conforme tabela 1.3

Para obter a_h, b_h, a_v, b_v cujas frequências não constam na tabela, usa-se interpolação logarítmica para encontrar o parâmetro **a** e usa-se interpolação linear para encontrar o parâmetro **b**.

Sejam a_1 , a_2 , b_1 e b_2 parâmetros correspondentes das frequências f_1 e f_2 a serem interpoladas os valores de a e b na nova frequência são:

$$a_f = \log^{-1} \left\{ \log \frac{a_2}{a_1} \left[\frac{\log \frac{f}{f_1}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \right] + \log a_1 \right\} \quad (3.13)$$

$$b_f = \left\{ [b_1 - b_2] \left[\frac{\log \frac{f}{f_1}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \right] + b_2 \right\} \quad (3.14)$$

3.4 Modelo Moupfouma

Fidele Moupfouma [15], propôs um modelo empírico resultado de experiências obtidas em diferentes trechos de comunicação de rádio via terrestre na faixa de 7 a 38 GHz com comprimento de trechos de 1,3 a 58 km. No entanto, diferentemente dos demais modelos, este emprega a taxa de 1 minuto correspondente a percentagem do tempo p , durante a qual aquela taxa de chuva foi excedida. Foram feitos ajustes para que o trabalho ficasse de acordo com o método proposto pelo International Radio Consultative Committee (CCIR), hoje ITU-R [17].

Para introduzir a função distribuição pela estatística obtida, usou-se a função distribuição Moupfouma [18], pela equação que segue:

Onde u é um coeficiente constante de valor real positivo igual a $u = 2,5 * 10^{-2}$

$$f(r) = a \frac{e^{-ur}}{r^b} \left(u + \frac{b}{r} \right) \quad (3.15)$$

o processo foi concluído estabelecendo coeficientes para conversão em vários tempos de integração, conforme a tabela 3.1

Tabela 3.1 – Coeficientes de aproximação para o modelo Moupfouma

Tempo (min.)	a	b	U
1	0,075	1,12	0,025
10	0,065	1,12	0,025
20	0,057	1,12	0,025
30	0,052	1,12	0,025
60	0,046	1,12	0,025

Para ajustar ao CCIR, taxa de chuva moupfouma, estabelece-se a dependência do tempo de integração, com a seguinte relação:

$$a_p = 0,045 + 0,032 e^{\frac{t}{17,45}} \quad (3.16)$$

Portanto, dependendo do tempo de integração tem-se o coeficiente α_r . Neste trabalho, este valor é de 0,7446, que equivale ao tempo de 60 minutos, inserido na equação 3.16.

Com o coeficiente α_r , encontra-se a taxa de chuva moupfouma. Esta taxa é resultado da conversão pelo método da igualdade da probabilidade baseada em aproximações, proposto por Burgueño [19], expressada pela equação 3.17.

$$R_m = \alpha_r (R)^b \quad (3.17)$$

Sendo α_r e b coeficientes vistos acima.

3.5 Conclusão

Viu-se neste capítulo a parte teórica dos modelos destinados aos cálculos de atenuações para enlace via terrestre. Nestes enlaces predominam grandemente a atenuação em função da chuva, pois se trata de trechos terrestres com antenas transmissoras e receptoras cujos sinais transmitidos ao serem interceptados por células de chuvas sofrem queda em suas potências de transmissão. Tanto para o modelo ITU-R, Crane e o Moupfouma usar-se-á a distância de enlace de 5 km. O modelo Crane fraciona a distância do enlace terrestre em duas partes D e L e de acordo com os valores destas distâncias, limitadas a 22,5 km, emprega-se uma equação diferente para se obter a atenuação devido a chuva, já o Moupfouma converte a taxa de chuva excedente de 0,01% através de coeficientes próprios para uma precipitação em outro tempo. Os cálculos estão no capítulo VI.

CAPÍTULO IV

MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO DE CHUVA

4.1 Introdução

Os principais fatores capazes de influenciar a energia em propagação na troposfera são a absorção por gases atmosféricos e a atenuação por hidrometeoros existentes, como a chuva, neve, nevoeiro e nuvens, sendo que no primeiro caso, parte da energia em propagação é absorvida pelas moléculas de oxigênio e vapor d'água para alterar seus níveis de energia.

Na baixa atmosfera esta absorção é crítica para o oxigênio em torno da frequência de 60 GHz, e para o vapor d'água em torno de 22,3 GHz. Em frequências afastadas destes picos de absorção a influência dos gases atmosféricos reduz-se bastante, e então a atenuação por hidrometeoros, particularmente a chuva, passa a desempenhar papel dominante no dimensionamento de enlaces, onde o objetivo é prover a qualidade do sinal na recepção mesmo em condições críticas no percurso de propagação.

A atenuação por chuvas consiste na absorção e espalhamento da energia em propagação pelas partículas de água existentes no meio. As gotas de chuva comportam-se como um meio dielétrico dissipativo para o campo elétrico incidente, absorvendo energia ou espalhando-a em diversas direções. As dimensões das gotas tornam-se comparáveis ao comprimento de onda do sinal nas frequências acima de 10 GHz.

4.2 Medidas do INPE / INMET

Os dados foram coletados na estação INMET [19] – A901, Latitude: - 15,6166°, Longitude: - 56,1000° e Altitude: 151,34 metros, localizada no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento em Várzea Grande, região metropolitana de Cuiabá no Estado de Mato Grosso. A partir de um documento chamado “Normais Climatológicas” obteve-se dados climatológicos de várias cidades e optou-se para este trabalho pelas cidades de Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Cuiabá (MT), Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Belo Horizonte (MG), Salvador (BA), Natal (RN), São Gonçalo (PB) e Quixeramobim (CE).

4.3 Dados e Medidas

As taxas de distribuições médias de chuvas das cidades abaixo, publicadas pelo INMET no documento Normais Climatológicas, referem-se à média de chuva anual, em milímetro, ocorrida no período de 1961 a 1990.

1. Rio Branco (AC) = 1943,20 mm
2. Porto Velho (RO) = 2353,70 mm
3. Cuiabá (MT) = 1315,10 mm
4. Porto Alegre (RS) = 1347,40 mm
5. Curitiba (PR) = 1407,9mm
6. Belo Horizonte (MG) = 1491,30mm
7. Salvador (BA)= 2098,70mm

8. Natal (RN) = 1431,00 mm
9. São Gonçalo (PB) = 1000,30 mm
10. Quixeramobim (CE) = 858,50 mm

Os dados de chuva de curta duração e alta intensidade são bastante escassos na maior parte do País e, mesmo em regiões onde a existência de pluviográficos é satisfatória, verifica-se que os registros disponíveis carecem de tratamento sistemático para que sejam utilizados.

Os dados que são empregados neste trabalho, foram publicados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo em 1980, aprimorando a publicação do Departamento Nacional de Obras de Saneamento – DNOS, em 1957, com o título “Chuvas Intensas no Brasil” [20]. Desde então este trabalho vem sendo utilizado amplamente, quando se deseja conhecer a relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas intensas de curta duração.

Frisa-se o caráter aproximado dessas relações, uma vez que o banco de dados existente não é suficiente para se fazer um profundo estudo de qualidade das relações citadas.

Com base no trabalho do DNOS, o Instituto Agrônomo e Geofísico da Universidade de São Paulo mostrou que a intensidade de chuva de “1 dia” e de “2 dias” pode ser considerada como estimativa bastante aproximada da chuva de “24 horas” (tempo corrido). A relação entre as chuvas de 24 horas e de 1 dia, é quase constante, 1.14, e independente do tempo de retorno, ou seja, independente da estimativa em anos da possibilidade de ocorrer uma intensidade de chuva.

Seguindo esta mesma metodologia, e pelo fato do referido trabalho não trazer os dados referentes a retorno de 1 ano, que será utilizado nesta dissertação, fez-se a relação entre o retorno de 1 ano (T1) e o de 2 anos (T2).

Para se obter os valores de T1, valeu-se das equações de intensidade-duração-frequência de: Cuiabá [21], São Paulo, Curitiba, Rio de Janeiro e Belo Horizonte [22]. Estas equações permitem ao interessado variar o tempo de retorno; por isso, encontrou-se os dados para 1 ano. Assim, notou-se que a relação entre T1 e T2, independente da cidade, é praticamente constante, 0,90.

Desta forma, aplicando o fator 0,90, nos dados de 2 anos de retorno da tabela DNOS, tem-se os dados de 1 ano.

Para o que se pretende, escolheu-se as cidades de Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Cuiabá (MT), Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Belo Horizonte (MG), Salvador (BA), Natal (RN), São Gonçalo (PB) e Quixeramobim (CE) que formam um corredor geográfico, representativo da região N, figura 2.3, pelo método CCIR e região G, figura 2.4, pelo método de Crane.

As tabelas 4.1 a 4.10, mostram os dados do trabalho do DNOS acrescentada da coluna (retorno de 1 ano) gerada pelo fator 0,90, para as cidades em estudo.

Tabela 4.1 - Precipitação – Duração – Frequência, Rio Branco – AC

Dura- ção (min.)	Precipitação mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	12,24	13,60	14,40	15,30
10	18,90	21,00	22,80	24,50
15	23,67	26,30	29,40	32,00
20	27,27	30,30	34,30	37,50
25	30,24	33,60	38,50	42,50
30	32,85	36,50	42,30	48,90
53	40,92	45,47	54,18	61,70
60	43,38	48,20	57,80	65,60
120	53,55	59,50	72,00	82,20
240	64,26	71,40	87,10	99,90
360	70,65	78,50	95,00	110,10
480	75,42	83,80	102,50	117,80
530	76,99	85,55	104,50	120,21
600	79,20	88,00	107,50	123,60
720	82,44	91,60	111,80	128,40
840	85,23	94,70	115,50	132,60
1440	95,85	106,50	129,50	148,20

Tabela 4.2 - Precipitação – Duração – Frequência, Porto Velho – RO

Dura- ção (min.)	Precipitação mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	14,49	16,1	17,8	19,1
10	21,78	24,2	26,9	29,1
15	26,73	29,7	33,2	36,2
20	30,51	33,9	38,1	41,6
25	33,66	37,4	42,2	46,3
30	36,27	40,3	45,7	50,3
53	45,10	50,11	58,58	65,63
60	47,79	53,1	62,5	70,3
120	58,95	65,5	77,8	88,1
240	68,85	76,5	93,9	106,9
360	77,67	86,3	103,4	117,7
480	82,89	92,1	110,4	125,8
530	84,57	93,97	112,60	128,34
600	86,94	96,6	115,7	131,9
720	90,81	100,9	120,3	136,9
840	93,24	103,6	124,2	141,3
1440	104,76	116,4	138,7	157,4

Tabela 4.3 - Precipitação – Duração – Frequência, Cuiabá – MT

Duração (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	12,96	14,4	16,60	18,20
10	19,53	21,7	25,10	27,60
15	23,94	26,6	31,10	34,30
20	27,36	30,40	35,50	39,50
25	30,15	33,50	39,30	43,90
30	32,49	36,10	42,60	47,70
53	38,90	43,23	50,88	57,13
60	40,86	45,40	53,40	60,00
120	50,22	55,80	66,30	75,00
240	59,94	66,60	79,60	90,60
360	65,61	72,90	87,30	99,40
480	69,75	77,50	92,90	105,80
530	71,06	78,95	94,60	107,75
600	72,90	81,00	97,00	110,50
720	75,51	83,90	100,50	114,40
840	77,76	86,40	103,40	117,70
1440	85,86	95,40	115,70	129,10

Tabela 4.4 - Precipitação – Duração – Frequência, Porto Alegre – RS

Duração (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	9,09	10,10	11,20	12,10
10	14,04	15,60	17,70	19,40
15	17,64	19,60	22,80	25,30
20	20,16	22,40	26,20	29,10
25	22,23	24,70	29,00	32,40
30	23,94	26,60	31,50	35,20
53	29,32	32,58	39,01	44,09
60	30,96	34,40	41,30	46,80
120	38,34	42,60	51,70	59,00
240	46,35	51,50	62,90	72,20
360	51,30	57,00	69,70	80,00
480	55,17	61,30	74,90	86,10
530	56,44	62,71	76,60	88,05
600	58,23	64,70	79,00	90,80
720	60,84	67,60	82,60	94,90
840	63,27	70,30	85,80	98,50
1440	72,81	80,90	98,30	112,60

Tabela 4.5 - Precipitação – Duração – Frequência, Curitiba – PR

Duração (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	11,34	12,60	15,10	16,80
10	17,10	19,00	22,80	25,60
15	20,97	23,30	28,20	31,80
20	23,94	26,60	32,30	36,60
25	26,37	29,30	35,80	40,60
30	28,44	31,60	38,80	44,20
53	33,40	37,12	44,78	50,79
60	34,92	38,80	46,60	52,80
120	43,11	47,90	58,00	66,20
240	51,57	57,30	70,00	80,30
360	56,70	63,00	76,90	88,40
480	60,48	67,20	82,10	94,40
530	61,71	68,57	83,76	96,31
600	63,45	70,50	86,10	99,00
720	65,97	73,30	89,40	102,70
840	68,13	75,70	92,30	106,00
1440	76,23	84,70	103,00	117,00

Tabela 4.6 - Precipitação – Duração – Frequência, Belo Horizonte - MG

Duração (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	11,61	12,90	15,10	16,70
10	17,37	19,30	22,80	25,40
15	21,42	23,80	28,20	31,50
20	24,48	27,20	32,40	36,30
25	26,91	29,90	35,90	40,40
30	29,07	32,30	38,90	43,90
53	34,31	38,12	45,03	50,72
60	35,91	39,90	46,90	52,80
120	44,55	49,50	58,80	66,60
240	54,09	60,10	71,90	81,80
360	60,03	66,70	79,90	91,00
480	64,71	71,90	86,20	98,20
530	66,32	73,69	88,28	100,57
600	68,58	76,20	91,20	103,90
720	71,91	79,90	95,60	108,90
840	74,88	83,20	99,60	113,30
1440	87,21	96,90	115,50	131,10

Tabela 4.7 - Precipitação – Duração – Frequência, Salvador – BA

Duração (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	8,28	9,20	10,00	10,60
10	13,95	15,50	17,50	19,00
15	18,54	20,60	24,00	26,60
20	21,87	24,30	28,40	31,60
25	24,57	27,30	32,10	35,80
30	27,00	30,00	33,40	39,60
53	35,14	39,04	46,97	54,09
60	37,62	41,80	51,10	58,50
120	48,51	53,90	66,60	76,80
240	60,57	67,30	83,70	97,00
360	68,13	75,70	94,30	109,30
480	73,89	82,10	102,40	118,70
530	75,87	84,30	105,10	121,82
600	78,66	87,40	108,90	126,20
720	82,71	91,90	114,40	132,60
840	86,40	96,00	119,40	138,30
1440	100,98	112,20	139,10	160,70

Tabela 4.8 - Precipitação – Duração – Frequência, Natal – RN

Duração (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	9,09	10,1	10,80	11,40
10	14,04	15,60	17,00	18,30
15	17,73	19,70	22,00	23,90
20	20,52	22,80	26,00	26,60
25	23,04	25,60	29,70	32,90
30	23,40	26,00	33,10	37,00
53	31,12	34,58	42,60	48,50
60	33,48	37,20	45,50	52,00
120	41,67	46,30	57,20	65,90
240	50,85	56,50	70,30	81,40
360	56,79	63,10	78,60	91,10
480	61,47	68,30	85,10	98,70
530	63,08	70,09	87,35	101,28
600	65,34	72,60	90,50	104,90
720	68,85	76,50	95,20	110,30
840	72,00	80,00	99,60	115,30
1440	85,23	94,70	117,40	135,60

Tabela 4.9 - Precipitação – Duração – Frequência, São Gonçalo – PB

Dura- ção (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	11,43	12,70	13,50	14,30
10	18,09	20,10	22,40	24,30
15	23,22	25,80	30,10	33,30
20	26,73	29,70	35,00	39,00
25	29,70	33,00	39,30	44,10
30	32,31	35,90	43,20	48,80
53	40,24	44,71	55,46	63,75
60	42,66	47,40	59,20	68,30
120	52,74	58,60	73,80	85,80
240	63,45	70,50	89,50	104,60
360	70,02	77,80	98,90	115,60
480	74,97	83,30	106,00	124,00
530	76,65	85,17	108,29	126,66
600	79,02	87,80	111,50	130,40
720	82,35	91,50	116,30	135,90
840	85,41	94,90	120,40	140,70
1440	97,11	107,90	136,50	159,00

Tabela 4.10 - Precipitação – Duração – Frequência, Quixeramobim – CE

Dura- ção (min.)	Precipitação em mm			
	Tempo de Retorno em anos			
	1	2	5	10
5	12,24	13,60	14,50	15,30
10	17,10	19,00	21,00	22,60
15	20,61	22,90	26,10	28,60
20	22,86	25,40	29,30	32,40
25	24,75	27,50	32,10	35,70
30	26,37	29,30	34,60	38,80
53	32,58	36,20	42,34	48,23
60	34,47	38,30	44,70	51,10
120	38,79	43,10	53,20	61,30
240	45,00	50,00	62,20	72,00
360	48,69	54,10	67,40	78,10
480	51,48	57,20	71,30	82,70
530	52,38	58,20	72,55	84,11
600	53,64	59,60	74,30	86,10
720	55,53	61,70	76,80	89,00
840	57,15	63,50	79,10	91,60
1440	63,54	70,60	87,50	101,10

Para se ler as citadas tabelas (4.1 a 4.10), parte-se de um exemplo. Tomando por base a cidade de Cuiabá, tabela 4.3. Por esta tabela, estatisticamente, pelo menos uma vez em 1 ano pode ocorrer uma chuva de

38,91 mm com duração de 53 minutos. Transformando esta precipitação em intensidade de chuva por hora, tem-se: 44,04 mm/h.

Analogamente, tem-se as intensidades de chuvas ou distribuição das taxas de chuvas $R_{0.01}$ em mm/h para outras cidades, conforme tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Taxa de distribuição de chuva em mm/h das cidades em estudo para 0,01% do tempo anual, ou seja 53 minutos

Cidade	$R_{0.01}$ (mm/h)	Cidade	$R_{0.01}$ (mm/h)
Rio Branco	46,33	Belo Horizonte	38,85
Porto Velho	51,06	Salvador	39,90
Cuiabá	44,04	Natal	35,24
Porto Alegre	33,20	São Gonçalo	45,56
Curitiba	37,82	Quixeramobim	36,88

Ainda no processo de composição dos dados necessários aos cálculos das atenuações através dos modelos, serão utilizadas as alturas isotérmicas em função das latitudes das cidades em estudo. Estes dados são mostrados na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Altura Isotérmica 0° (km) como função das latitudes do grupo de estações das cidades em estudo e a probabilidade de ocorrência para o Modelo Crane

Latitude (°)	Probab. e Alt. Isotérmica				Latitude (°)	Probab. e Alt. Isométrica			
	1,0	0,1	0,01	0,001		1,0	0,1	0,01	0,001
0	4,70	4,80	5,20	5,40	13	4,48	4,71	5,30	6,06
5,0	4,65	4,80	5,25	5,70	15,58	4,37	4,63	5,30	6,11
5,20	4,64	4,80	5,25	5,71	19,93	4,20	4,50	5,30	6,19
5,75	4,64	4,80	5,25	5,74	20	4,20	4,50	5,30	6,20
6,76	4,63	4,80	5,26	5,80	25,41	3,87	4,33	4,92	5,71
8,76	4,61	4,80	5,28	5,92	30	3,60	4,20	4,60	5,30
9,96	4,60	4,80	5,29	5,99	30,03	3,59	4,19	4,59	5,29
10	4,60	4,80	5,30	6,00	40	2,50	3,30	4,10	4,60

4.4 Análise probabilística da precipitação

As tabelas 4.13 e 4.14 foram elaboradas tomando-se cada coluna de precipitação de retorno de 1 ano, de cada cidade (tabelas de 4.1 a 4.10) transformando-as de minutos para horas e assim, encontrando-se as respectivas intensidades de chuvas em mm/h.

Tabela 4.13 – Precipitação em mm/h, Retorno de 1 ano

Dura- ção (min.)	Rio Branco (AC)	Porto Velho (RO)	Cuiabá (MT)	Porto Alegre (RS)	Curitiba (PR)
5	146,88	173,88	155,52	109,08	136,08
10	113,40	130,68	117,18	84,24	102,60
15	94,68	106,92	95,76	70,56	83,88
20	81,81	91,53	82,08	60,48	71,82
25	72,57	80,78	72,36	53,35	63,28
30	65,70	72,54	64,98	47,88	56,88
53	46,32	51,05	44,03	33,19	37,81
60	43,38	47,79	40,86	30,96	34,92
120	26,77	29,47	25,11	19,17	21,55
240	16,06	17,21	14,98	11,58	12,89
360	11,77	12,94	10,93	8,55	9,45
480	9,42	10,36	8,71	6,89	7,56
530	8,71	9,57	8,04	6,38	6,98
600	7,92	8,69	7,29	5,82	6,34
720	6,87	7,56	6,29	5,07	5,49
840	6,08	6,66	5,55	4,51	4,86
1440	3,99	4,36	3,57	3,03	3,17

Tabela 4.14 – Precipitação em mm/h, Retorno de 1 ano (cont.)

Dura- ção (min.)	Belo Horiz. (MG)	Salvador (BA)	Natal (RN)	São Gonçalo (PB)	Quixe- ramobim (CE)
5	139,32	99,36	109,08	137,16	146,88
10	104,22	83,70	84,24	108,54	102,60
15	85,68	74,16	70,92	92,88	82,44
20	73,44	65,61	61,56	80,19	68,58
25	64,58	58,96	55,29	71,28	59,40
30	58,14	54,00	46,80	64,62	52,74
53	38,84	39,78	35,23	45,55	36,88
60	35,91	37,62	33,48	42,66	34,47
120	22,27	24,25	20,83	26,37	19,39
240	13,52	15,14	12,71	15,86	11,25
360	10,00	11,35	9,46	11,67	8,11
480	8,08	9,23	7,68	9,37	6,43
530	7,50	8,58	7,14	8,67	5,92
600	6,85	7,86	6,53	7,90	5,36
720	5,99	6,89	5,73	6,86	4,62
840	5,34	6,17	5,14	6,10	4,08
1440	3,63	4,20	3,55	4,04	2,64

Os modelos de cálculos utilizam a distribuição da taxa de chuva (mm/h) com tempo de integração de 0,01% do ano.

Pela equação 4.1, obtém-se o tempo em minutos de 0,01% do ano

$$T\text{-min} = \frac{24 \cdot 60 \cdot ((365,3) + 366) / 4 \cdot 0,01}{100} = 53 \text{ minutos} \quad (4.1)$$

100

Pela equação 4.2, obtem-se o percentual P_w referindo-se ao pior mês (mais chuvas), em função da percentagem anual P_a :

$$P_w = 2,94P_a^{0,87} \quad (4.2)$$

assim, sendo P_a 0,01% , $P_w = 0,053\%$, ou seja a intensidade de chuva é excedida em 0,01% ao ano ela é excedida em 0,053% ao mês.

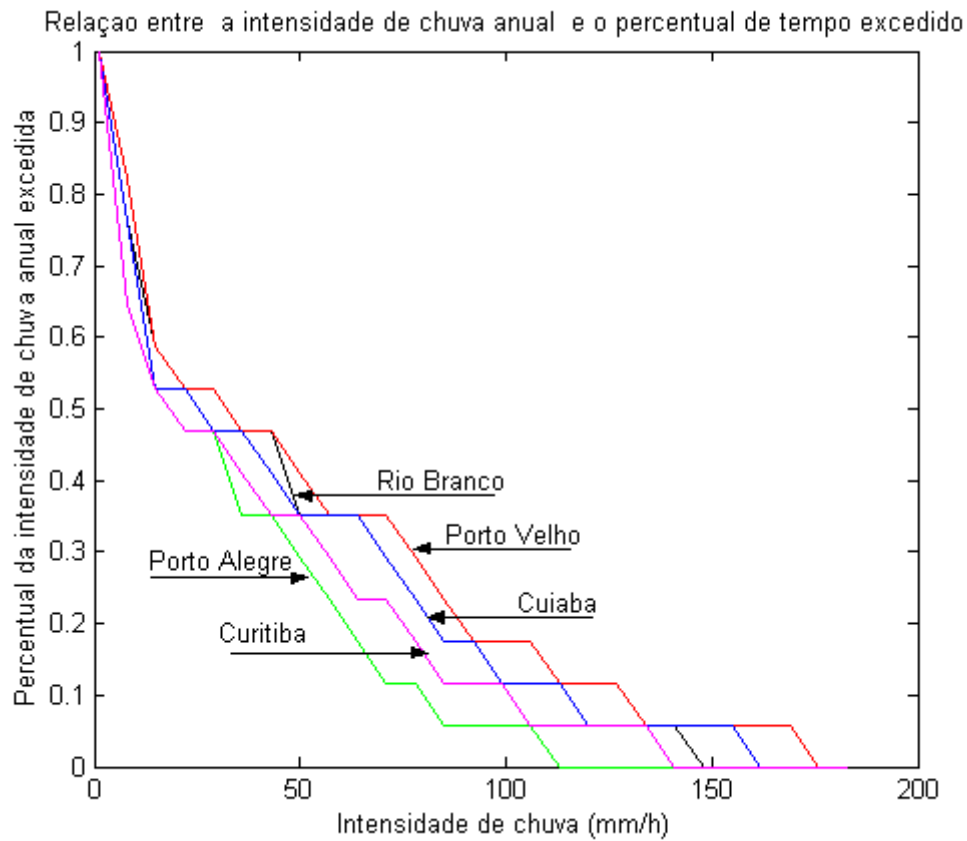
Como os modelos recomendam que sejam utilizadas para os cálculos das atenuações das precipitações dos locais em estudo, as precipitações relativas ao tempo de 0,01% do ano, assim, estes valores estão definidos, na tabela 4.11.

A tabela 4.15, foi gerada por programa MATLAB 6.1 a partir das tabelas 4.13 e 4.14, que tem as grandezas das intensidades de chuvas. Criou-se um vetor com estas grandezas arbitradas com intervalo de 7 mm/h. Criou-se também um segundo vetor com frequência de ocorrência em cada intervalo e assim, obteve-se o vetor com as respectivas probabilidades de ocorrência.

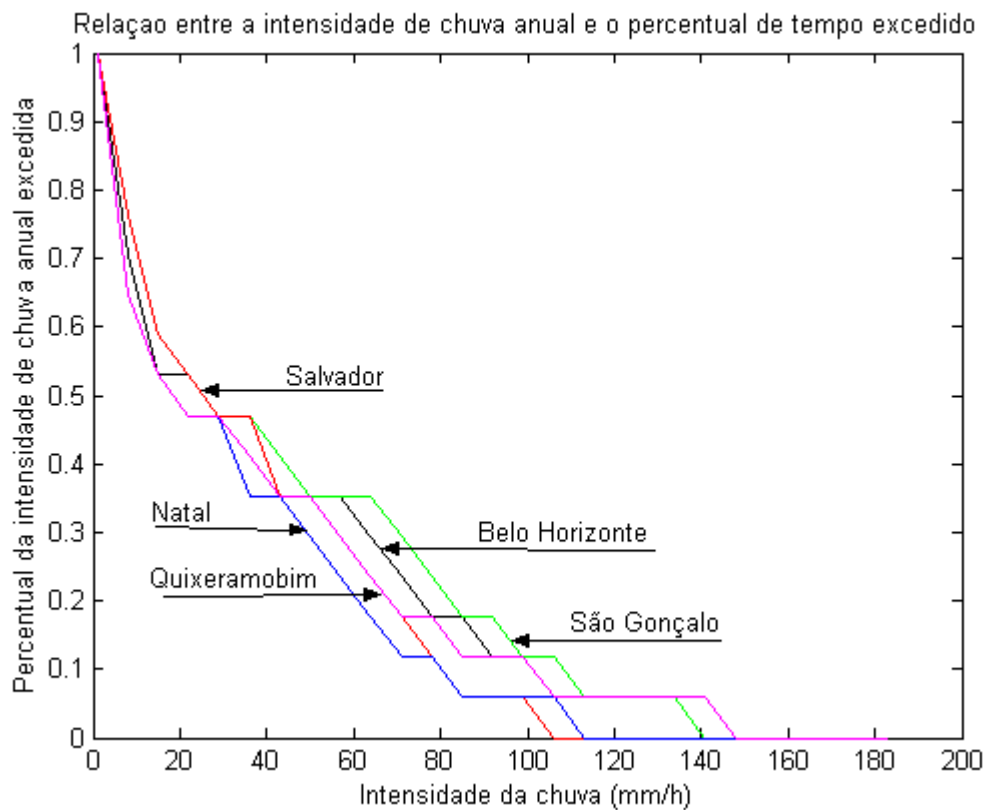
Tabela 4.15 – Probabilidade de ocorrer chuva em mm/h, em 1 ano

Chu- va (mm/ h)	Probabilidade de ocorrer em 1 ano									
	Rio Bran- co (AC)	Porto Velho (RO)	Cuiabá (MT)	Porto Alegre (RS)	Curitiba (PR)	Belo Hori- zonte (MG)	Salvador (BA)	Natal (RN)	São Gonçalo (PB)	Quixera- mobim (CE)
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,76	0,82	0,76	0,64	0,64	0,70	0,76	0,64	0,76	0,64
15	0,58	0,58	0,52	0,52	0,52	0,52	0,58	0,52	0,58	0,52
22	0,52	0,52	0,52	0,47	0,47	0,52	0,52	0,47	0,52	0,47
29	0,47	0,52	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
36	0,47	0,47	0,47	0,35	0,41	0,41	0,47	0,35	0,47	0,41
43	0,47	0,47	0,41	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,41	0,35
50	0,35	0,41	0,35	0,29	0,35	0,35	0,35	0,29	0,35	0,35
57	0,35	0,35	0,35	0,23	0,29	0,35	0,29	0,23	0,35	0,29
64	0,35	0,35	0,35	0,17	0,23	0,29	0,23	0,17	0,35	0,23
71	0,29	0,35	0,29	0,11	0,23	0,23	0,17	0,11	0,29	0,17
78	0,23	0,29	0,23	0,11	0,17	0,17	0,11	0,11	0,23	0,17
85	0,17	0,23	0,17	0,05	0,11	0,17	0,05	0,05	0,17	0,11
92	0,17	0,17	0,17	0,05	0,11	0,11	0,05	0,05	0,17	0,11
99	0,11	0,17	0,11	0,05	0,11	0,11	0,05	0,05	0,11	0,11
106	0,11	0,17	0,11	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,11	0,05
113	0,11	0,11	0,11	0	0,05	0,05	0	0	0,05	0,05
120	0,05	0,11	0,05	0	0,05	0,05	0	0	0,05	0,05
127	0,05	0,11	0,05	0	0,05	0,05	0	0	0,05	0,05
134	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,05	0	0	0,05	0,05
141	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0	0	0	0,05
148	0	0,05	0,05	0	0	0	0	0	0	0
155	0	0,05	0,05	0	0	0	0	0	0	0
162	0	0,05	0	0	0	0	0		0	0
169	0	0,05	0	0	0	0	0		0	0
176	0	0	0	0	0	0	0		0	0
183	0	0	0	0	0	0	0		0	0

A seguir, pelas figuras 4.1 (a) e (b), estão os gráficos para cada cidade, baseados na tabela 4.15.



(a)



(b)

Figura 4.1 (a) e (b) – Especificação da intensidade de chuva em porcentagem de tempo excedido

Pelos gráficos da figura 4.1 (a) e (b) nota-se a grande semelhança no traçado das curvas, exatamente porque, mesmo com taxas de chuvas anuais bem diferentes, as figuras mostram também a probabilidade de ocorrência em curto tempo. Diferentemente destas, a figura 4.2, mostra a relação entre as médias anuais das chuvas das cidades, pela qual se nota grande variação em função do longo tempo considerado.

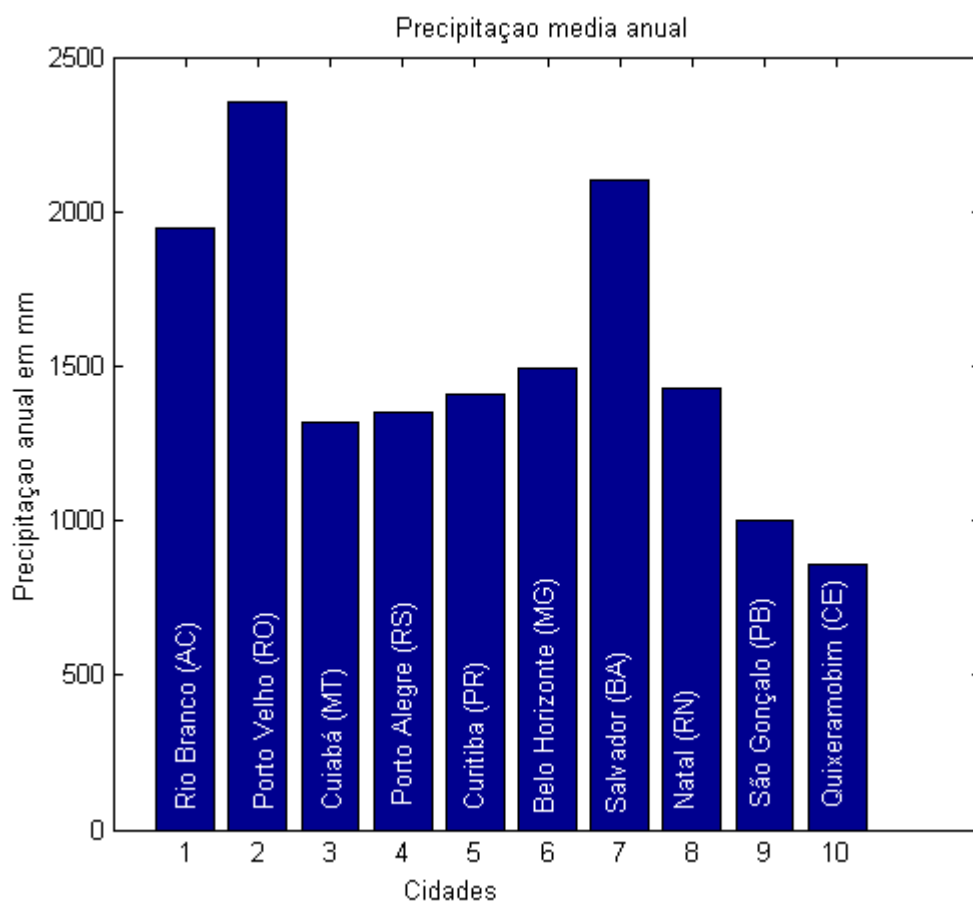


Figura 4.2- Precipitação histórica anual das cidades

Tabela 4.16 – Probabilidade média de ocorrer chuva em mm/h, em 1 ano, para todas as cidades em estudo

Chuva (mm/h)	Probab. média	Chuva (mm/h)	Probab. média	Chuva (mm/h)	Probab. média
1	1	64	0,272	127	0,041
8	0,712	71	0,224	134	0,035
15	0,544	78	0,182	141	0,02
22	0,5	85	0,128	148	0,01
29	0,475	92	0,116	155	0,01
36	0,428	99	0,098	162	0,005556
43	0,386	106	0,075	169	0,005556
50	0,344	113	0,053	176	0
57	0,308	120	0,041	183	0

A figura 4.3, mostra o comportamento da curva da média da probabilidade, considerando todas as cidades em estudo, para um período de 1 ano.

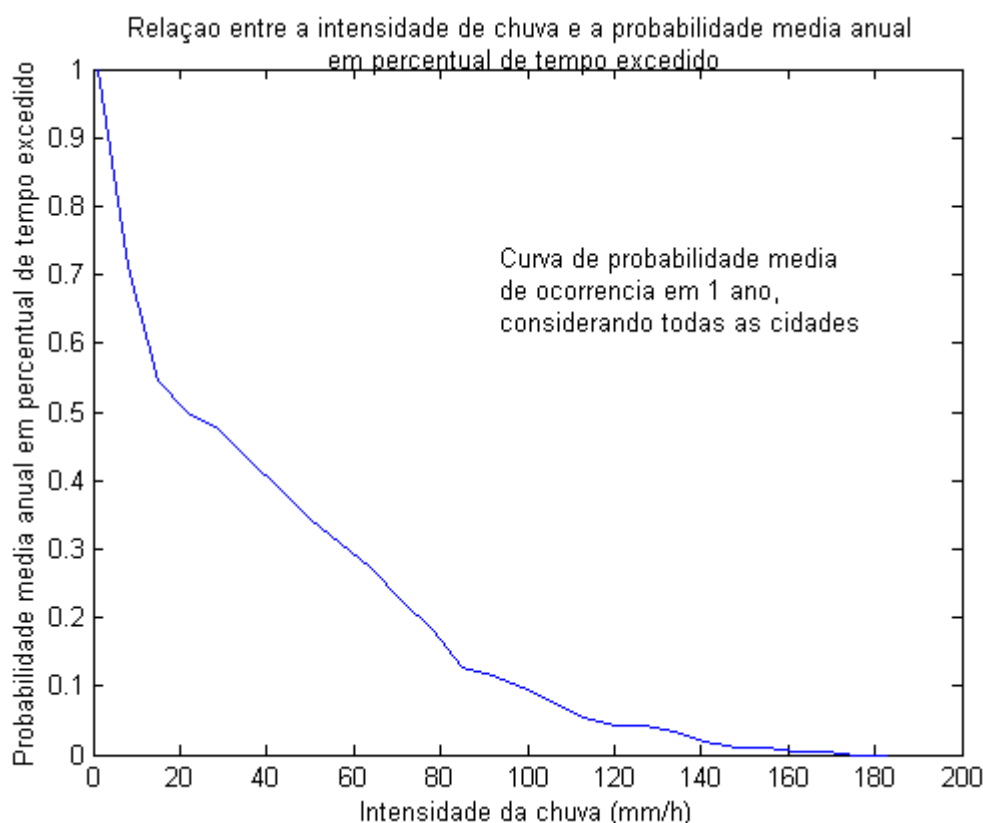


Figura 4.3 - Especificação da intensidade de chuva média anual em porcentagem de tempo excedido

4.5 Conclusão

A variação aleatória temporal e espacial da chuva e a dificuldade em quantificar o número de gotas existentes no percurso fizeram surgir o conceito de estruturas equivalentes de chuva. Embora tendo-se a percepção clara da diferença de regime de precipitação, quando se busca essas taxas em curto prazo, tem-se uma aproximação destas. Isto quer dizer que pode ocorrer em regiões áridas chuvas fortes de curta duração com um período de retorno muito longo. A modelagem da estrutura da chuva, necessária para a previsão de atenuação, pode ser feita definindo-se o comprimento equivalente da célula de chuva, utilizando então um modelo simplificado de célula de chuva para levar em conta a variação espacial de sua estrutura.

Os modelos vistos nos capítulos II e III sintetizam de certa forma estas observações e as consideram nos seus respectivos tratamentos matemáticos.

Pode-se observar que para precipitação de curta duração, lugares com baixa taxa pluviométrica anual, podem apresentar altas intensidades de chuvas quando se considera a precipitação por tempo menor, como, 5 minutos, 10 minutos e 30 minutos.

Os dados obtidos [20] são amplamente utilizados nas engenharias quando se deseja tratamento de dados de chuvas extremas em locais diversos no Brasil. Conforme visto neste capítulo, destes dados gerou-se a tabela 4.11 que servirá de suporte para os cálculos das atenuações dos capítulos V e VI.

CAPÍTULO V

CÁLCULO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA USANDO OS MODELOS PARA ENLACE VIA SATÉLITE

5.1 Introdução

Neste capítulo serão feitos os cálculos e apresentados os resultados das atenuações devido a chuvas pelos modelos abordados no capítulo II. Estes cálculos foram feitos utilizando o software MATLAB 6.1. Com os resultados pretende-se comparar os diferentes modelos e tirar conclusões sobre as atenuações devido a chuvas e sua afetabilidade na comunicação via satélite nas cidades de Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Cuiabá (MT), Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Belo Horizonte (MG), Salvador (BA), Natal (RN), São Gonçalo (PB) e Quixeramobim (CE). As taxas de distribuição de chuvas para percentagem de tempo de 0,01%, adotadas para os cálculos, são aquela fruto de todo o tratamento feito conforme capítulo IV, cujos resultados estão na tabela 4.11.

Nos cálculos feitos nesta seção, quando for-se utilizar a Tabela 1.3 - Coeficientes de atenuação levando em conta a polarização da onda, observa-se que esta tabela está acrescentada da frequência de 38 GHz e seus respectivos coeficientes, encontrados através da rotina de interpolação linear do MATLAB, que é executada pelo comando "interp1". Esta frequência é necessária, haja visto, que o Modelo Moupfouma, que será abordado no capítulo VI, utiliza a faixa de frequência de 7 a 38 GHz. Para facilitar a comparação final, usar-se-á, também, esta frequência neste capítulo.

Nas seções 5.2 e 5.3 que tratam dos resultados dos cálculos das atenuações, serão mostradas as tabelas 5.1 a 5.10 com suas respectivas figuras (5.1 a 5.10) obtidas pelo método CCIR e as tabelas 5.13 a 5.22 com suas respectivas figuras (5.13 a 5.22), resultantes do método de Crane,

Cada tabela e cada figura está identificada pela cidade e pelo modelo de cálculo empregado. Utilizou-se valores de frequências de 1 a 60 GHz por se tratar da faixa mais importante para telecomunicação.

Os valores 0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 referem-se a porcentagem de tempo anual **p** em que a atenuação é excedida.

Trata-se da confiabilidade do enlace. Esta é dada pelo tempo que o sinal é disponível menos o tempo em que a atenuação excede um valor passando a prejudicar o sinal [10].

Ou seja, se o tempo excedido é 0,01%, a confiabilidade é de 100% - 0,01%, estando portanto o sinal disponível em 99,99 % do tempo por ano.

Desta forma, utilizou-se os valores de **p** apenas para se perceber o comportamento da atenuação com relação a esta variável, haja visto que, para efeito do estudo comparativo serão destacadas apenas as atenuações referente a 0,01% do tempo excedido, o que corresponde a 53 minutos em 1 ano, conforme tabelas da seção 5.4.

5.2 Cálculo pelo modelo do CCIR

A rotina de cálculos está descrita na seção 2.3. Para os cálculos tanto deste capítulo como o capítulo VI, foi empregado a polarização horizontal da onda.

Tabela 5.1 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0109	0,0057	0,0043	0,0022	0,0017	0,0009
2	0,0529	0,0274	0,0206	0,0106	0,0080	0,0041
4	0,4095	0,2117	0,1593	0,0823	0,0620	0,0320
6	2,2588	1,1676	0,8788	0,4543	0,3419	0,1767
7	4,2597	2,2019	1,6572	0,8567	0,6447	0,3333
8	6,3029	3,2581	2,4521	1,2675	0,9540	0,4931
10	11,5305	5,9603	4,4859	2,3188	1,7452	0,9021
12	17,1159	8,8475	6,6588	3,4421	2,5906	1,3391
15	26,2396	13,5638	10,2084	5,2769	3,9715	2,0530
20	43,4820	22,4767	16,9165	8,7444	6,5813	3,4020
25	62,0567	32,0783	24,1428	12,4799	9,3927	4,8552
30	80,2738	41,4950	31,2301	16,1434	12,1499	6,2805
35	96,0996	49,6757	37,3871	19,3261	14,5453	7,5187
38	105,0441	54,2993	40,8669	21,1249	15,8991	8,2185
40	109,6982	56,7051	42,6776	22,0608	16,6035	8,5827
45	120,6654	62,3742	46,9443	24,2664	18,2634	9,4407
50	130,4216	67,4174	50,7399	26,2284	19,7401	10,2040
60	143,6510	74,2559	55,8867	28,8889	21,7425	11,2391

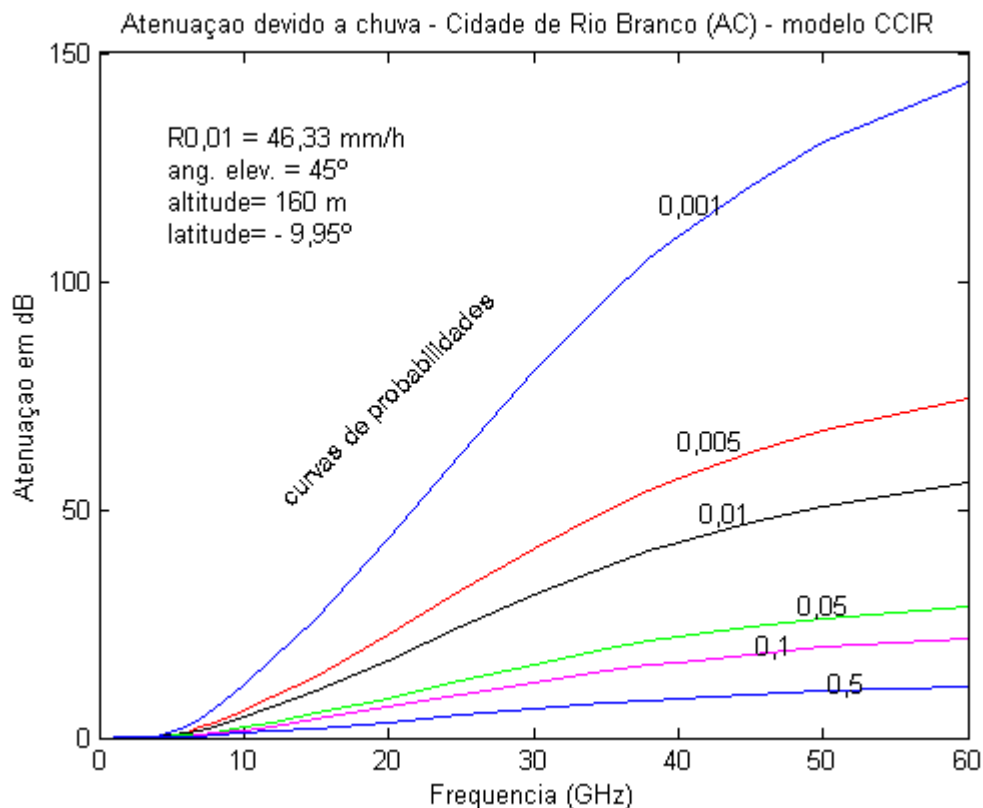


Figura 5.1 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC)

Tabela 5.2 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0122	0,0063	0,0047	0,0024	0,0018	0,0010
2	0,0591	0,0306	0,0230	0,0119	0,0090	0,0046
4	0,4647	0,2402	0,1808	0,0934	0,0703	0,0364
6	2,6102	1,3493	1,0155	0,5249	0,3951	0,2042
7	4,9339	2,5504	1,9195	0,9922	0,7468	0,3860
8	7,2970	3,7719	2,8389	1,4675	1,1044	0,5709
10	13,2830	6,8662	5,1677	2,6713	2,0105	1,0392
12	19,6045	10,1339	7,6270	3,9426	2,9673	1,5338
15	29,8714	15,4411	11,6213	6,0073	4,5212	2,3371
20	49,2362	25,4511	19,1551	9,9016	7,4522	3,8522
25	70,0098	36,1894	27,2370	14,0793	10,5964	5,4775
30	90,2102	46,6314	35,0959	18,1417	13,6539	7,0579
35	107,5550	55,5972	41,8437	21,6298	16,2791	8,4150
38	117,2916	60,6303	45,6317	23,5879	17,7528	9,1768
40	122,2981	63,2182	47,5795	24,5947	18,5106	9,5685
45	134,0550	69,2955	52,1534	26,9591	20,2900	10,4883
50	144,4718	74,6802	56,2060	29,0540	21,8667	11,3033
60	158,4010	81,8804	61,6251	31,8552	23,9750	12,3931

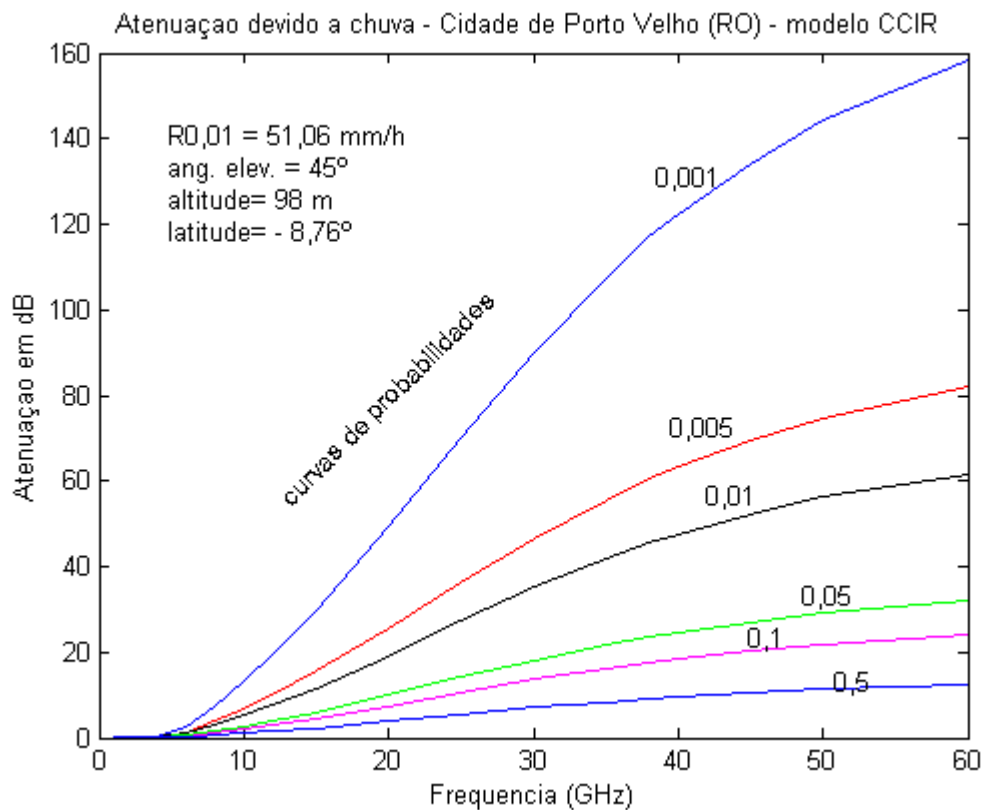


Figura 5.2 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO)

Tabela 5.3 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo CCIR

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0104	0,0054	0,0040	0,0021	0,0016	0,0008
2	0,0500	0,0259	0,0195	0,0101	0,0076	0,0039
4	0,3840	0,1985	0,1494	0,0772	0,0581	0,0300
6	2,0984	1,0847	0,8164	0,4220	0,3176	0,1642
7	3,9525	2,0431	1,5377	0,7949	0,5982	0,3092
8	5,8498	3,0239	2,2758	1,1764	0,8854	0,4577
10	10,7292	5,5461	4,1742	2,1577	1,6239	0,8394
12	15,9742	8,2574	6,2147	3,2125	2,4178	1,2498
15	24,5677	12,6995	9,5579	4,9407	3,7185	1,9221
20	40,8251	21,1032	15,8828	8,2101	6,1791	3,1941
25	58,3771	30,1762	22,7113	11,7399	8,8357	4,5674
30	75,6673	39,1139	29,4380	15,2171	11,4527	5,9201
35	90,7781	46,9249	35,3168	18,2559	13,7398	7,1024
38	99,3480	51,3548	38,6509	19,9794	15,0369	7,7729
40	103,8340	53,6737	40,3961	20,8815	15,7159	8,1238
45	114,4235	59,1476	44,5159	23,0111	17,3187	8,9524
50	123,8632	64,0272	48,1884	24,9095	18,7475	9,6909
60	136,7527	70,6901	53,2030	27,5016	20,6984	10,6994

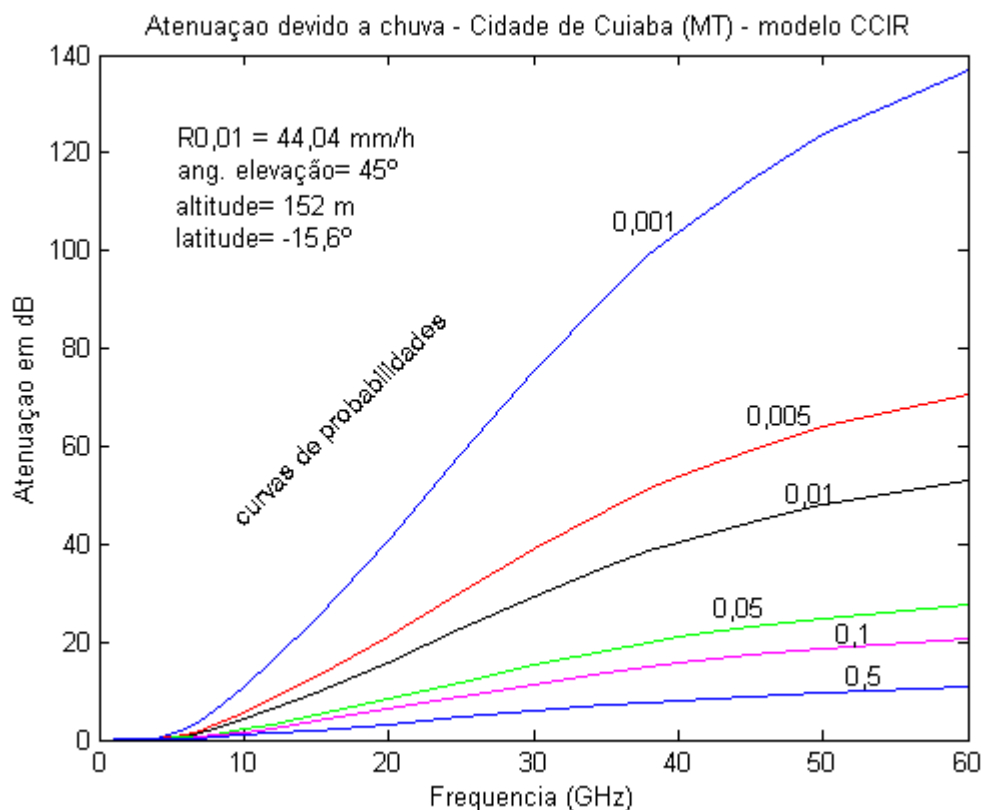


Figura 5.3 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT)

Tabela 5.4 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0089	0,0046	0,0035	0,0018	0,0013	0,0007
2	0,0422	0,0218	0,0164	0,0085	0,0064	0,0033
4	0,3101	0,1603	0,1206	0,0624	0,0469	0,0243
6	1,6070	0,8307	0,6252	0,3232	0,2432	0,1257
7	3,0064	1,5541	1,1696	0,6046	0,4550	0,2352
8	4,4559	2,3033	1,7335	0,8961	0,6744	0,3486
10	8,2912	4,2859	3,2257	1,6674	1,2549	0,6487
12	12,5519	6,4883	4,8832	2,5242	1,8998	0,9820
15	19,6510	10,1580	7,6451	3,9519	2,9743	1,5375
20	33,1663	17,1443	12,9032	6,6699	5,0199	2,5949
25	47,9375	24,7798	18,6498	9,6405	7,2556	3,7506
30	62,8419	32,4842	24,4484	12,6378	9,5115	4,9167
35	76,2915	39,4365	29,6808	15,3426	11,5472	5,9690
38	84,0619	43,4532	32,7039	16,9052	12,7233	6,5769
40	88,2557	45,6210	34,3354	17,7486	13,3580	6,9050
45	98,2508	50,7877	38,2240	19,7587	14,8709	7,6870
50	107,2616	55,4455	41,7296	21,5708	16,2347	8,3920
60	120,0067	62,0337	46,6880	24,1339	18,1637	9,3892

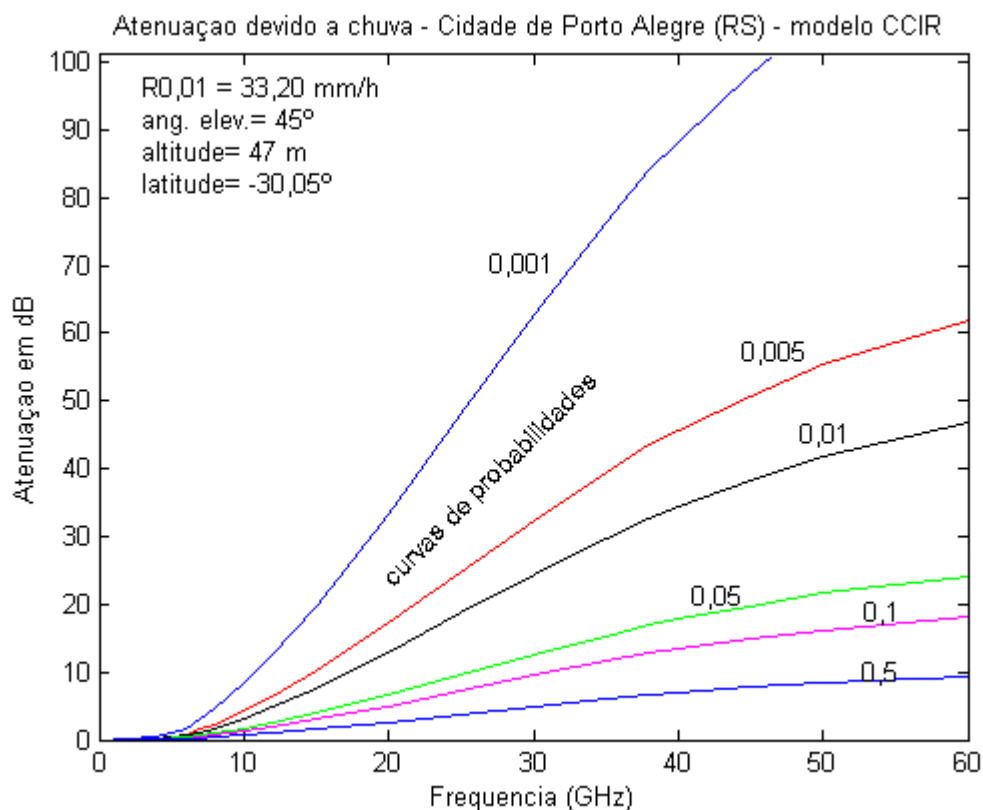


Figura 5.4 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS)

Tabela 5.5 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR)– modelo CCIR

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0077	0,0040	0,0030	0,0015	0,0012	0,0006
2	0,0367	0,0190	0,0143	0,0074	0,0056	0,0029
4	0,2750	0,1421	0,1070	0,0553	0,0416	0,0215
6	1,4603	0,7549	0,5681	0,2937	0,2210	0,1143
7	2,7406	1,4167	1,0662	0,5511	0,4148	0,2144
8	4,0592	2,0983	1,5792	0,8163	0,6144	0,3176
10	7,5032	3,8785	2,9191	1,5089	1,1357	0,5870
12	11,2719	5,8267	4,3853	2,2668	1,7061	0,8819
15	17,5028	9,0476	6,8094	3,5199	2,6492	1,3694
20	29,3297	15,1611	11,4106	5,8983	4,4392	2,2947
25	42,1829	21,8051	16,4110	8,4832	6,3846	3,3003
30	55,0107	28,4361	21,4017	11,0629	8,3262	4,3040
35	66,4197	34,3336	25,8403	13,3573	10,0530	5,1966
38	72,9562	37,7124	28,3833	14,6718	11,0424	5,7080
40	76,4365	39,5114	29,7372	15,3717	11,5691	5,9803
45	84,6948	43,7803	32,9501	17,0325	12,8191	6,6264
50	92,1017	47,6091	35,8317	18,5221	13,9402	7,2059
60	102,4164	52,9409	39,8446	20,5964	15,5013	8,0129

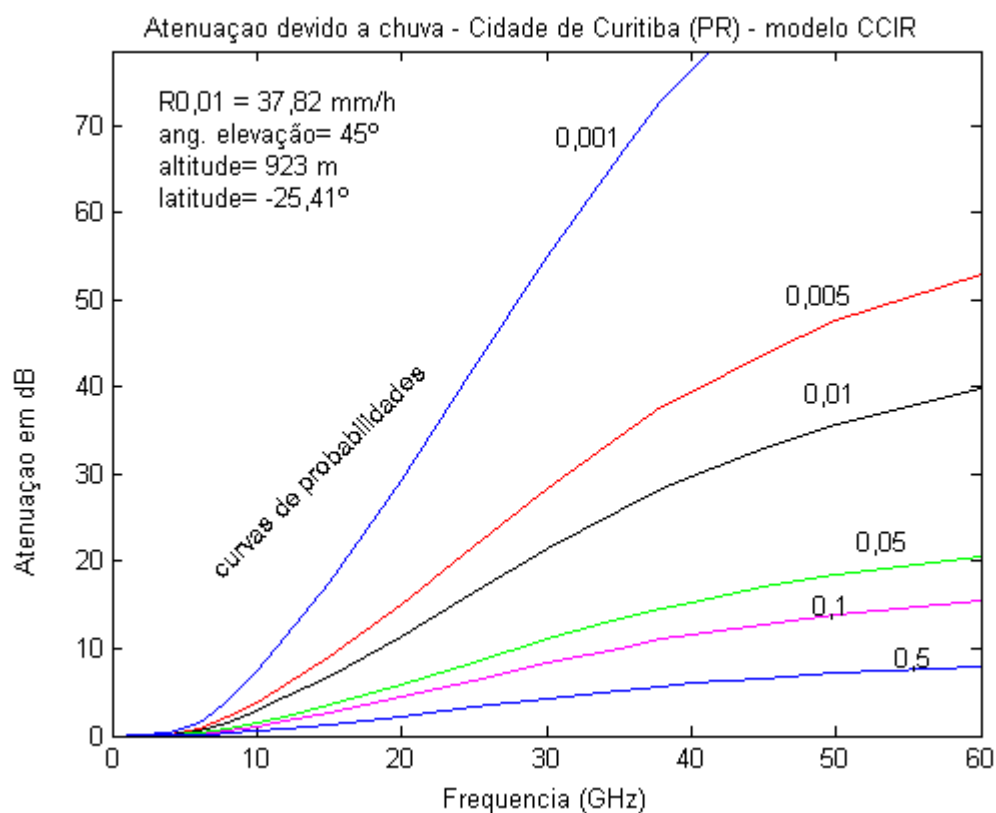


Figura 5.5 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal pelo modelo CCIR para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR)

Tabela 5.6 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0070	0,0036	0,0027	0,0014	0,0011	0,0006
2	0,0338	0,0175	0,0131	0,0068	0,0051	0,0026
4	0,2541	0,1313	0,0989	0,0511	0,0385	0,0199
6	1,3562	0,7010	0,5276	0,2727	0,2053	0,1061
7	2,5468	1,3165	0,9908	0,5122	0,3855	0,1993
8	3,7717	1,9497	1,4674	0,7585	0,5709	0,2951
10	6,9622	3,5989	2,7086	1,4001	1,0538	0,5447
12	10,4425	5,3979	4,0626	2,1000	1,5805	0,8170
15	16,1876	8,3677	6,2977	3,2554	2,4501	1,2665
20	27,0857	14,0011	10,5376	5,4471	4,0996	2,1192
25	38,9157	20,1163	15,1400	7,8261	5,8901	3,0447
30	50,6955	26,2054	19,7228	10,1951	7,6731	3,9664
35	61,1405	31,6047	23,7864	12,2956	9,2540	4,7836
38	67,1141	34,6926	26,1104	13,4970	10,1581	5,2509
40	70,2855	36,3319	27,3442	14,1347	10,6381	5,4991
45	77,8040	40,2183	30,2693	15,6467	11,7761	6,0873
50	84,5400	43,7003	32,8899	17,0014	12,7957	6,6143
60	93,8892	48,5331	36,5271	18,8816	14,2107	7,3458

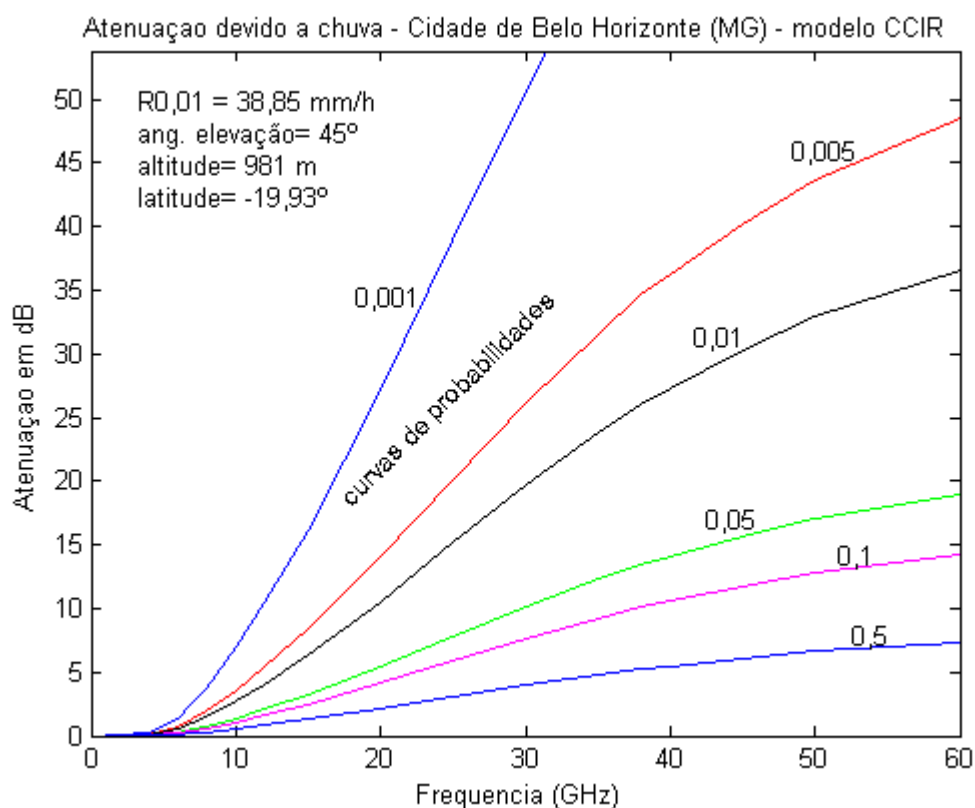


Figura 5.6 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG)

Tabela 5.7 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0097	0,0050	0,0038	0,0020	0,0015	0,0008
2	0,0468	0,0242	0,0182	0,0094	0,0071	0,0037
4	0,3535	0,1827	0,1375	0,0711	0,0535	0,0277
6	1,8953	0,9797	0,7373	0,3811	0,2869	0,1483
7	3,5612	1,8409	1,3855	0,7162	0,5390	0,2786
8	5,2734	2,7259	2,0516	1,0605	0,7982	0,4126
10	9,7221	5,0255	3,7823	1,9552	1,4715	0,7606
12	14,5614	7,5271	5,6651	2,9284	2,2040	1,1393
15	22,5382	11,6504	8,7684	4,5325	3,4113	1,7634
20	37,6617	19,4680	14,6521	7,5739	5,7003	2,9466
25	54,0612	27,9453	21,0323	10,8720	8,1825	4,2297
30	70,3575	36,3691	27,3722	14,1492	10,6490	5,5047
35	84,7675	43,8179	32,9784	17,0472	12,8301	6,6321
38	92,9957	48,0712	36,1795	18,7019	14,0755	7,2759
40	97,3524	50,3233	37,8745	19,5780	14,7349	7,6167
45	107,6725	55,6580	41,8895	21,6535	16,2969	8,4242
50	116,9098	60,4329	45,4832	23,5111	17,6950	9,1469
60	129,6914	67,0399	50,4558	26,0816	19,6296	10,1469

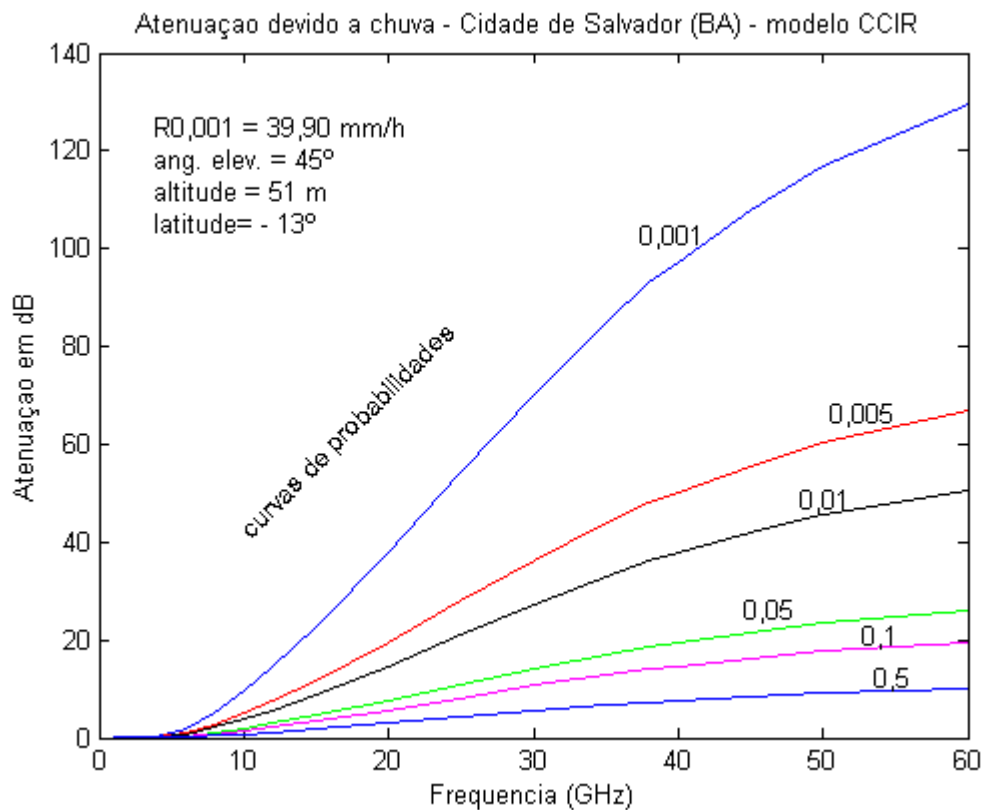


Figura 5.7 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA)

Tabela 5.8 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0088	0,0045	0,0034	0,0018	0,0013	0,0007
2	0,0419	0,0216	0,0163	0,0084	0,0063	0,0033
4	0,3102	0,1603	0,1207	0,0624	0,0469	0,0243
6	1,6256	0,8403	0,6324	0,3269	0,2460	0,1272
7	3,0456	1,5743	1,1849	0,6125	0,4610	0,2383
8	4,5126	2,3326	1,7556	0,9075	0,6830	0,3531
10	8,3712	4,3272	3,2568	1,6835	1,2670	0,6550
12	12,6285	6,5279	4,9130	2,5396	1,9114	0,9880
15	19,6968	10,1816	7,6629	3,9611	2,9812	1,5411
20	33,1347	17,1279	12,8909	6,6635	5,0151	2,5924
25	47,7834	24,7001	18,5899	9,6095	7,2323	3,7385
30	62,4907	32,3026	24,3117	12,5672	9,4584	4,8892
35	75,6753	39,1180	29,4411	15,2187	11,4539	5,9207
38	83,2637	43,0406	32,3933	16,7447	12,6025	6,5145
40	87,3343	45,1448	33,9770	17,5633	13,2186	6,8329
45	97,0166	50,1497	37,7438	19,5105	14,6841	7,5905
50	105,7249	54,6512	41,1318	21,2618	16,0021	8,2718
60	117,9564	60,9739	45,8903	23,7216	17,8534	9,2288

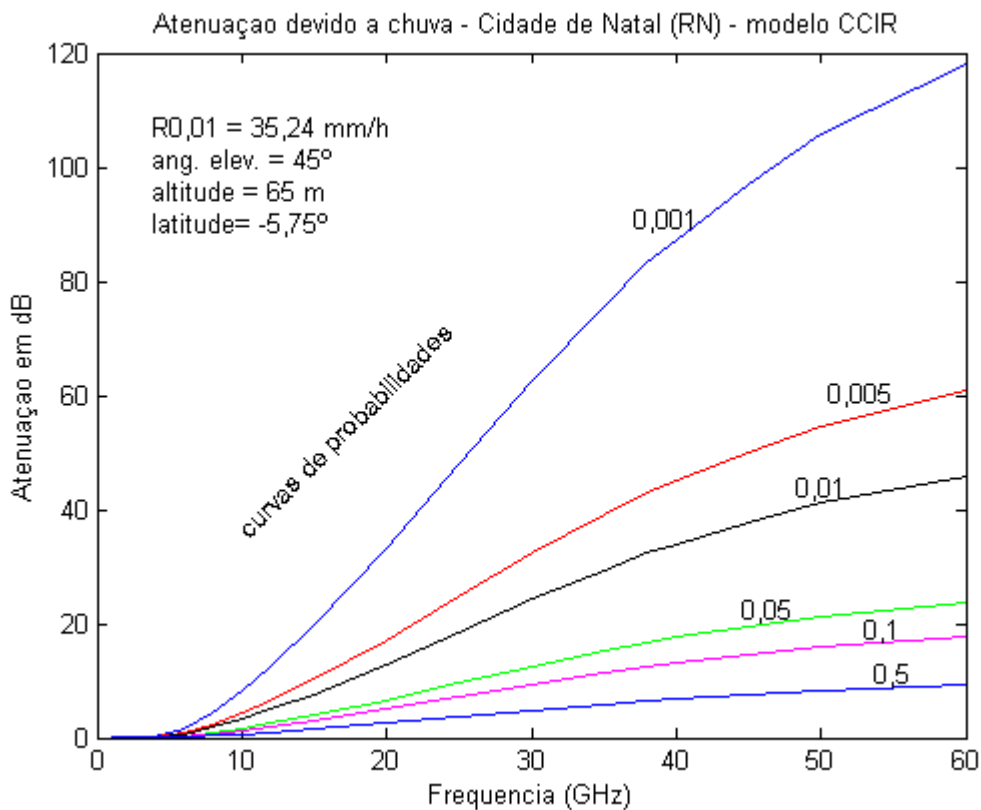


Figura 5.8 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN)

Tabela 5.9 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0106	0,0055	0,0041	0,0021	0,0016	0,0008
2	0,0513	0,0265	0,0199	0,0103	0,0078	0,0040
4	0,3957	0,2046	0,1540	0,0796	0,0599	0,0310
6	2,1760	1,1248	0,8466	0,4376	0,3294	0,1703
7	4,1021	2,1204	1,5959	0,8249	0,6209	0,3209
8	6,0702	3,1378	2,3616	1,2207	0,9188	0,4749
10	11,1142	5,7451	4,3239	2,2351	1,6822	0,8696
12	16,5142	8,5365	6,4248	3,3211	2,4995	1,2921
15	25,3440	13,1008	9,8599	5,0968	3,8360	1,9829
20	42,0365	21,7294	16,3541	8,4537	6,3625	3,2889
25	60,0319	31,0316	23,3551	12,0727	9,0862	4,6968
30	77,7067	40,1681	30,2314	15,6272	11,7614	6,0797
35	93,0920	48,1210	36,2170	18,7212	14,0900	7,2834
38	101,7974	52,6210	39,6038	20,4719	15,4077	7,9645
40	106,3362	54,9672	41,3696	21,3847	16,0946	8,3196
45	117,0379	60,4991	45,5330	23,5369	17,7144	9,1569
50	126,5643	65,4235	49,2392	25,4527	19,1563	9,9022
60	139,5123	72,1165	54,2766	28,0566	21,1160	10,9153

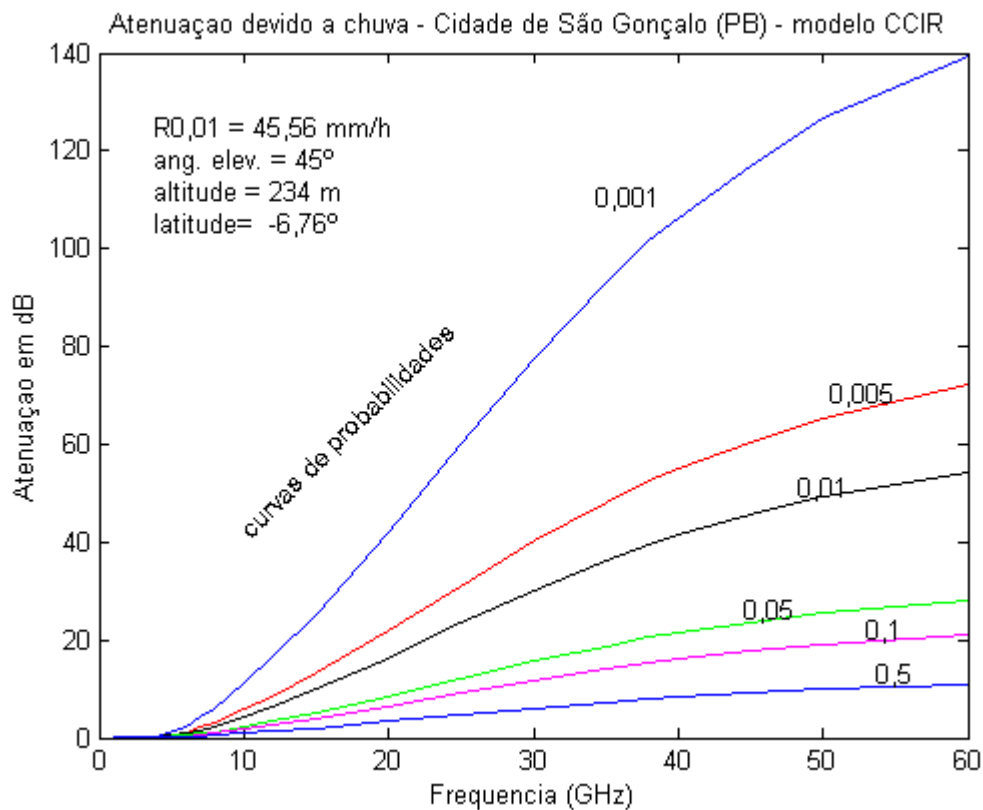


Figura 5.9 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB)

Tabela 5.10 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo CCIR

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0088	0,0045	0,0034	0,0018	0,0013	0,0007
2	0,0421	0,0218	0,0164	0,0085	0,0064	0,0033
4	0,3141	0,1623	0,1222	0,0632	0,0475	0,0246
6	1,6601	0,8581	0,6458	0,3338	0,2513	0,1299
7	3,1136	1,6095	1,2113	0,6262	0,4713	0,2436
8	4,6122	2,3842	1,7944	0,9275	0,6981	0,3609
10	8,5363	4,4126	3,3210	1,7167	1,2920	0,6679
12	12,8430	6,6388	4,9965	2,5828	1,9439	1,0048
15	19,9741	10,3250	7,7708	4,0169	3,0232	1,5628
20	33,5172	17,3257	13,0397	6,7405	5,0730	2,6223
25	48,2516	24,9422	18,7721	9,7036	7,3032	3,7751
30	62,9883	32,5598	24,5053	12,6672	9,5337	4,9281
35	76,1323	39,3542	29,6189	15,3106	11,5231	5,9565
38	83,6751	43,2532	32,5534	16,8275	12,6647	6,5466
40	87,7020	45,3348	34,1200	17,6373	13,2742	6,8617
45	97,2656	50,2784	37,8407	19,5606	14,7217	7,6099
50	105,8518	54,7168	41,1811	21,2873	16,0213	8,2817
60	117,8457	60,9166	45,8473	23,6993	17,8367	9,2201

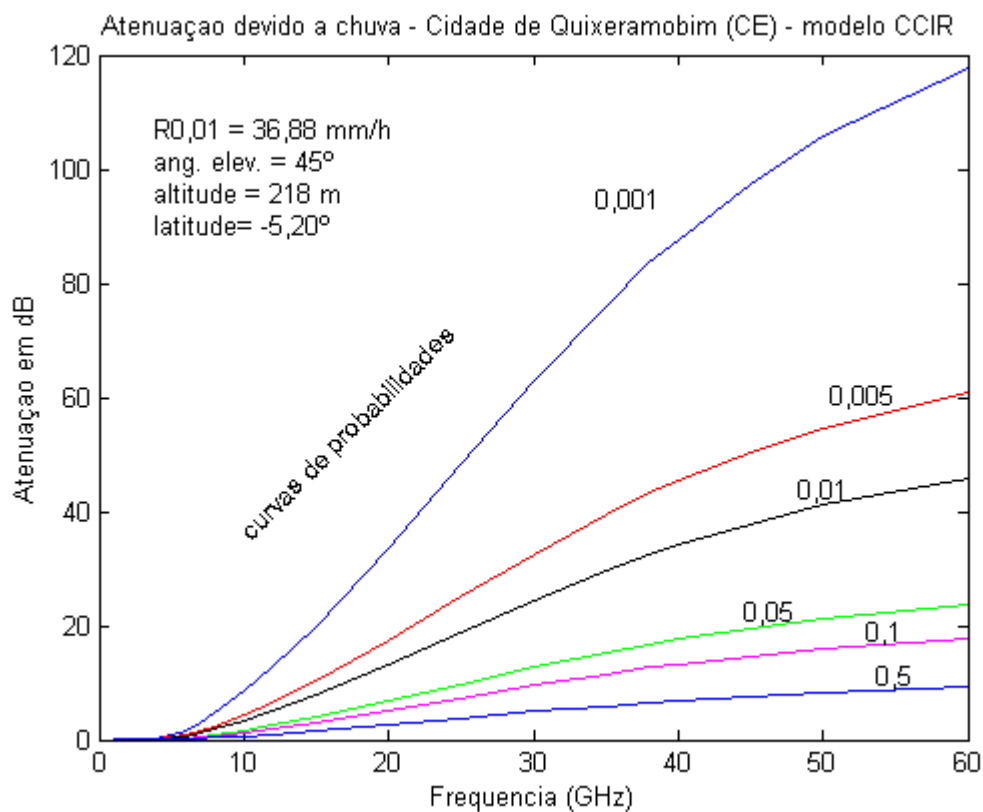


Figura 5.10 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo CCIR, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE)

5.3 Cálculo pelo modelo de Crane

Os detalhes deste modelo estão descritos na seção 2.4.

As tabelas 5.11 e 5.12 que seguem, referem-se às alturas isotérmicas das chuvas para as cidades em estudo com as respectivas latitudes em módulo, primeiras linhas (valores de zero grau a 13 e de 15,58 a 40 graus) em função da probabilidade em valor absoluto com valores de 1,0 a 0,001 (primeiras colunas).

Tabela 5.11 – Altura isotérmica em função da probabilidade e da latitude

Prob.	0	5,2	5,75	6,76	8,76	9,96	10	13
1,0	4,70	4,64	4,64	4,63	4,61	4,60	10	4,48
0,50	4,75	4,72	4,72	4,71	4,70	4,70	4,60	4,58
0,200	4,78	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,70	4,65
0,100	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	4,77	4,71
0,050	5,02	5,04	5,04	5,05	5,06	5,06	4,80	5,03
0,020	5,15	5,19	5,20	5,21	5,22	5,23	5,07	5,23
0,010	5,20	5,25	5,25	5,26	5,28	5,29	5,24	5,30
0,005	5,31	5,50	5,52	5,56	5,63	5,67	5,30	5,71
0,002	5,37	5,65	5,68	5,74	5,85	5,91	5,68	5,97
0,001	5,40	5,71	5,74	5,80	5,92	5,99	5,92	6,06

Tabela 5.12 – Altura isotérmica em função da probabilidade e da latitude
(continuação)

Prob.	15,58	19,93	20	25,41	30	30,05	40
1,0	4,37	4,20	4,20	3,87	3,60	3,60	2,50
0,50	4,47	4,30	4,30	4,08	3,90	3,90	2,90
0,200	4,56	4,40	4,40	4,23	4,10	4,10	3,20
0,100	4,63	4,50	4,50	4,33	4,20	4,20	3,30
0,050	4,99	4,94	4,94	4,65	4,42	4,42	3,74
0,020	5,22	5,21	5,21	4,85	4,55	4,55	4,01
0,010	5,30	5,30	5,30	4,92	4,60	4,60	4,10
0,005	5,74	5,79	5,80	5,35	4,98	4,98	4,37
0,002	6,02	6,09	6,10	5,62	5,22	5,22	4,54
0,001	6,11	6,19	6,20	5,71	5,30	5,30	4,60

A figura 5.11 estabelece a relação entre as probabilidades em valores absolutos do tempo e as alturas isotérmicas das cidades de Quixeramobim (CE), Cuiabá (MT) e Belo Horizonte (MG). Nota-se portanto, nesta figura, as probabilidades das chuvas formarem a uma considerada altura em quilômetros, para cada uma das citadas cidades.

A figura 5.12 destaca os valores das alturas isotérmicas em relação as latitudes das dez cidades estudadas mais os valores redondos intermediários 0°, 10°, 20°, 30° e 40°, exclusivamente para a probabilidade de 0,01.

As tabelas 5.13 a 5.22 e as figuras 5.13 a 5.22 que vêm a seguir foram obtidas através de cálculos feitos por programas MATLAB 6.1, utilizando: dados da tabela 1.3 (frequências e coeficientes), as taxas de chuvas da tabela 4.11 e as alturas isotérmicas extraídas das tabelas 5.11 e 5.12. No procedimento matemático do modelo Crane, variou-se o valor de p e obteve-se para cada um as respectivas atenuações (dB) para cada cidade que possuem distribuição de taxa de chuva $R_{0,01}$ diferentes (tabela 4.11).

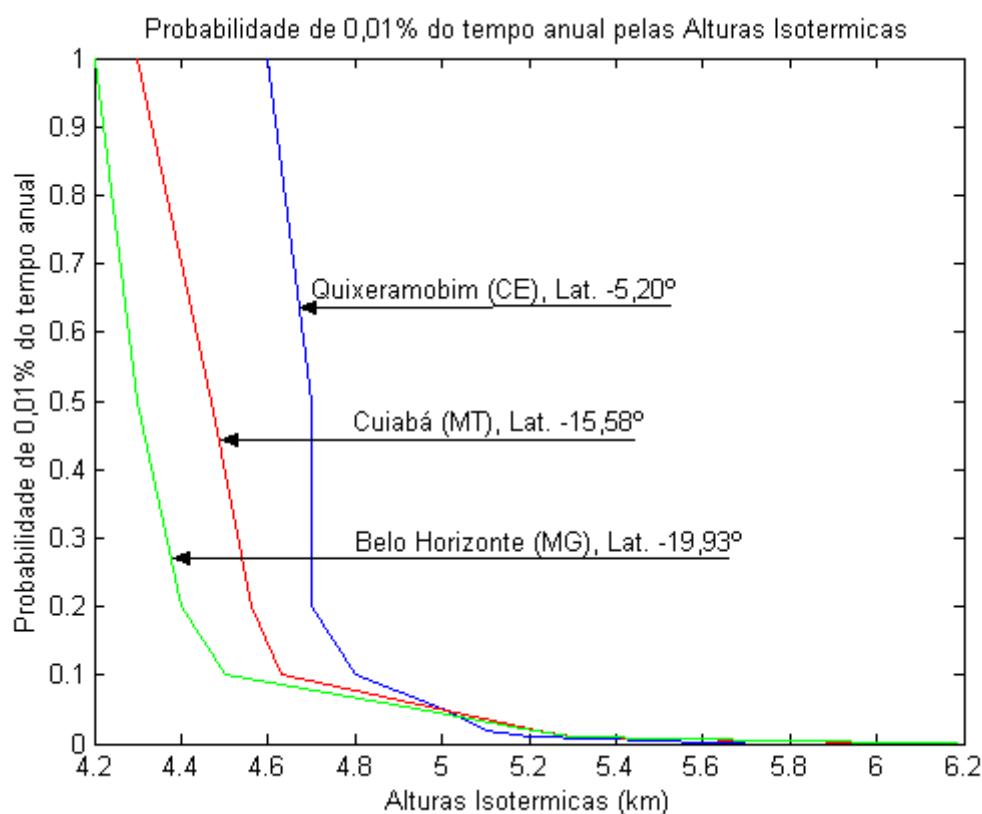


Figura 5.11 – Relação entre as probabilidades e as alturas isotérmicas das cidades de Quixeramobim (CE), Cuiabá (MT) e Belo Horizonte (MG)

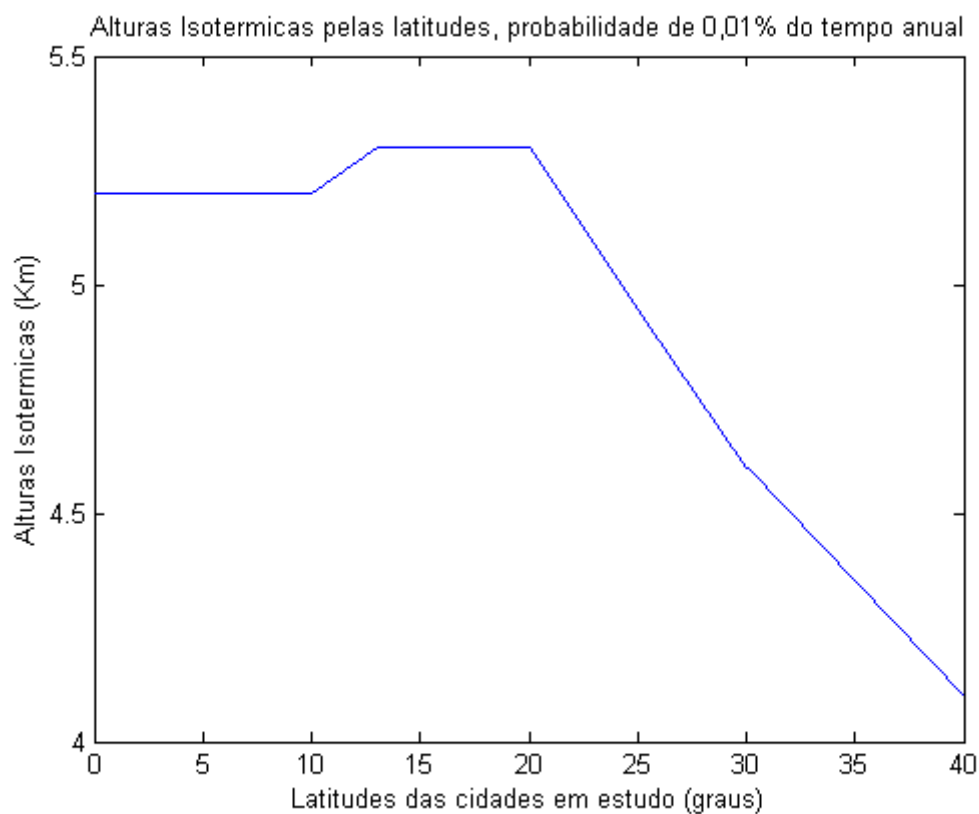


Figura 5.12 - Relação entre as alturas isotérmicas e as latitudes das dez cidades estudadas, exclusivamente para a probabilidade de 0,01

Tabela 5.13 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0097	0,0092	0,0087	0,0084	0,0080	0,0079
2	0,0466	0,0445	0,0420	0,0405	0,0387	0,0380
4	0,3554	0,3404	0,3218	0,3103	0,2969	0,2916
6	1,9299	1,8516	1,7548	1,6941	1,6235	1,5958
7	3,6322	3,4858	3,3045	3,1908	3,0584	3,0064
8	5,3767	5,1597	4,8911	4,7225	4,5264	4,4494
10	9,8781	9,4744	8,9757	8,6632	8,2999	8,1573
12	14,7361	14,1254	13,3722	12,9009	12,3539	12,1393
15	22,7129	21,7574	20,5810	19,8464	18,9948	18,6611
20	37,8163	36,2043	34,2233	32,9880	31,5577	30,9978
25	54,1486	51,8196	48,9607	47,1798	45,1195	44,3134
30	70,2890	67,2369	63,4952	61,1669	58,4755	57,4234
35	84,4570	80,7531	76,2183	73,3996	70,1445	68,8728
38	92,5134	88,4331	83,4413	80,3406	76,7616	75,3639
40	96,7492	92,4660	87,2285	83,9766	80,2244	78,7594
45	106,7627	101,9960	96,1738	92,5624	88,3987	86,7739
50	115,7044	110,5019	104,1534	100,2187	95,6853	93,9171
60	127,9802	122,1620	115,0726	110,6843	105,6334	103,6649

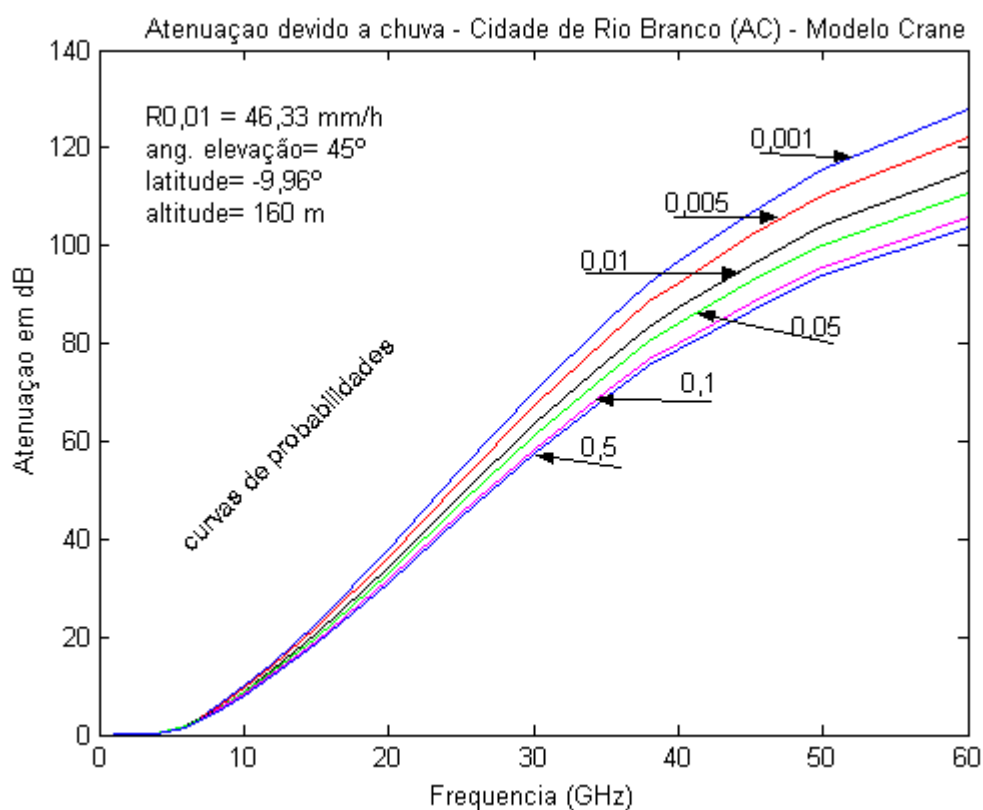


Figura 5.13 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido à polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC)

Tabela 5.14 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0104	0,0099	0,0094	0,0091	0,0087	0,0085
2	0,0501	0,0481	0,0456	0,0441	0,0421	0,0414
4	0,3868	0,3721	0,3538	0,3419	0,3276	0,3220
6	2,1306	2,0535	1,9569	1,8940	1,8175	1,7875
7	4,0174	3,8730	3,6918	3,5738	3,4302	3,3737
8	5,9446	5,7306	5,4621	5,2873	5,0747	4,9911
10	10,8781	10,4815	9,9844	9,6614	9,2687	9,1144
12	16,1538	15,5559	14,8079	14,3225	13,7333	13,5020
15	24,7765	23,8446	22,6811	21,9274	21,0135	20,6553
20	41,0764	39,5100	37,5573	36,2940	34,7644	34,1652
25	58,6439	56,3861	53,5746	51,7576	49,5593	48,6988
30	75,8889	72,9376	69,2670	66,8973	64,0328	62,9123
35	90,8900	87,3180	82,8809	80,0194	76,5637	75,2129
38	99,3756	95,4467	90,5696	87,4263	83,6324	82,1500
40	103,7973	99,6771	94,5651	91,2718	87,2981	85,7459
45	114,2225	109,6476	103,9775	100,3281	95,9283	94,2106
50	123,5028	118,5193	112,3480	108,3793	103,5976	101,7317
60	136,1122	130,5555	123,6840	119,2703	113,9581	111,8868

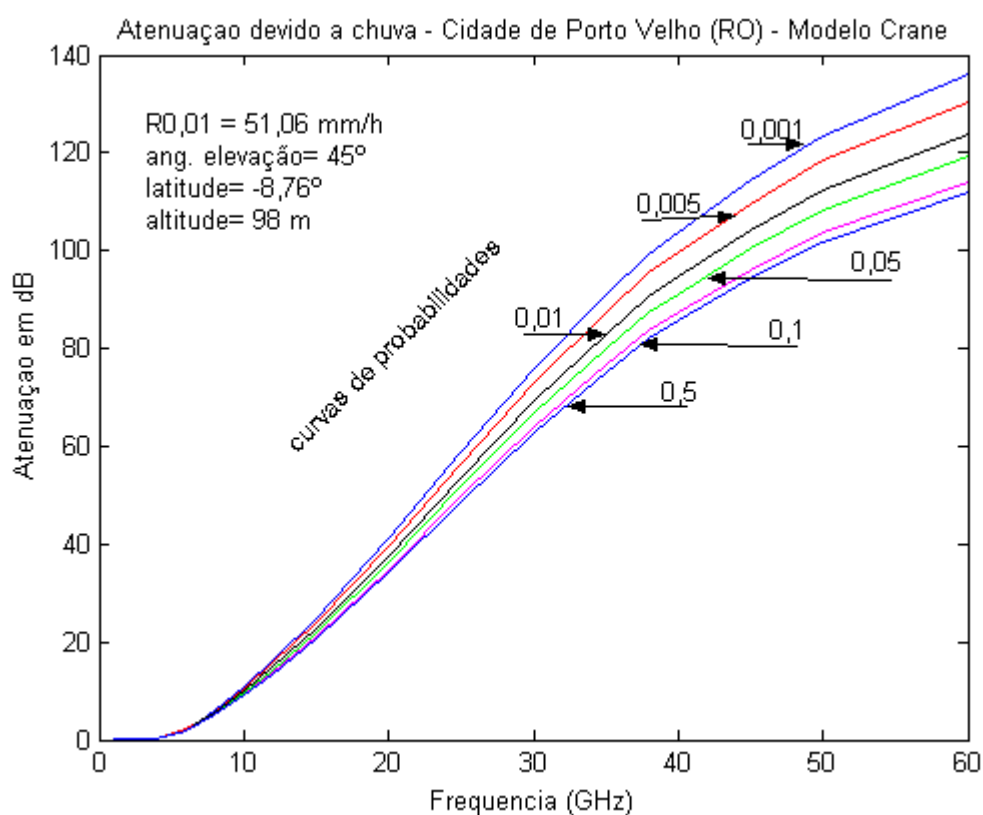


Figura 5.14 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido à polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO)

Tabela 5.15 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo Crane

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0095	0,0090	0,0084	0,0080	0,0075	0,0073
2	0,0456	0,0433	0,0405	0,0385	0,0361	0,0350
4	0,3457	0,3291	0,3085	0,2935	0,2754	0,2672
6	1,8613	1,7757	1,6691	1,5907	1,4961	1,4528
7	3,4994	3,3394	3,1399	2,9931	2,8158	2,7346
8	5,1811	4,9440	4,6484	4,4308	4,1682	4,0479
10	9,5404	9,0984	8,5484	8,1443	7,6572	7,4343
12	14,2699	13,5994	12,7668	12,1564	11,4217	11,0860
15	22,0559	21,0040	19,7008	18,7472	17,6016	17,0789
20	36,8123	35,0336	32,8343	31,2279	29,3013	28,4233
25	52,8001	50,2260	47,0474	44,7287	41,9508	40,6860
30	68,6605	65,2815	61,1150	58,0795	54,4473	52,7951
35	82,6543	78,5464	73,4886	69,8089	65,4111	63,4126
38	90,6354	86,1054	80,5328	76,4817	71,6434	69,4459
40	94,8526	90,0941	84,2436	79,9928	74,9184	72,6145
45	104,8374	99,5336	93,0210	88,2947	82,6586	80,1018
50	113,7693	107,9733	100,8638	95,7094	89,5683	86,7842
60	126,1028	119,6079	111,6544	105,8970	99,0469	95,9447

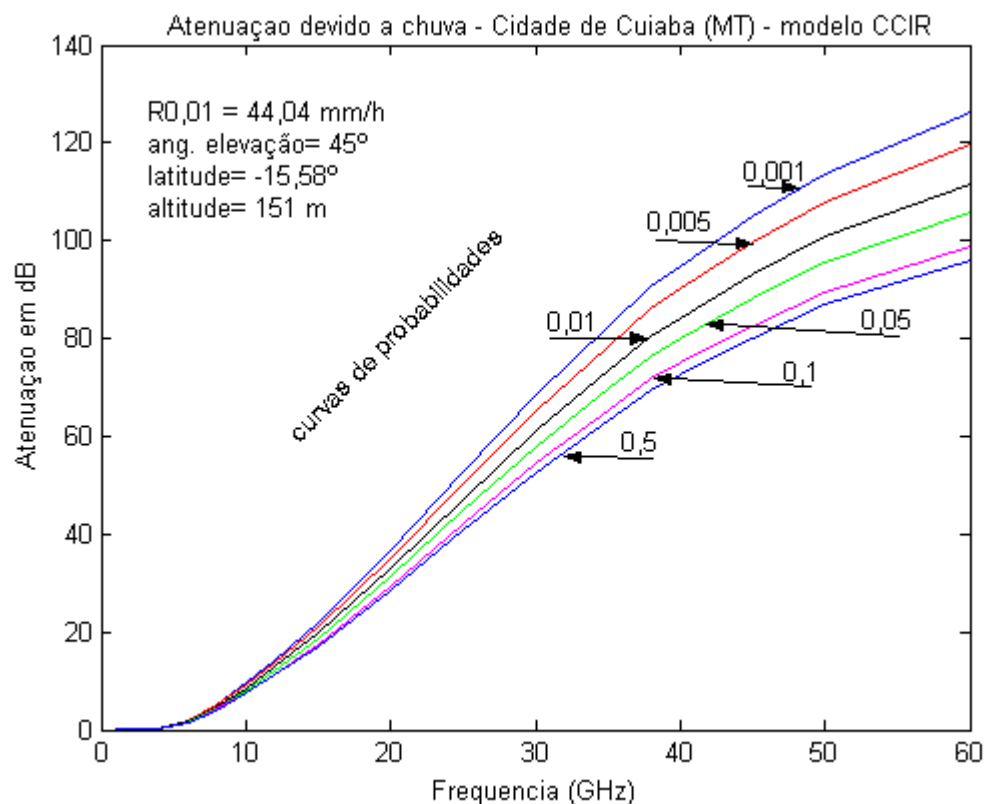


Figura 5.15 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT),

Tabela 5.16 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0070	0,0066	0,0062	0,0059	0,0057	0,0053
2	0,0332	0,0315	0,0293	0,0283	0,0270	0,0253
4	0,2435	0,2311	0,2160	0,2086	0,1994	0,1866
6	1,2620	1,1997	1,1230	1,0856	1,0390	0,9736
7	2,3611	2,2450	2,1019	2,0321	1,9450	1,8230
8	3,4994	3,3272	3,1150	3,0115	2,8824	2,7014
10	6,5116	6,1885	5,7909	5,5973	5,3557	5,0175
12	9,8582	9,3642	8,7575	8,4623	8,0944	7,5801
15	15,4350	14,6535	13,6954	13,2298	12,6503	11,8410
20	26,0527	24,7218	23,0924	22,3016	21,3181	19,9463
25	37,6584	35,7225	33,3551	32,2071	30,7802	28,7915
30	49,3709	46,8163	43,6957	42,1838	40,3059	37,6906
35	59,9431	56,8201	53,0098	51,1654	48,8759	45,6904
38	66,0523	62,5976	58,3853	56,3474	53,8187	50,3021
40	69,3505	65,7139	61,2817	59,1382	56,4791	52,7823
45	77,2123	73,1397	68,1810	65,7848	62,8139	58,6868
50	84,3012	79,8329	74,3971	71,7720	68,5190	64,0027
60	94,3323	89,2942	83,1730	80,2200	76,5634	71,4916

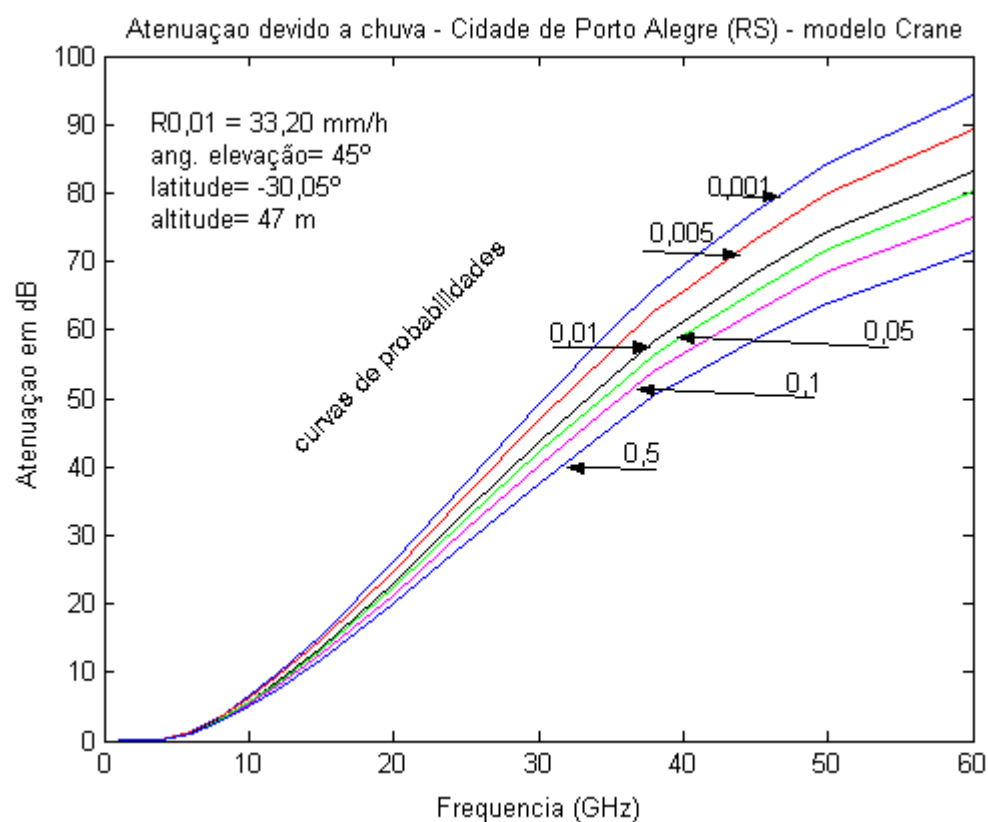


Figura 5.16 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS)

Tabela 5.17 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0071	0,0066	0,0060	0,0057	0,0052	0,0049
2	0,0339	0,0317	0,0290	0,0272	0,0251	0,0234
4	0,2536	0,2374	0,2175	0,2045	0,1888	0,1761
6	1,3434	1,2604	1,1570	1,0896	1,0071	0,9406
7	2,5203	2,3653	2,1719	2,0457	1,8911	1,7665
8	3,7332	3,5034	3,2168	3,0297	2,8007	2,6161
10	6,9049	6,4766	5,9431	5,5954	5,1703	4,8281
12	10,3809	9,7310	8,9232	8,3977	7,7560	7,2401
15	16,1325	15,1127	13,8477	13,0263	12,0249	11,2209
20	27,0532	25,3286	23,1931	21,8087	20,1232	18,7717
25	38,9289	36,4327	33,3456	31,3466	28,9150	26,9671
30	50,7952	47,5181	43,4706	40,8527	37,6714	35,1253
35	61,3661	57,3815	52,4669	49,2921	45,4380	42,3565
38	67,4282	63,0340	57,6183	54,1222	49,8807	46,4913
40	70,6610	66,0448	60,3586	56,6896	52,2400	48,6857
45	78,3361	73,1904	66,8593	62,7785	57,8338	53,8874
50	85,2244	79,6006	72,6881	68,2363	62,8462	58,5473
60	94,8351	88,5322	80,7970	75,8222	69,8056	65,0125

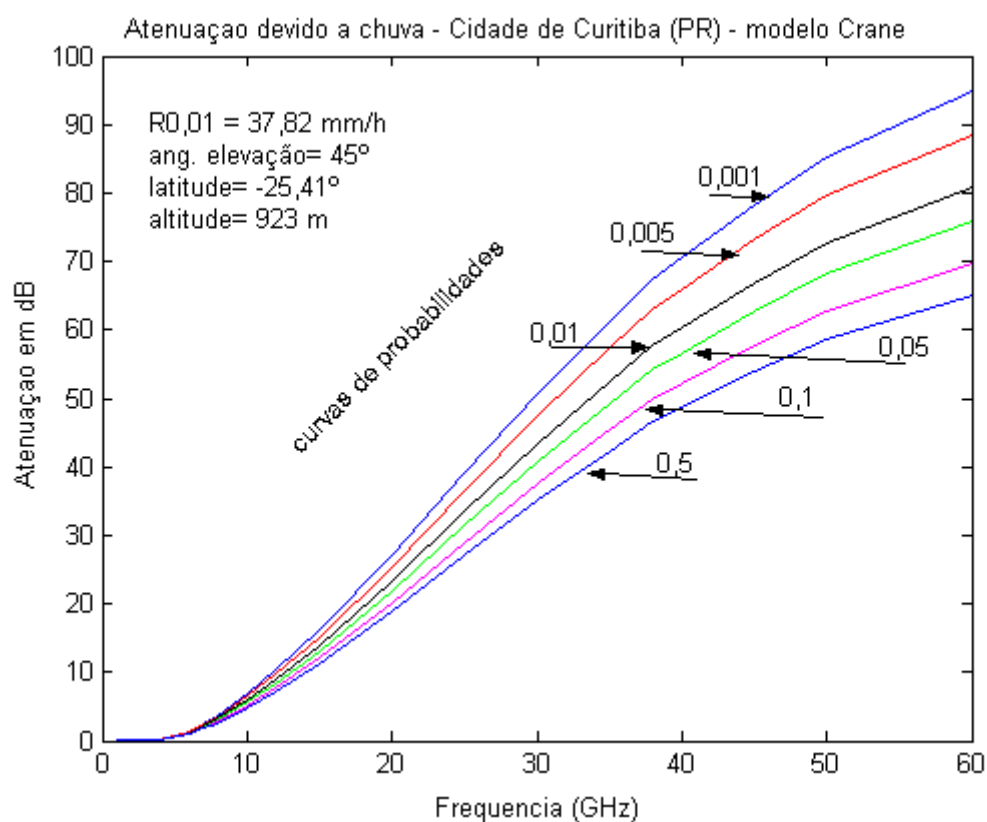


Figura 5.17 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR)

Tabela 5.18 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0078	0,0073	0,0066	0,0061	0,0055	0,0052
2	0,0372	0,0348	0,0317	0,0294	0,0264	0,0250
4	0,2784	0,2608	0,2383	0,2211	0,1993	0,1891
6	1,4774	1,3871	1,2709	1,1814	1,0672	1,0134
7	2,7725	2,6037	2,3863	2,2189	2,0050	1,9042
8	4,1065	3,8563	3,5341	3,2861	2,9690	2,8197
10	7,5917	7,1248	6,5250	6,0638	5,4756	5,1989
12	11,4070	10,6981	9,7892	9,0920	8,2043	7,7875
15	17,7168	16,6033	15,1792	14,0890	12,7041	12,0548
20	29,6950	27,8103	25,4049	23,5671	21,2367	20,1458
25	42,7156	39,9862	36,5075	33,8535	30,4921	28,9202
30	55,7162	52,1307	47,5679	44,0916	39,6948	37,6409
35	67,2861	62,9237	57,3810	53,1645	47,8389	45,3539
38	73,9174	69,1048	62,9954	58,3518	52,4915	49,7588
40	77,4504	72,3935	65,9778	61,1042	54,9569	52,0916
45	85,8361	80,1959	73,0500	67,6286	60,7986	57,6181
50	93,3596	87,1926	79,3880	73,4731	66,0289	62,5652
60	103,8459	96,9294	88,1915	81,5803	73,2730	69,4126

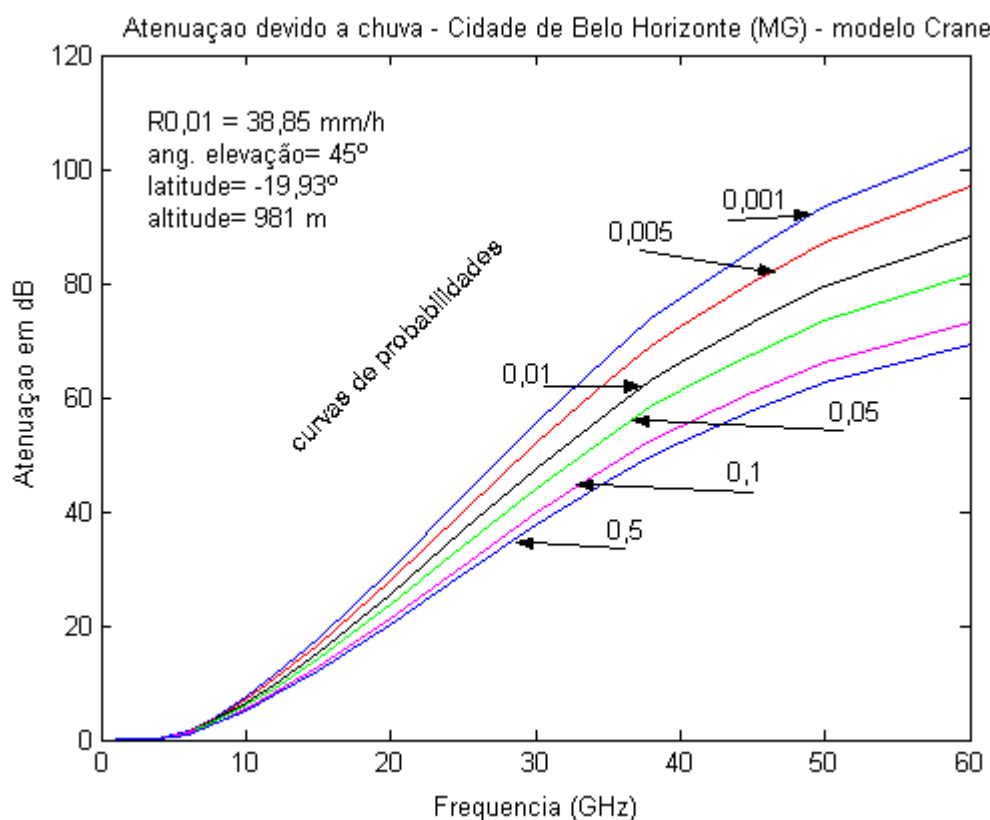


Figura 5.18 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG)

Tabela 5.19 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo Crane

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0089	0,0085	0,0080	0,0076	0,0072	0,0070
2	0,0425	0,0405	0,0381	0,0365	0,0345	0,0336
4	0,3183	0,3038	0,2862	0,2742	0,2596	0,2535
6	1,6879	1,6141	1,5241	1,4625	1,3871	1,3557
7	3,1671	3,0295	2,8613	2,7462	2,6052	2,5464
8	4,6911	4,4871	4,2377	4,0671	3,8580	3,7710
10	8,6743	8,2927	7,8268	7,5087	7,1193	6,9573
12	13,0373	12,4559	11,7477	11,2647	10,6747	10,4294
15	20,2551	19,3388	18,2250	17,4668	16,5419	16,1579
20	33,9590	32,4037	30,5162	29,2334	27,6708	27,0226
25	48,8593	46,6022	43,8666	42,0093	39,7492	38,8123
30	63,7438	60,7725	57,1759	54,7369	51,7717	50,5435
35	76,9991	73,3760	68,9962	66,0298	62,4270	60,9360
38	84,5996	80,5974	75,7631	72,4910	68,5195	66,8766
40	88,6516	84,4427	79,3613	75,9235	71,7526	70,0277
45	98,2716	93,5682	87,8965	84,0633	79,4168	77,4965
50	106,9050	101,7542	95,5487	91,3584	86,2829	84,1865
60	118,9487	113,1573	106,1906	101,4927	95,8089	93,4634

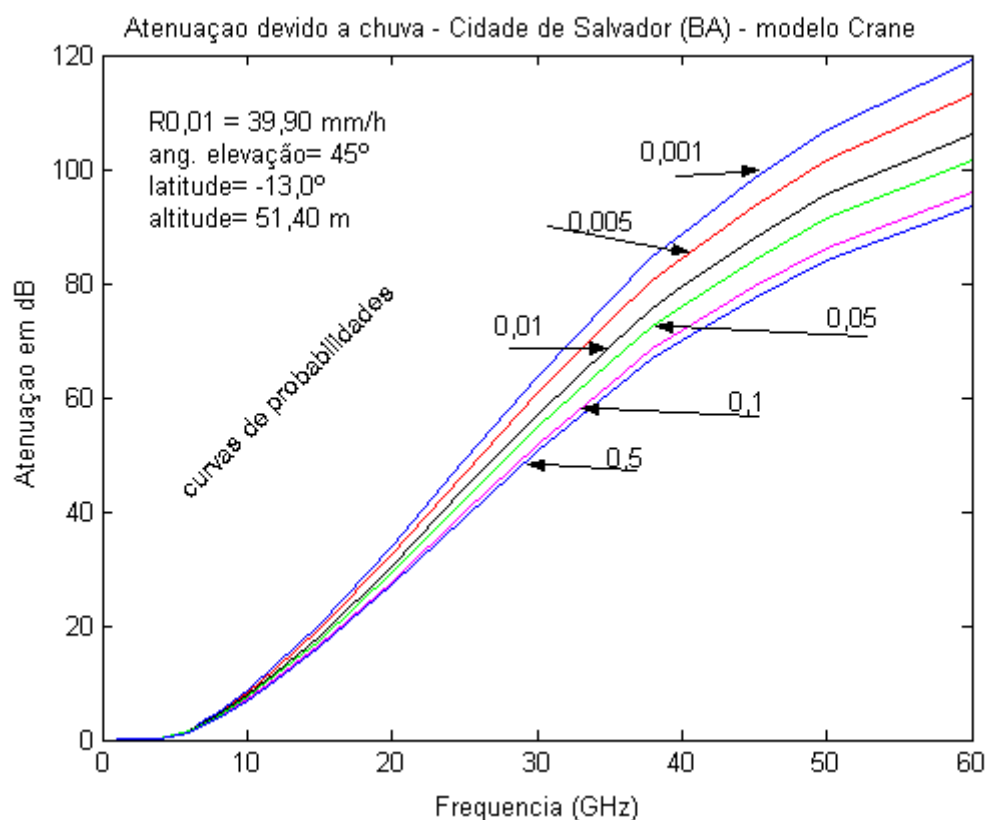


Figura 5.19 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA)

Tabela 5.20 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0078	0,0075	0,0072	0,0070	0,0067	0,0066
2	0,0371	0,0359	0,0344	0,0332	0,0318	0,0313
4	0,2734	0,2649	0,2542	0,2456	0,2357	0,2323
6	1,4265	1,3835	1,3294	1,2862	1,2357	1,2186
7	2,6710	2,5909	2,4900	2,4095	2,3153	2,2833
8	3,9580	3,8392	3,6896	3,5702	3,4305	3,3831
10	7,3514	7,1286	6,8482	6,6246	6,3631	6,2745
12	11,1059	10,7654	10,3373	9,9963	9,5979	9,4631
15	17,3492	16,8106	16,1342	15,5963	14,9684	14,7560
20	29,2262	28,3089	27,1584	26,2443	25,1785	24,8181
25	42,1883	40,8543	39,1823	37,8548	36,3081	35,7854
30	55,2312	53,4709	51,2665	49,5176	47,4814	46,7937
35	66,9585	64,8069	62,1145	59,9802	57,4973	56,6591
38	73,7201	71,3401	68,3632	66,0046	63,2618	62,3362
40	77,3575	74,8522	71,7197	69,2385	66,3540	65,3807
45	86,0177	83,2122	79,7070	76,9324	73,7090	72,6219
50	93,8160	90,7382	86,8950	83,8547	80,3245	79,1344
60	104,8065	101,3365	97,0075	93,5862	89,6168	88,2795

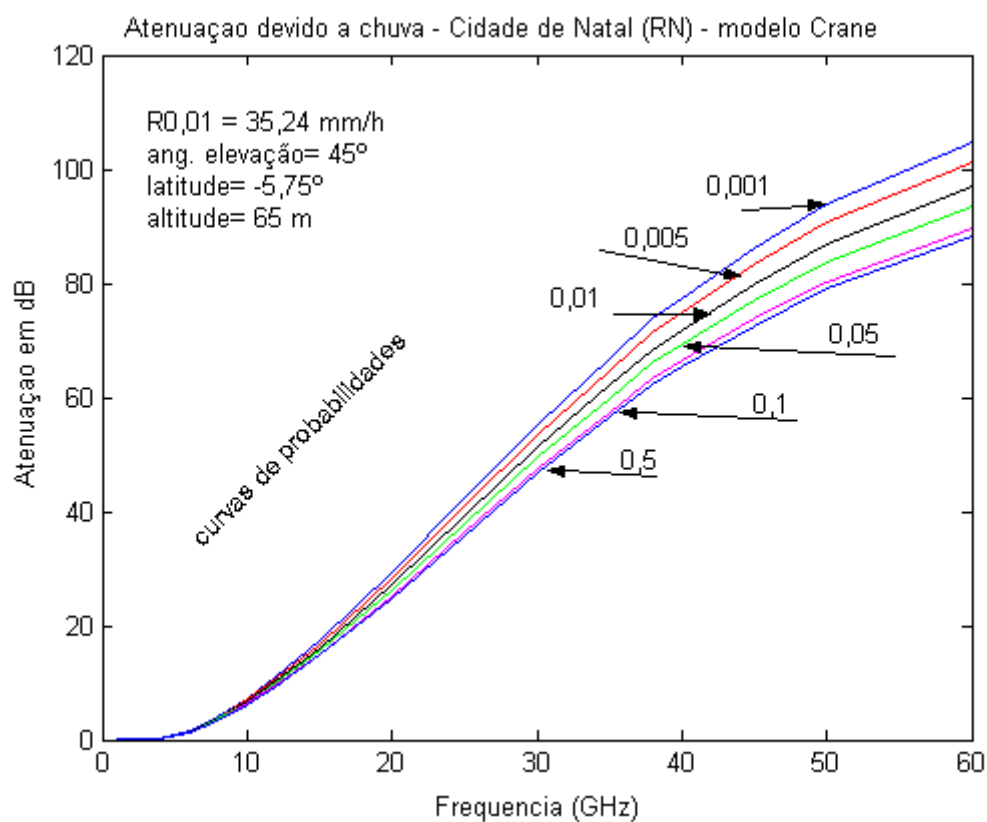


Figura 5.20 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN)

Tabela 5.21 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0092	0,0089	0,0085	0,0082	0,0078	0,0077
2	0,0443	0,0428	0,0408	0,0394	0,0376	0,0370
4	0,3380	0,3266	0,3119	0,3014	0,2886	0,2839
6	1,8335	1,7741	1,6976	1,6424	1,5749	1,5501
7	3,4504	3,3393	3,1959	3,0924	2,9659	2,9194
8	5,1076	4,9429	4,7305	4,5772	4,3898	4,3209
10	9,3862	9,0800	8,6855	8,4013	8,0540	7,9266
12	14,0064	13,5434	12,9477	12,5190	11,9959	11,8041
15	21,5947	20,8707	19,9405	19,2721	18,4574	18,1590
20	35,9637	34,7431	33,1766	32,0525	30,6840	30,1831
25	51,5050	49,7419	47,4813	45,8605	43,8889	43,1677
30	66,8695	64,5598	61,6013	59,4821	56,9062	55,9645
35	80,3632	77,5614	73,9760	71,4102	68,2941	67,1556
38	88,0384	84,9525	81,0059	78,1831	74,7566	73,5052
40	92,0757	88,8368	84,6961	81,7355	78,1429	76,8312
45	101,6212	98,0178	93,4150	90,1268	86,1395	84,6845
50	110,1462	106,2144	101,1958	97,6129	93,2710	91,6873
60	121,8561	117,4607	111,8569	107,8603	103,0218	101,2582

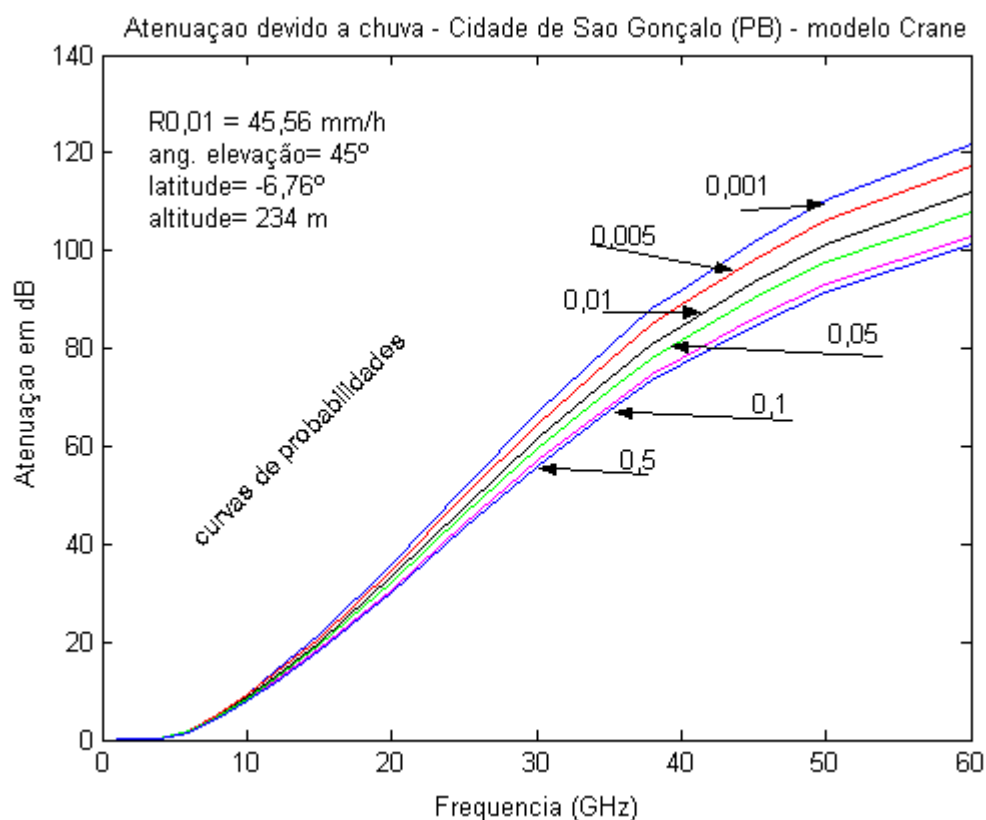


Figura 5.21 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB)

Tabela 5.22 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo Crane

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0078	0,0076	0,0073	0,0070	0,0067	0,0066
2	0,0373	0,0361	0,0347	0,0335	0,0320	0,0315
4	0,2773	0,2687	0,2583	0,2494	0,2389	0,2354
6	1,4581	1,4146	1,3615	1,3158	1,2624	1,2442
7	2,7329	2,6518	2,5527	2,4674	2,3675	2,3336
8	4,0489	3,9286	3,7818	3,6553	3,5072	3,4569
10	7,5043	7,2791	7,0045	6,7682	6,4917	6,3979
12	11,3091	10,9658	10,5476	10,1882	9,7681	9,6257
15	17,6202	17,0788	16,4200	15,8544	15,1941	14,9706
20	29,6148	28,6951	27,5771	26,6183	25,5000	25,1219
25	42,6816	41,3463	39,7243	38,3342	36,7141	36,1665
30	55,7839	54,0250	51,8903	50,0622	47,9331	47,2138
35	67,5102	65,3643	62,7619	60,5350	57,9435	57,0684
38	74,2532	71,8820	69,0076	66,5492	63,6895	62,7242
40	77,8649	75,3706	72,3481	69,7637	66,7584	65,7441
45	86,4519	83,6634	80,2865	77,4011	74,0479	72,9168
50	94,1715	91,1165	87,4189	84,2612	80,5937	79,3571
60	104,9974	101,5602	97,4040	93,8577	89,7425	88,3557

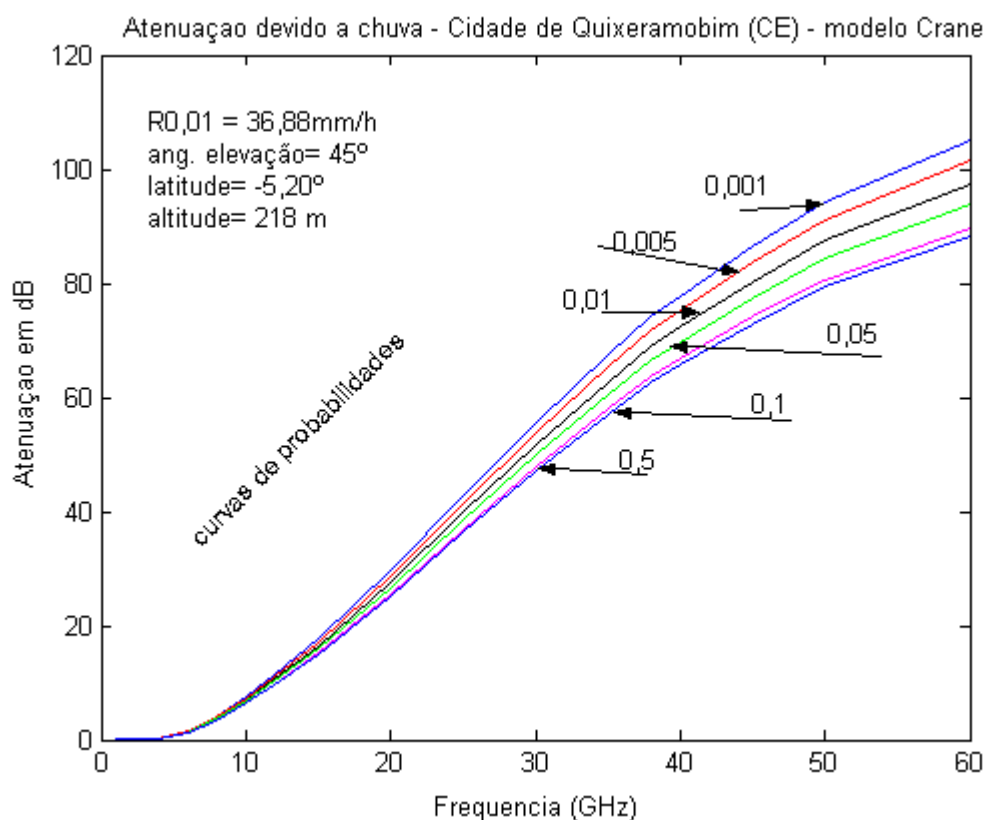


Figura 5.22 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE)

5.4 Comparação entre as atenuações calculadas pelos modelos CCIR e Crane

Tabela 5.23 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane para a cidade de Cuiabá

Freq. GHz	Cidade de Cuiabá – probabilidade 0,01%			
	CCIR		Crane	
	Chuva Regional 44,04 mm/h	Chuva modelo 95 mm/h	Chuva Regional 44,04 mm/h	Chuva modelo 67 mm/h
1	0,0040	0,0081	0,0084	0,0114
2	0,0195	0,0408	0,0405	0,0559
4	0,1494	0,3537	0,3085	0,4483
6	0,8164	2,2315	1,6691	2,5835
7	1,5377	4,2815	3,1399	4,8999
8	2,2758	6,3124	4,6484	7,2416
10	4,1742	11,1326	8,5484	13,0893
12	6,2147	15,8397	12,7668	19,1624
15	9,5579	23,2091	19,7008	28,9474
20	15,8828	36,9706	32,8343	47,3583
25	22,7113	51,3435	47,0474	66,9950
30	29,4380	64,5351	61,1150	85,8627
35	35,3168	74,9628	73,4886	101,7981
38	38,6509	80,5399	80,5328	110,6592
40	40,3961	83,1475	84,2436	115,1374

Tabela 5.24 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane para a cidade de Belo Horizonte

Freq. GHz	Cidade de Belo Horizonte – probabilidade 0,01%			
	CCIR		Crane	
	Chuva Regional 38,85 mm/h	Chuva modelo 95 mm/h	Chuva Regional 38,85 mm/h	Chuva modelo 67 mm/h
1	0,0027	0,0062	0,0066	0,0099
2	0,0131	0,0311	0,0317	0,0485
4	0,0989	0,2693	0,2383	0,3912
6	0,5276	1,6993	1,2709	2,2679
7	0,9908	3,2603	2,3863	4,3045
8	1,4674	4,8068	3,5341	6,3607
10	2,7086	8,4773	6,5250	11,4789
12	4,0626	12,0617	9,7892	16,7739
15	6,2977	17,6733	15,1792	25,2887
20	10,5376	28,1525	25,4049	41,3001
25	15,1400	39,0972	36,5075	58,3533
30	19,7228	49,1424	47,5679	74,6901
35	23,7864	57,0830	57,3810	88,4305
38	26,1104	61,3298	62,9954	96,0522
40	27,3442	63,3155	65,9778	99,8865

Tabela 5.25 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane para a cidade de Quixeramobim

Freq. GHz	Cidade de Quixeramobim – probabilidade 0,01%			
	CCIR		Crane	
	Chuva Regional 36,88 mm/h	Chuva modelo 95 mm/h	Chuva Regional 36,88 mm/h	Chuva modelo 67 mm/h
1	0,0034	0,0081	0,0073	0,0112
2	0,0164	0,0407	0,0347	0,0549
4	0,1222	0,3529	0,2583	0,4405
6	0,6458	2,2265	1,3615	2,5411
7	1,2113	4,2719	2,5527	4,8199
8	1,7944	6,2983	3,7818	7,1232
10	3,3210	11,1076	7,0045	12,8725
12	4,9965	15,8042	10,5476	18,8402
15	7,7708	23,1571	16,4200	28,4527
20	13,0397	36,8878	27,5771	46,5374
25	18,7721	51,2285	39,7243	65,8225
30	24,5053	64,3906	51,8903	84,3446
35	29,6189	74,7949	62,7619	99,9789
38	32,5534	80,3595	69,0076	108,6697
40	34,1200	82,9613	72,3481	113,0590

5.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os cálculos de atenuação devido à chuva, pelos modelos CCIR e Crane. Neste caso, que se refere a enlace via satélite, o comportamento das atenuações entre os dois modelos, para a mesma frequência são diferentes e com uma característica bem marcante, ou seja, dado uma mesma frequência e variando somente as probabilidades de ocorrência nota-se que as atenuações diminuem à medida que as probabilidades aumentam. Para o modelo CCIR este decréscimo é bastante acentuado, enquanto que para o modelo Crane a diminuição da atenuação é tênue.

As tabelas de 5.1 a 5.10 e 5.13 a 5.22 com suas respectivas figuras, combinadas, fornecem as probabilidades das atenuações serem maiores que determinados valores, para determinadas frequências.

As tabelas 5.23, 5.24 e 5.25 fazem comparações entre as atenuações para cada modelo, considerando a intensidade de chuva de cada local, neste caso as cidades de Cuiabá, Belo Horizonte e Quixeramobim, que servem de amostra para todo o corredor geográfico abordado neste estudo, e aquelas intensidades sugeridas quando não são disponíveis dados do próprio local. A comparação foi estabelecida considerando a probabilidade de 0,01% do tempo, ou seja, 53 minutos do ano. De modo geral os resultados dos cálculos de cada modelo apontam para uma sobre estimativa das intensidades de chuvas sugeridas, o que resultam, inevitavelmente, em atenuações maiores.

CAPÍTULO VI

CÁLCULO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA USANDO OS MODELOS PARA ENLACE VIA TERRESTRE

6.1 Introdução

Neste capítulo serão feitos os cálculos e apresentados os resultados das atenuações devido a chuvas pelos modelos relacionados a enlace via terrestre, abordados no capítulo III. Estes cálculos foram feitos utilizando o software MATLAB. Com os resultados pretende-se comparar os diferentes modelos, fazer uma análise estatística do sinal frente aquela condição de atenuação e tirar conclusões sobre as atenuações devido a chuvas e suas afetabilidade na comunicação via terrestre nas cidades de Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Cuiabá (MT), Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Belo Horizonte (MG), Salvador (BA), Natal (RN), São Gonçalo (PB) e Quixeramobim (CE). As taxas de distribuição de chuvas para percentagem de tempo de 0,01%, adotadas para os cálculos, são aquelas fruto de todo tratamento conforme capítulo IV, cujos resultados estão mostrados na tabela 4.11.

Serão feitos os cálculos e comparações entre as atenuações derivadas dos modelos ITU-R cujos detalhes estão descritos na seção 3.2, modelo Crane, com detalhes na seção 3.3 e o modelo Moupfouma que tem os detalhes descritos na seção 3.4. Esta seção detalha o procedimento para transformar a distribuição da taxa de chuva (mm/h) de $R_{0,01}$ em R_m que será utilizada no modelo Moupfouma.

Nos cálculos feitos nesta seção, será utilizada a frequência de 38 GHz conforme comentado na seção 5.1. Esta frequência é necessária, haja visto, que o Modelo Moupfouma, utiliza a faixa de frequência de 7 a 38 GHz.

Nas seções 6.2, 6.3 e 6.4 que tratam dos resultados dos cálculos das atenuações, serão mostradas as tabelas de 6.1 a 6.10 com suas respectivas figuras (6.1 a 6.10) obtidas pelo método ITU-R, as tabelas de 6.11 a 6.20 com suas respectivas figuras (6.11 a 6.20), resultantes dos cálculos pelo modelo Moupfouma e as tabelas de 6.21 a 6.30 com suas respectivas (6.21 a 6.30), resultados dos cálculos pelo método de Crane.

Cada tabela e cada figura está identificada pela cidade e pelo modelo de cálculo empregado. Utilizou-se valores de frequências de 1 a 60 GHz por se tratar da faixa mais importante para telecomunicação.

Os valores 0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 referem-se a porcentagem de tempo anual p em que a atenuação é excedida.

Como visto na seção 5.1, trata-se da confiabilidade do enlace que é dada pelo tempo que o sinal é disponível menos o tempo em que a atenuação excede um valor passando a prejudicar o sinal [10].

Ou seja, se o tempo excedido é 0,01%, a confiabilidade é de 100% - 0,01%, estando portanto o sinal disponível em 99,99 % do tempo por ano. Isto é que prevalece para efeito do estudo comparativo, pois serão destacadas apenas as atenuações referente a 0,01% do tempo excedido, o que corresponde a 53 minutos em 1 ano, conforme tabelas da seção 6.5

6.2 Cálculo pelo modelo do ITU-R

Tabela 6.1 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo ITU-R para 5 km

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0291	0,0103	0,0064	0,0017	0,0009	0,0002
2	0,1408	0,0497	0,0309	0,0083	0,0046	0,0011
4	1,0895	0,3843	0,2388	0,0643	0,0355	0,0083
6	6,0101	2,1197	1,3170	0,3545	0,1957	0,0460
7	11,3342	3,9975	2,4837	0,6685	0,3691	0,0867
8	16,7706	5,9149	3,6751	0,9892	0,5462	0,1283
10	30,6800	10,8207	6,7232	1,8096	0,9992	0,2348
12	45,5414	16,0622	9,9799	2,6862	1,4832	0,3485
15	69,8176	24,6243	15,2997	4,1181	2,2739	0,5342
20	115,6955	40,8052	25,3534	6,8241	3,7680	0,8853
25	165,1184	58,2364	36,1838	9,7393	5,3777	1,2635
30	213,5900	75,3321	46,8058	12,5983	6,9563	1,6344
35	255,6989	90,1837	56,0335	15,0820	8,3278	1,9566
38	279,4980	98,5775	61,2488	16,4858	9,1029	2,1387
40	291,8816	102,9451	63,9625	17,2162	9,5062	2,2335
45	321,0628	113,2372	70,3572	18,9374	10,4566	2,4568
50	347,0217	122,3927	76,0458	20,4685	11,3020	2,6554
60	382,2220	134,8077	83,7596	22,5448	12,4485	2,9248

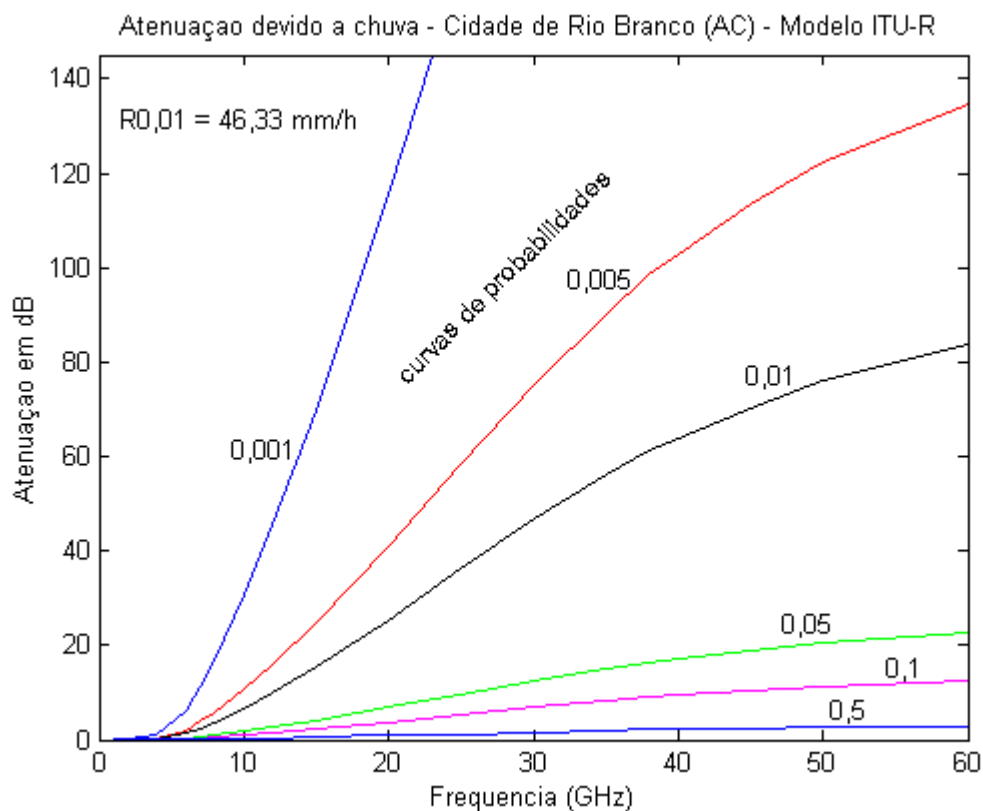


Figura 6.1 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Rio Branco (AC)

Tabela 6.2 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo ITU-R para 5 km

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0318	0,0112	0,0070	0,0019	0,0010	0,0002
2	0,1547	0,0546	0,0339	0,0091	0,0050	0,0012
4	1,2153	0,4286	0,2663	0,0717	0,0396	0,0093
6	6,8270	2,4078	1,4960	0,4027	0,2223	0,0522
7	12,9048	4,5514	2,8279	0,7612	0,4203	0,0987
8	19,0853	6,7313	4,1823	1,1257	0,6216	0,1460
10	34,7418	12,2532	7,6133	2,0492	1,1315	0,2658
12	51,2757	18,0847	11,2365	3,0244	1,6700	0,3924
15	78,1287	27,5556	17,1210	4,6083	2,5445	0,5978
20	128,7776	45,4192	28,2201	7,5957	4,1941	0,9854
25	183,1112	64,5824	40,1267	10,8005	5,9637	1,4012
30	235,9455	83,2167	51,7047	13,9169	7,6844	1,8055
35	281,3108	99,2169	61,6460	16,5927	9,1619	2,1526
38	306,7771	108,1987	67,2267	18,0948	9,9913	2,3475
40	319,8714	112,8170	70,0962	18,8671	10,4178	2,4477
45	350,6217	123,6624	76,8347	20,6809	11,4193	2,6830
50	377,8669	133,2717	82,8052	22,2879	12,3066	2,8915
60	414,2988	146,1210	90,7888	24,4368	13,4932	3,1702

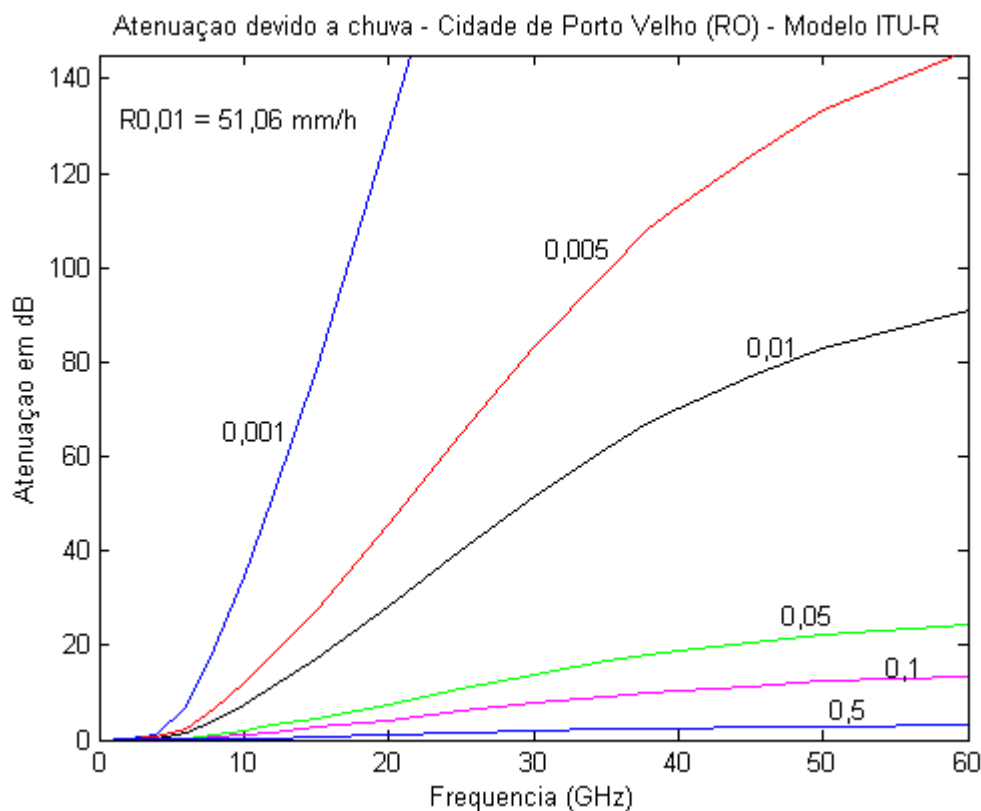


Figura 6.2 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO)

Tabela 6.3 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo ITU-R para 5 km

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0278	0,0098	0,0061	0,0016	0,0009	0,0002
2	0,1341	0,0473	0,0294	0,0079	0,0044	0,0010
4	1,0292	0,3630	0,2255	0,0607	0,0335	0,0079
6	5,6236	1,9834	1,2323	0,3317	0,1832	0,0430
7	10,5924	3,7359	2,3212	0,6248	0,3450	0,0811
8	15,6771	5,5292	3,4354	0,9247	0,5106	0,1200
10	28,7537	10,1413	6,3010	1,6960	0,9365	0,2200
12	42,8098	15,0988	9,3813	2,5251	1,3943	0,3276
15	65,8399	23,2214	14,4281	3,8835	2,1443	0,5038
20	109,4087	38,5879	23,9757	6,4533	3,5633	0,8372
25	156,4470	55,1780	34,2836	9,2278	5,0953	1,1971
30	202,7838	71,5208	44,4377	11,9609	6,6044	1,5517
35	243,2797	85,8035	53,3119	14,3495	7,9233	1,8616
38	266,2465	93,9038	58,3449	15,7041	8,6713	2,0373
40	278,2686	98,1439	60,9794	16,4132	9,0628	2,1293
45	306,6479	108,1531	67,1984	18,0872	9,9871	2,3465
50	331,9457	117,0755	72,7421	19,5793	10,8110	2,5401
60	366,4889	129,2587	80,3118	21,6168	11,9361	2,8044

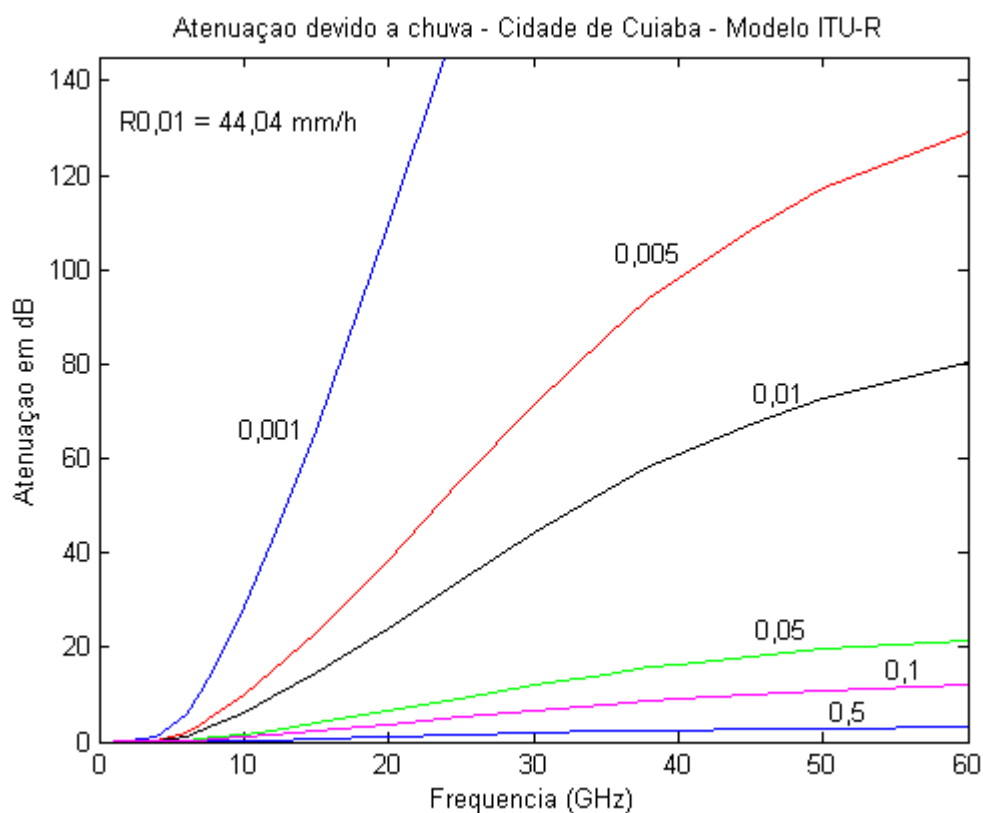


Figura 6.3 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT)

Tabela 6.4 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo ITU-R para 5 km

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0214	0,0076	0,0047	0,0013	0,0007	0,0002
2	0,1020	0,0360	0,0224	0,0060	0,0033	0,0008
4	0,7490	0,2642	0,1641	0,0442	0,0244	0,0057
6	3,8819	1,3691	0,8507	0,2290	0,1264	0,0297
7	7,2624	2,5614	1,5915	0,4284	0,2365	0,0556
8	10,7638	3,7963	2,3588	0,6349	0,3506	0,0824
10	20,0287	7,0640	4,3891	1,1814	0,6523	0,1533
12	30,3208	10,6940	6,6445	1,7884	0,9875	0,2320
15	47,4698	16,7424	10,4025	2,7999	1,5460	0,3632
20	80,1178	28,2571	17,5569	4,7256	2,6093	0,6131
25	115,7997	40,8420	25,3762	6,8303	3,7714	0,8861
30	151,8036	53,5403	33,2660	8,9539	4,9440	1,1616
35	184,2928	64,9991	40,3857	10,8702	6,0022	1,4102
38	203,0633	71,6194	44,4990	11,9774	6,6135	1,5539
40	213,1941	75,1924	46,7190	12,5749	6,9434	1,6314
45	237,3386	83,7081	52,0100	13,9991	7,7298	1,8161
50	259,1056	91,3852	56,7800	15,2829	8,4387	1,9827
60	289,8931	102,2438	63,5267	17,0989	9,4414	2,2183

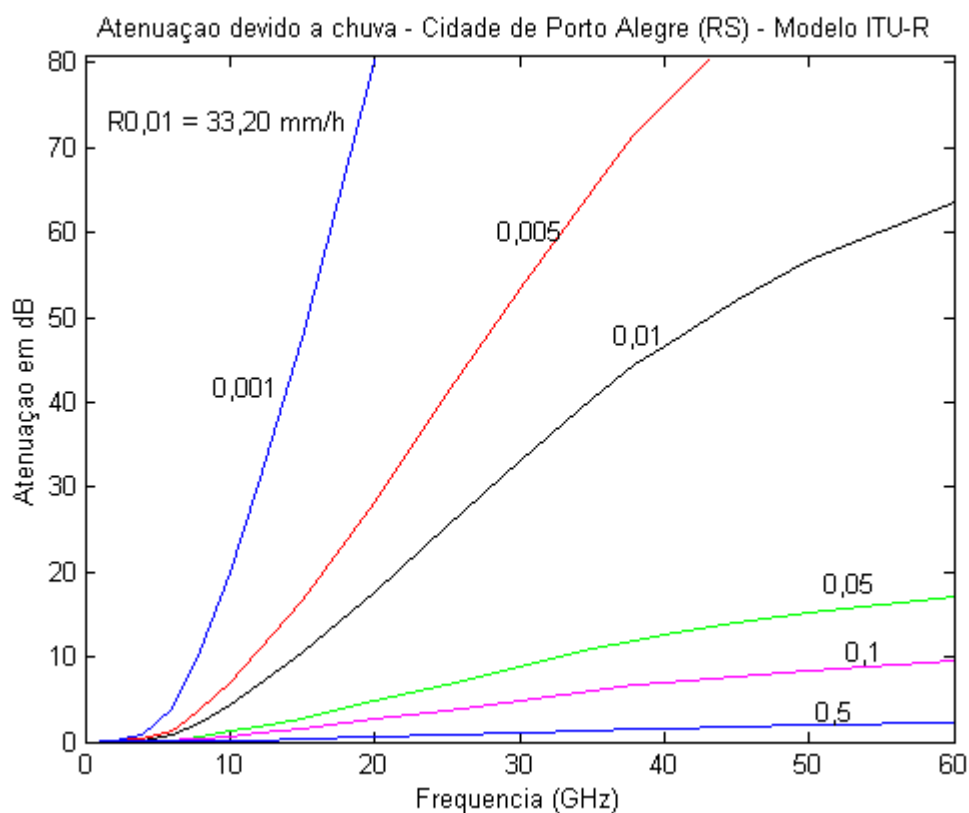


Figura 6.4 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS)

Tabela 6.5 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo ITU-R para 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0242	0,0085	0,0053	0,0014	0,0008	0,0002
2	0,1157	0,0408	0,0254	0,0068	0,0038	0,0009
4	0,8672	0,3059	0,1900	0,0512	0,0282	0,0066
6	4,6056	1,6244	1,0093	0,2717	0,1500	0,0352
7	8,6433	3,0485	1,8941	0,5098	0,2815	0,0661
8	12,8021	4,5152	2,8054	0,7551	0,4169	0,0980
10	23,6637	8,3461	5,1856	1,3958	0,7707	0,1811
12	35,5496	12,5381	7,7903	2,0968	1,1578	0,2720
15	55,2009	19,4691	12,0966	3,2559	1,7978	0,4224
20	92,5007	32,6245	20,2705	5,4560	3,0126	0,7078
25	133,0373	46,9216	29,1536	7,8470	4,3328	1,0180
30	173,4940	61,1904	38,0192	10,2333	5,6505	1,3276
35	209,4760	73,8811	45,9043	12,3556	6,8224	1,6029
38	230,0909	81,1519	50,4218	13,5716	7,4938	1,7607
40	241,0670	85,0231	52,8271	14,2190	7,8512	1,8447
45	267,1124	94,2091	58,5346	15,7552	8,6995	2,0440
50	290,4724	102,4481	63,6537	17,1331	9,4603	2,2227
60	323,0030	113,9215	70,7824	19,0518	10,5198	2,4716

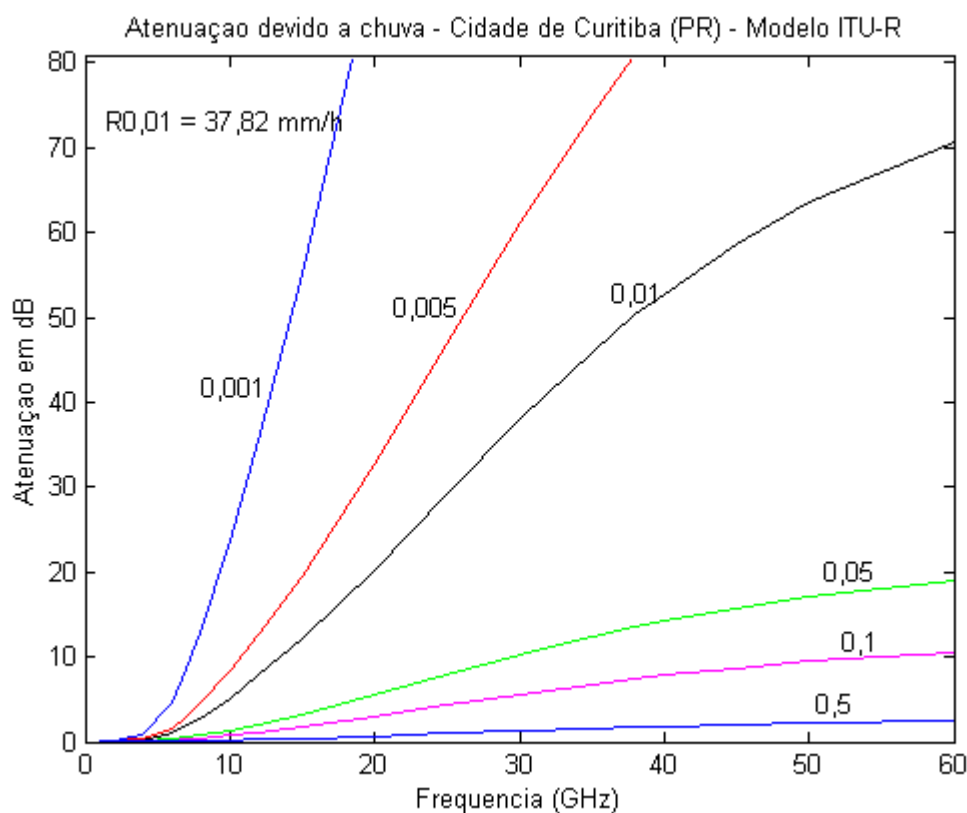


Figura 6.5 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR)

Tabela 6.6 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo ITU-R para 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0248	0,0087	0,0054	0,0015	0,0008	0,0002
2	0,1188	0,0419	0,0260	0,0070	0,0039	0,0009
4	0,8938	0,3152	0,1959	0,0527	0,0291	0,0068
6	4,7708	1,6826	1,0455	0,2814	0,1554	0,0365
7	8,9592	3,1599	1,9633	0,5284	0,2918	0,0686
8	13,2682	4,6796	2,9076	0,7826	0,4321	0,1015
10	24,4916	8,6381	5,3671	1,4446	0,7977	0,1874
12	36,7350	12,9562	8,0501	2,1668	1,1964	0,2811
15	56,9451	20,0842	12,4789	3,3588	1,8546	0,4357
20	95,2827	33,6057	20,8801	5,6201	3,1032	0,7291
25	136,8985	48,2834	29,9997	8,0747	4,4586	1,0476
30	178,3376	62,8988	39,0806	10,5190	5,8082	1,3647
35	215,0813	75,8581	47,1326	12,6862	7,0049	1,6458
38	236,0956	83,2697	51,7376	13,9257	7,6893	1,8066
40	247,2518	87,2044	54,1824	14,5838	8,0527	1,8920
45	273,7005	96,5327	59,9783	16,1438	8,9141	2,0944
50	297,3968	104,8903	65,1711	17,5415	9,6858	2,2757
60	330,2855	116,4900	72,3783	19,4814	10,7570	2,5274

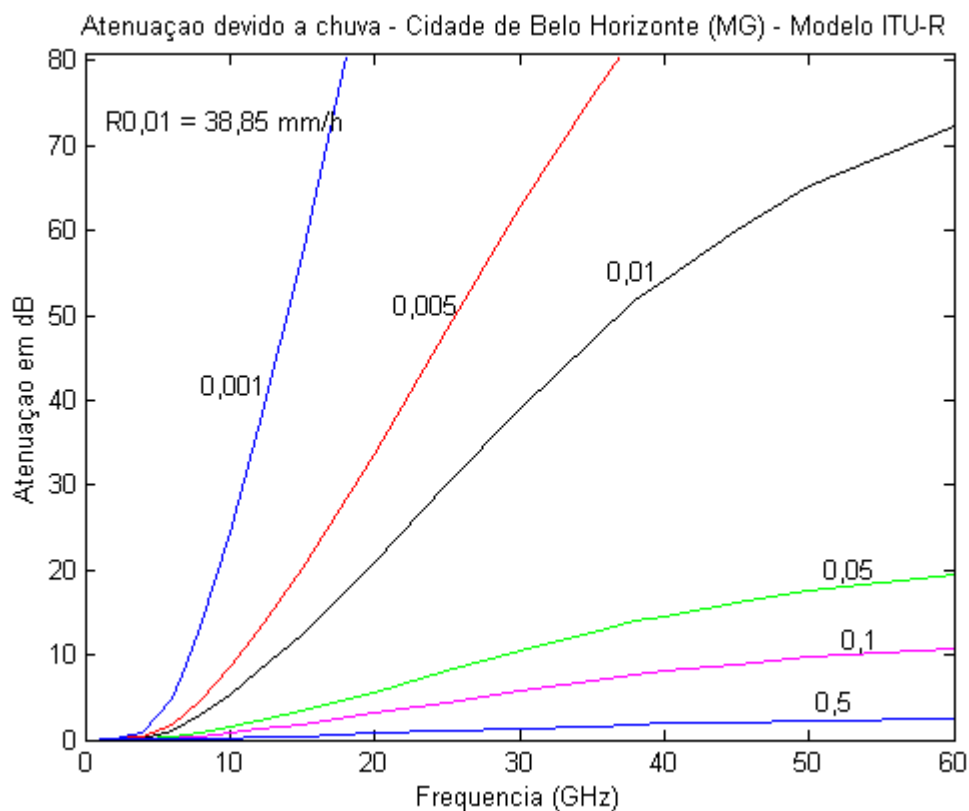


Figura 6.6 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG)

Tabela 6.7 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo ITU-R para 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0248	0,0089	0,0055	0,0015	0,0008	0,0002
2	0,1188	0,0429	0,0266	0,0072	0,0040	0,0009
4	0,8938	0,3239	0,2013	0,0542	0,0299	0,0070
6	4,7708	1,7368	1,0791	0,2905	0,1604	0,0377
7	8,9592	3,2635	2,0277	0,5458	0,3014	0,0708
8	13,2682	4,8325	3,0026	0,8082	0,4462	0,1048
10	24,4916	8,9093	5,5356	1,4900	0,8227	0,1933
12	36,7350	13,3440	8,2910	2,2316	1,2322	0,2895
15	56,9451	20,6539	12,8328	3,4541	1,9072	0,4481
20	95,2827	34,5130	21,4438	5,7718	3,1870	0,7488
25	136,8985	49,5414	30,7814	8,2851	4,5748	1,0749
30	178,3376	64,4752	40,0602	10,7826	5,9538	1,3989
35	215,0813	77,6805	48,2649	12,9910	7,1732	1,6854
38	236,0956	85,2207	52,9499	14,2520	7,8695	1,8490
40	247,2518	89,2132	55,4305	14,9197	8,2382	1,9356
45	273,7005	98,6705	61,3066	16,5013	9,1115	2,1408
50	297,3968	107,1355	66,5661	17,9170	9,8931	2,3244
60	330,2855	118,8485	73,8437	19,8758	10,9747	2,5785

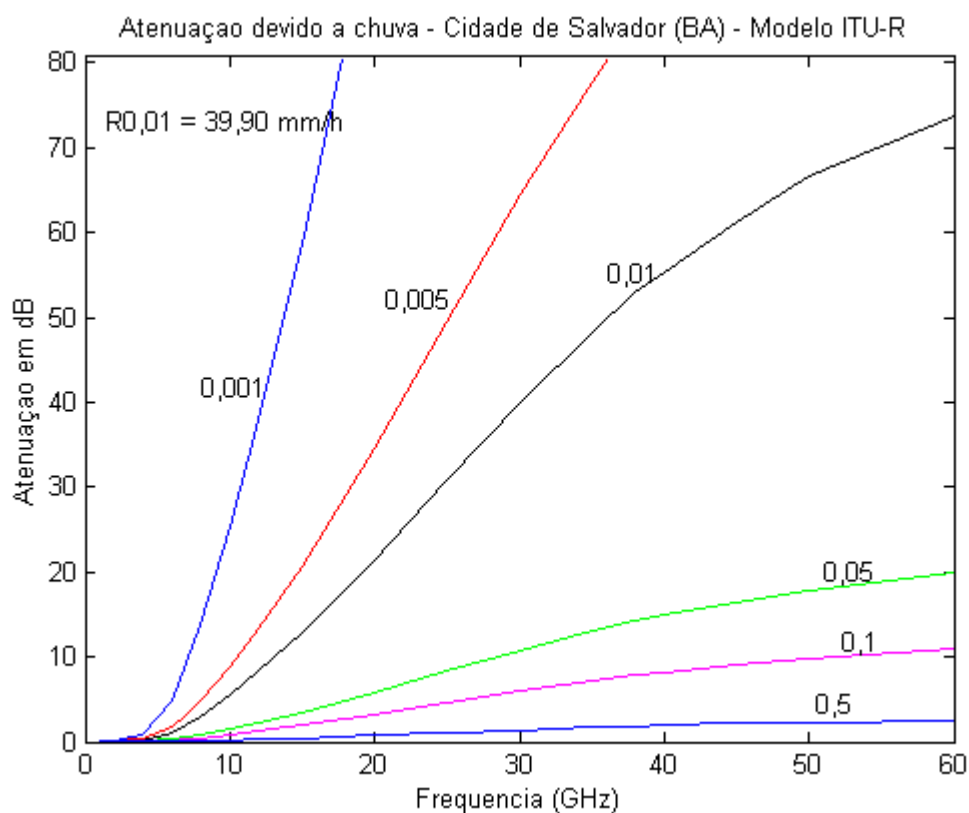


Figura 6.7 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA)

Tabela 6.8 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo ITU-R para 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0227	0,0080	0,0050	0,0013	0,0007	0,0002
2	0,1081	0,0381	0,0237	0,0064	0,0035	0,0008
4	0,8010	0,2825	0,1755	0,0472	0,0261	0,0061
6	4,1979	1,4806	0,9199	0,2476	0,1367	0,0321
7	7,8648	2,7739	1,7235	0,4639	0,2561	0,0602
8	11,6531	4,1100	2,5536	0,6873	0,3795	0,0892
10	21,6176	7,6244	4,7372	1,2751	0,7041	0,1654
12	32,6113	11,5018	7,1464	1,9235	1,0621	0,2495
15	50,8643	17,9396	11,1463	3,0002	1,6566	0,3892
20	85,5658	30,1786	18,7508	5,0470	2,7868	0,6548
25	123,3941	43,5205	27,0404	7,2782	4,0188	0,9442
30	161,3738	56,9157	35,3632	9,5184	5,2557	1,2348
35	195,4212	68,9240	42,8243	11,5266	6,3646	1,4954
38	215,0172	75,8355	47,1186	12,6825	7,0028	1,6453
40	225,5291	79,5429	49,4221	13,3025	7,3452	1,7258
45	250,5321	88,3614	54,9012	14,7773	8,1595	1,9171
50	273,0203	96,2928	59,8293	16,1037	8,8919	2,0892
60	304,6063	107,4330	66,7510	17,9667	9,9206	2,3309

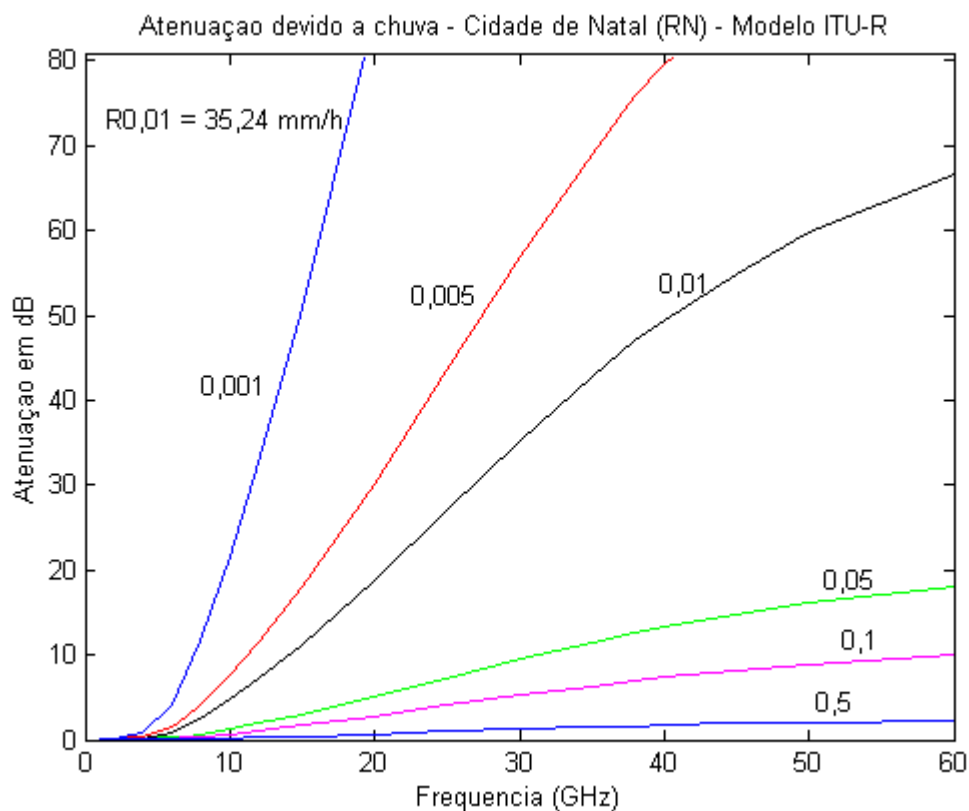


Figura 6.8– Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN)

Tabela 6.9 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo ITU-R para 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0287	0,0101	0,0063	0,0017	0,0009	0,0002
2	0,1386	0,0489	0,0304	0,0082	0,0045	0,0011
4	1,0692	0,3771	0,2343	0,0631	0,0348	0,0082
6	5,8794	2,0737	1,2884	0,3468	0,1915	0,0450
7	11,0834	3,9090	2,4288	0,6537	0,3610	0,0848
8	16,4009	5,7845	3,5941	0,9674	0,5342	0,1255
10	30,0293	10,5912	6,5806	1,7712	0,9780	0,2298
12	44,6196	15,7371	9,7779	2,6318	1,4532	0,3414
15	68,4767	24,1514	15,0059	4,0390	2,2302	0,5240
20	113,5781	40,0584	24,8893	6,6992	3,6991	0,8691
25	162,1997	57,2070	35,5442	9,5671	5,2826	1,2412
30	209,9552	74,0501	46,0093	12,3839	6,8380	1,6066
35	251,5245	88,7114	55,1187	14,8358	8,1918	1,9247
38	275,0456	97,0072	60,2731	16,2231	8,9579	2,1047
40	287,3090	101,3324	62,9605	16,9465	9,3573	2,1985
45	316,2237	111,5305	69,2968	18,6520	10,2990	2,4198
50	341,9633	120,6087	74,9373	20,1702	11,1373	2,6167
60	376,9473	132,9474	82,6037	22,2337	12,2767	2,8844

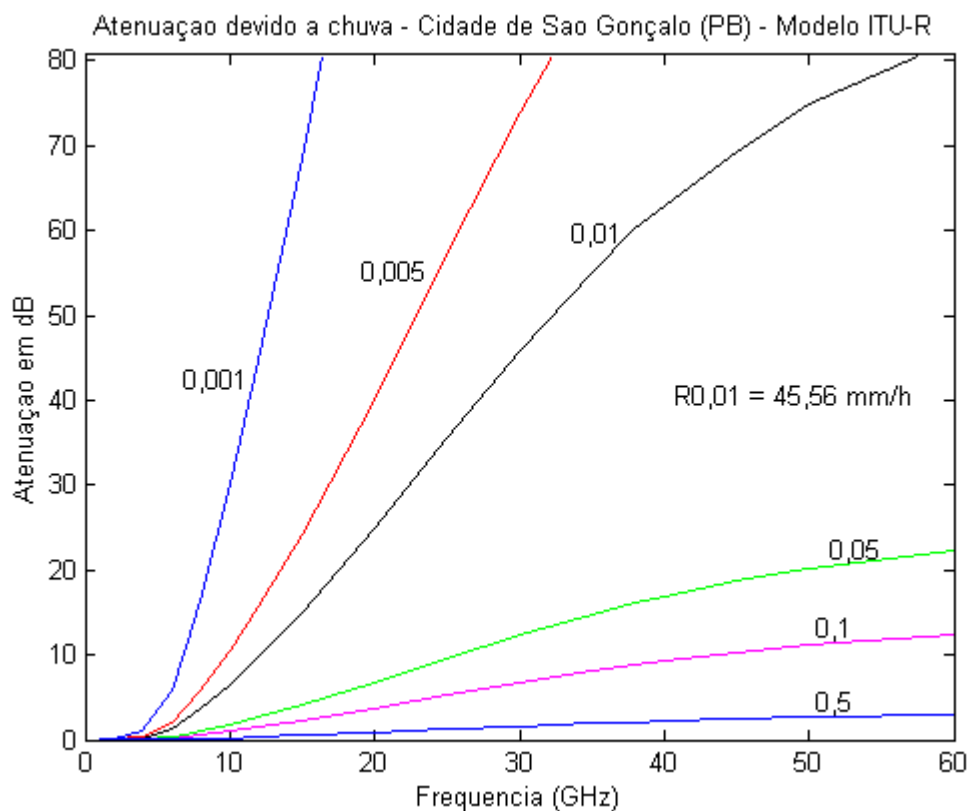


Figura 6.9 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB)

Tabela 6.10 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo ITU-R para 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0236	0,0083	0,0052	0,0014	0,0008	0,0002
2	0,1130	0,0398	0,0248	0,0067	0,0037	0,0009
4	0,8430	0,2973	0,1847	0,0497	0,0275	0,0065
6	4,4560	1,5716	0,9765	0,2628	0,1451	0,0341
7	8,3575	2,9477	1,8315	0,4930	0,2722	0,0640
8	12,3804	4,3665	2,7130	0,7302	0,4032	0,0947
10	22,9136	8,0815	5,0213	1,3515	0,7463	0,1753
12	34,4738	12,1587	7,5545	2,0334	1,1228	0,2638
15	53,6154	18,9099	11,7492	3,1624	1,7462	0,4103
20	89,9684	31,7314	19,7155	5,3066	2,9302	0,6884
25	129,5191	45,6807	28,3826	7,6395	4,2183	0,9911
30	169,0760	59,6322	37,0511	9,9727	5,5066	1,2938
35	204,3577	72,0759	44,7826	12,0537	6,6557	1,5638
38	224,6045	79,2168	49,2195	13,2479	7,3151	1,7187
40	235,4136	83,0292	51,5882	13,8855	7,6671	1,8014
45	261,0847	92,0832	57,2137	15,3997	8,5032	1,9978
50	284,1320	100,2119	62,2643	16,7591	9,2538	2,1742
60	316,3265	111,5667	69,3193	18,6580	10,3023	2,4206

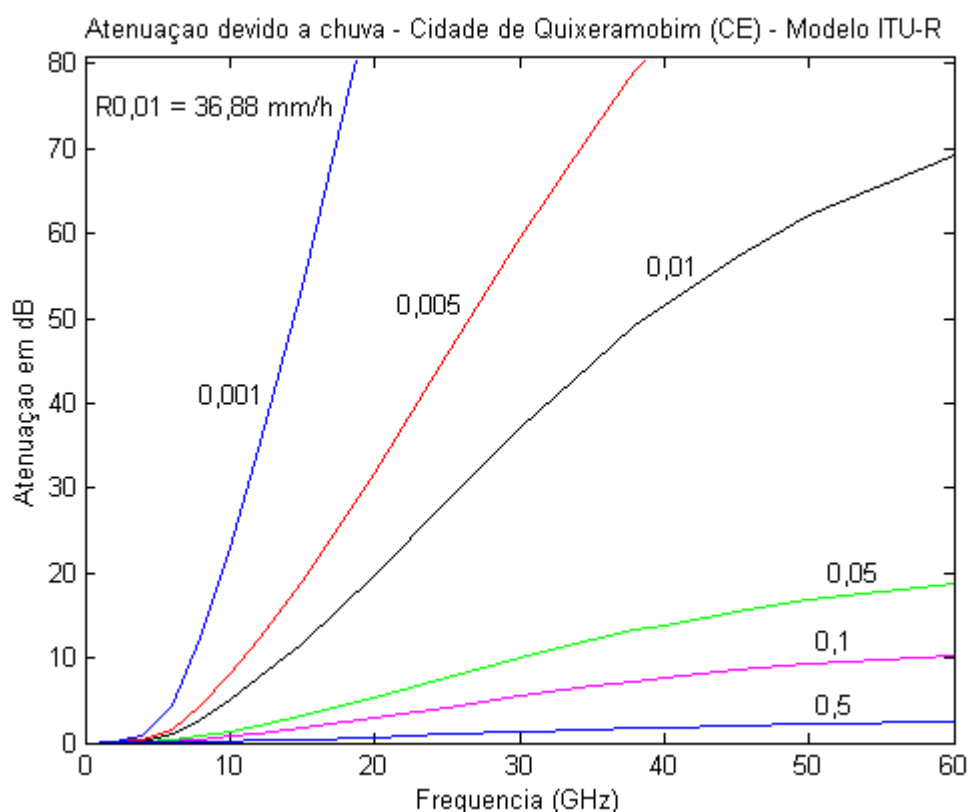


Figura 6.10 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo ITU-R, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE)

6.3 Cálculo pelo modelo Moupfouma

Tabela 6.11 - Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	P = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0158	0,0095	0,0074	0,0039	0,0028	0,0013
2	0,0772	0,0463	0,0362	0,0188	0,0138	0,0063
4	0,6132	0,3678	0,2873	0,1496	0,1097	0,0499
6	3,4880	2,0924	1,6342	0,8509	0,6243	0,2837
7	6,6039	3,9615	3,0940	1,6111	1,1820	0,5372
8	9,7635	5,8568	4,5743	2,3818	1,7474	0,7943
10	17,7119	10,6249	8,2982	4,3209	3,1700	1,4409
12	26,0375	15,6192	12,1988	6,3519	4,6601	2,1181
15	39,5052	23,6981	18,5086	9,6375	7,0706	3,2137
20	64,8746	38,9165	30,3944	15,8264	11,6111	5,2775
25	92,0106	55,1946	43,1079	22,4463	16,4679	7,4850
30	118,2399	70,9289	55,3966	28,8451	21,1624	9,6188
35	140,5756	84,3275	65,8611	34,2940	25,1600	11,4358
38	153,0539	91,8129	71,7073	37,3381	27,3933	12,4509
40	159,4149	95,6286	74,6874	38,8899	28,5318	12,9684
45	174,3166	104,5678	81,6691	42,5252	31,1989	14,1806
50	187,4827	112,4658	87,8375	45,7371	33,5553	15,2517
60	204,9089	122,9193	96,0019	49,9883	36,6742	16,6693

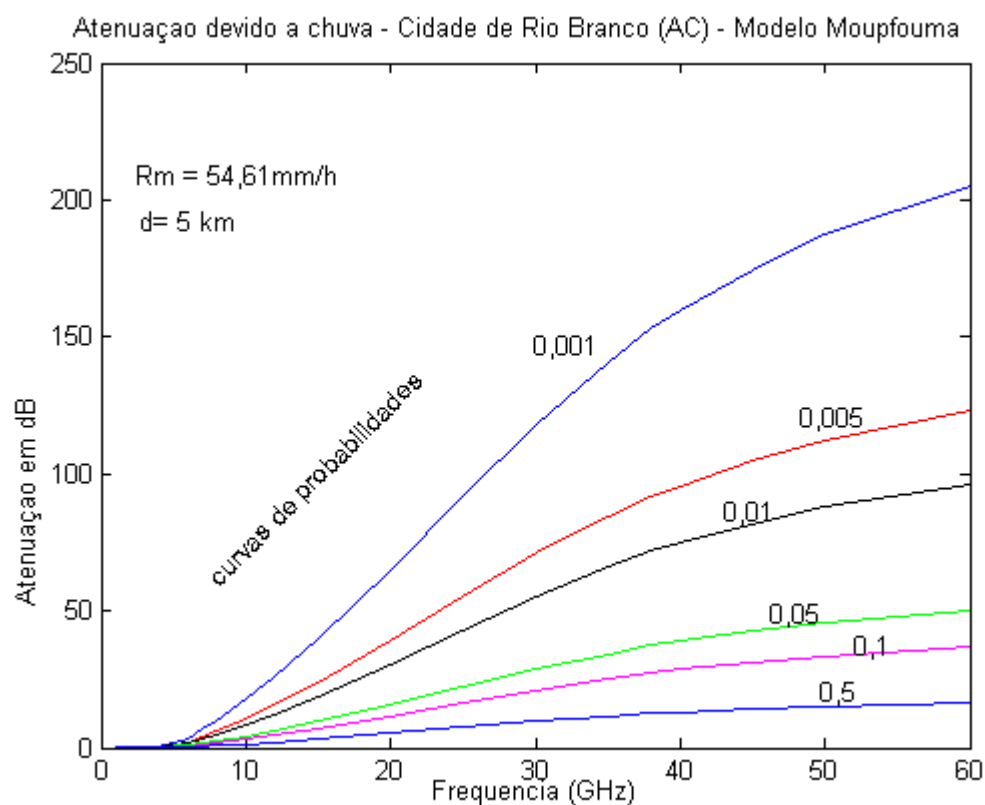


Figura 6.11 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, em Rio Branco (AC) – 5 km

Tabela 6.12 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	P = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0175	0,0105	0,0082	0,0043	0,0031	0,0014
2	0,0858	0,0515	0,0402	0,0209	0,0154	0,0070
4	0,6929	0,4157	0,3246	0,1690	0,1240	0,0564
6	4,0229	2,4133	1,8848	0,9814	0,7200	0,3273
7	7,6367	4,5810	3,5778	1,8630	1,3668	0,6212
8	11,2842	6,7691	5,2867	2,7528	2,0196	0,9180
10	20,3573	12,2118	9,5376	4,9662	3,6435	1,6561
12	29,7347	17,8370	13,9310	7,2539	5,3219	2,4189
15	44,8064	26,8781	20,9922	10,9307	8,0194	3,6450
20	73,1408	43,8751	34,2672	17,8430	13,0906	5,9500
25	103,3060	61,9704	48,3999	25,2019	18,4895	8,4039
30	132,1784	79,2902	61,9269	32,2454	23,6570	10,7527
35	156,4301	93,8382	73,2891	38,1618	27,9976	12,7256
38	169,8713	101,9011	79,5864	41,4408	30,4032	13,8190
40	176,6232	105,9515	82,7497	43,0879	31,6117	14,3683
45	192,3781	115,4024	90,1310	46,9314	34,4315	15,6499
50	206,2336	123,7139	96,6225	50,3115	36,9113	16,7771
60	224,2522	134,5228	105,0644	54,7072	40,1362	18,2429

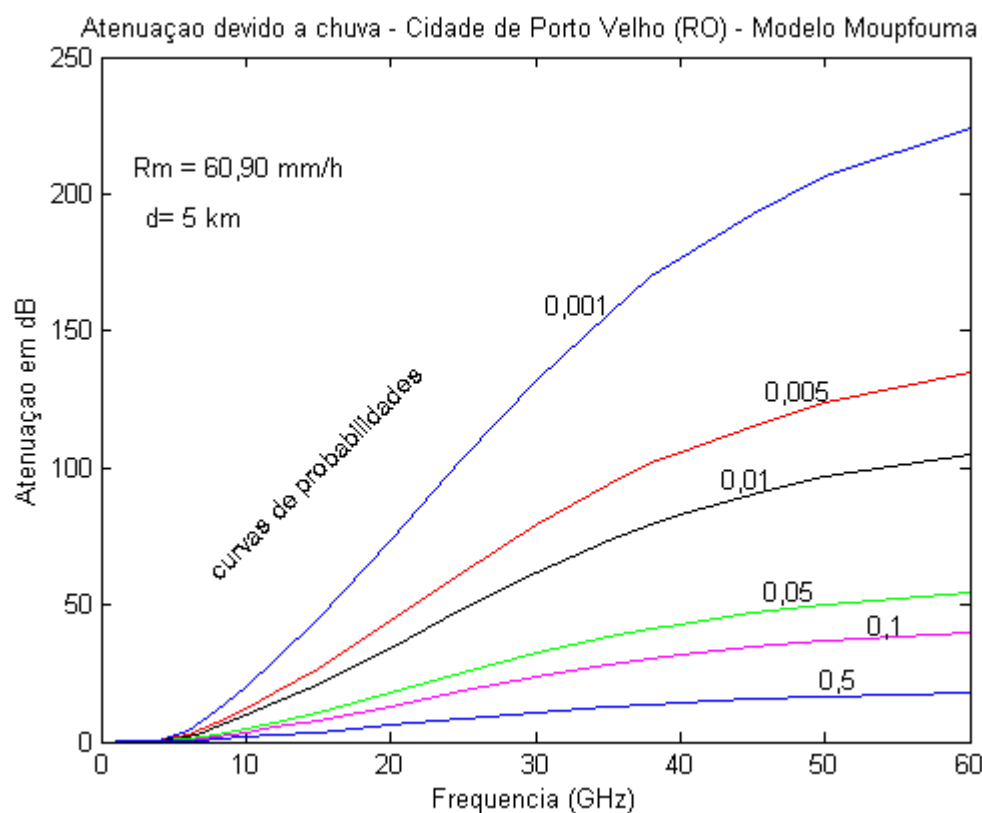


Figura 6.12 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO)

Tabela 6.13 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	P = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0150	0,0090	0,0070	0,0037	0,0027	0,0012
2	0,0731	0,0438	0,0342	0,0178	0,0131	0,0059
4	0,5753	0,3451	0,2695	0,1403	0,1030	0,0468
6	3,2379	1,9423	1,5170	0,7899	0,5795	0,2634
7	6,1220	3,6724	2,8682	1,4935	1,0957	0,4980
8	9,0535	5,4310	4,2417	2,2086	1,6204	0,7365
10	16,4716	9,8809	7,7171	4,0183	2,9481	1,3400
12	24,2954	14,5742	11,3826	5,9270	4,3483	1,9764
15	36,9942	22,1918	17,3321	9,0249	6,6212	3,0095
20	60,9410	36,5569	28,5515	14,8668	10,9071	4,9575
25	86,6183	51,9600	40,5815	21,1309	15,5028	7,0464
30	111,5636	66,9239	52,2686	27,2164	19,9674	9,0757
35	132,9548	79,7559	62,2906	32,4348	23,7960	10,8158
38	144,9539	86,9539	67,9123	35,3621	25,9436	11,7920
40	151,1155	90,6500	70,7991	36,8652	27,0464	12,2932
45	165,5795	99,3266	77,5756	40,3938	29,6351	13,4699
50	178,3892	107,0108	83,5771	43,5188	31,9278	14,5119
60	195,4912	117,2698	91,5896	47,6909	34,9887	15,9032

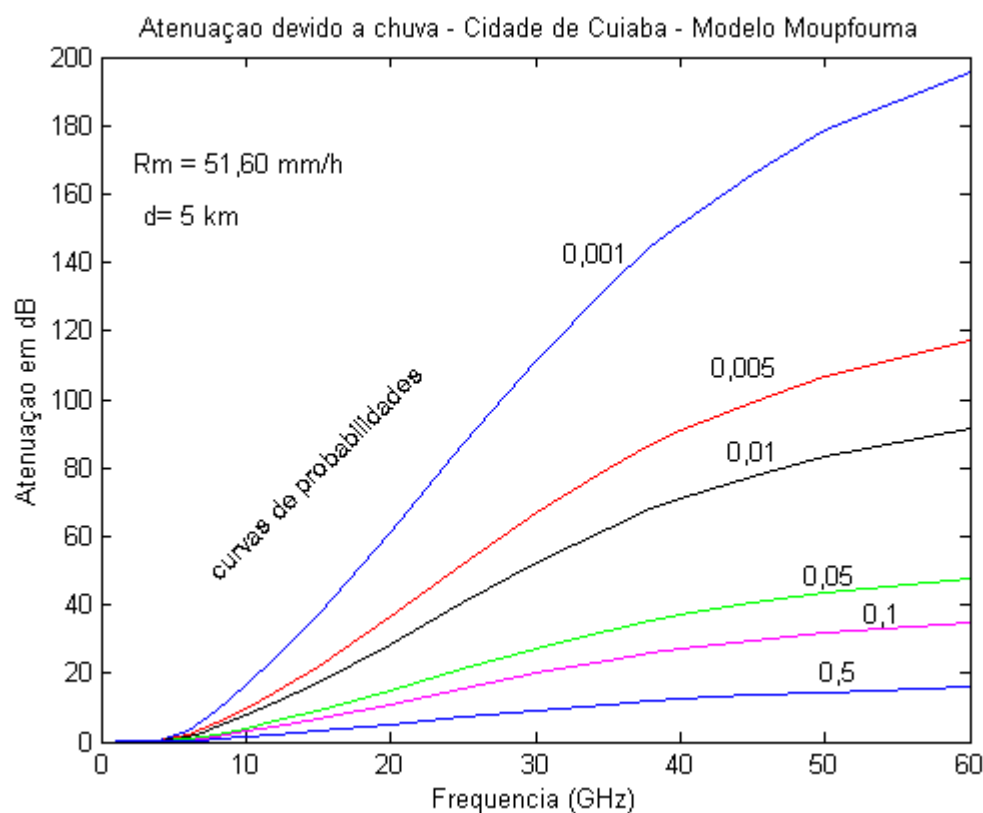


Figura 6.13– Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT)

Tabela 6.14 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	P = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0112	0,0067	0,0053	0,0027	0,0020	0,0009
2	0,0538	0,0323	0,0252	0,0131	0,0096	0,0044
4	0,4030	0,2418	0,1888	0,0983	0,0721	0,0328
6	2,1382	1,2826	1,0018	0,5216	0,3827	0,1739
7	4,0121	2,4068	1,8797	0,9788	0,7181	0,3264
8	5,9428	3,5649	2,7842	1,4498	1,0636	0,4834
10	10,9880	6,5914	5,1480	2,6806	1,9666	0,8939
12	16,5125	9,9054	7,7363	4,0283	2,9554	1,3433
15	25,6497	15,3865	12,0171	6,2573	4,5907	2,0866
20	42,9949	25,7915	20,1435	10,4888	7,6951	3,4976
25	61,8499	37,1021	28,9773	15,0885	11,0698	5,0315
30	80,6769	48,3959	37,7979	19,6814	14,4394	6,5631
35	97,4323	58,4470	45,6480	23,7690	17,4382	7,9261
38	107,0354	64,2076	50,1471	26,1117	19,1570	8,7073
40	112,1515	67,2767	52,5441	27,3598	20,0727	9,1235
45	124,2941	74,5606	58,2330	30,3220	22,2459	10,1113
50	135,1872	81,0951	63,3365	32,9795	24,1956	10,9975
60	150,3674	90,2013	70,4486	36,6827	26,9125	12,2324

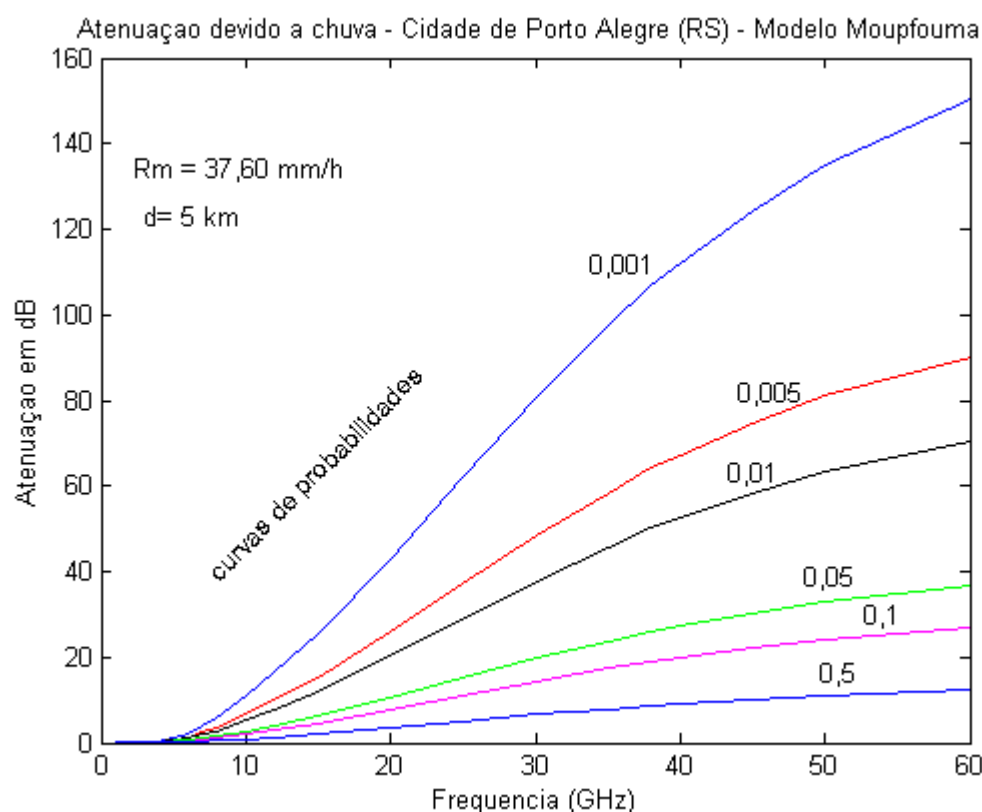


Figura 6.14 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação Porto Alegre (RS)

Tabela 6.15 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0129	0,0077	0,0060	0,0031	0,0023	0,0010
2	0,0620	0,0372	0,0290	0,0151	0,0111	0,0050
4	0,4749	0,2849	0,2225	0,1159	0,0850	0,0386
6	2,5892	1,5532	1,2131	0,6316	0,4634	0,2106
7	4,8755	2,9247	2,2842	1,1894	0,8726	0,3966
8	7,2163	4,3288	3,3809	1,7604	1,2916	0,5870
10	13,2437	7,9445	6,2048	3,2308	2,3703	1,0774
12	19,7318	11,8365	9,2445	4,8136	3,5316	1,6052
15	30,3697	18,2180	14,2285	7,4088	5,4355	2,4706
20	50,4999	30,2935	23,6597	12,3197	9,0384	4,1082
25	72,2445	43,3375	33,8473	17,6243	12,9302	5,8771
30	93,6871	56,2004	43,8934	22,8554	16,7680	7,6214
35	112,4533	67,4576	52,6855	27,4334	20,1267	9,1481
38	123,1050	73,8473	57,6759	30,0319	22,0331	10,0146
40	128,6884	77,1967	60,2918	31,3941	23,0324	10,4688
45	141,8742	85,1065	66,4695	34,6108	25,3924	11,5414
50	153,6340	92,1608	71,9790	37,4796	27,4971	12,4981
60	169,7175	101,8089	79,5143	41,4033	30,3757	13,8065

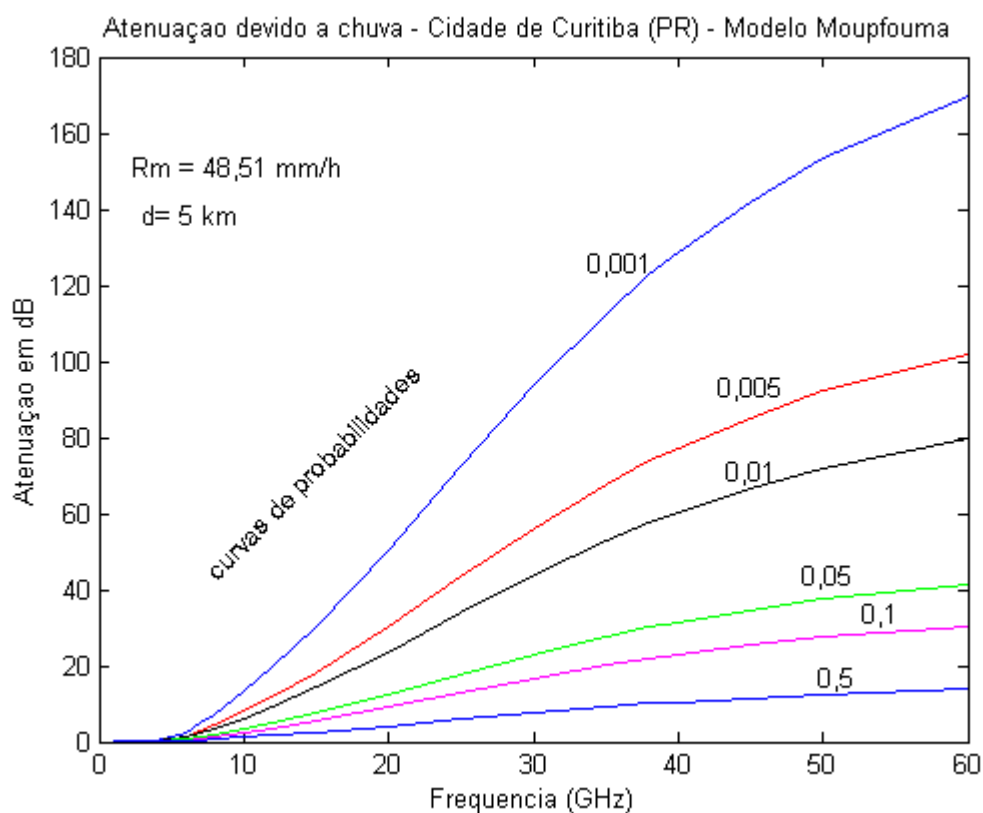


Figura 6.15– Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR)

Tabela 6.16 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0132	0,0079	0,0062	0,0032	0,0024	0,0011
2	0,0638	0,0383	0,0299	0,0156	0,0114	0,0052
4	0,4913	0,2947	0,2302	0,1198	0,0879	0,0400
6	2,6934	1,6157	1,2619	0,6571	0,4821	0,2191
7	5,0754	3,0446	2,3779	1,2382	0,9084	0,4129
8	7,5110	4,5057	3,5190	1,8323	1,3443	0,6110
10	13,7635	8,2563	6,4483	3,3577	2,4634	1,1197
12	20,4699	12,2793	9,5903	4,9937	3,6637	1,6652
15	31,4461	18,8636	14,7328	7,6714	5,6282	2,5581
20	52,2032	31,3153	24,4577	12,7352	9,3432	4,2467
25	74,5959	44,7480	34,9489	18,1980	13,3510	6,0684
30	96,6200	57,9597	45,2674	23,5708	17,2929	7,8600
35	115,8271	69,4815	54,2661	28,2565	20,7305	9,4225
38	126,7068	76,0080	59,3634	30,9106	22,6778	10,3076
40	132,3899	79,4171	62,0260	32,2970	23,6949	10,7699
45	145,7969	87,4596	68,3073	35,5677	26,0945	11,8606
50	157,7393	94,6235	73,9024	38,4811	28,2319	12,8321
60	174,0064	104,3817	81,5237	42,4495	31,1433	14,1554

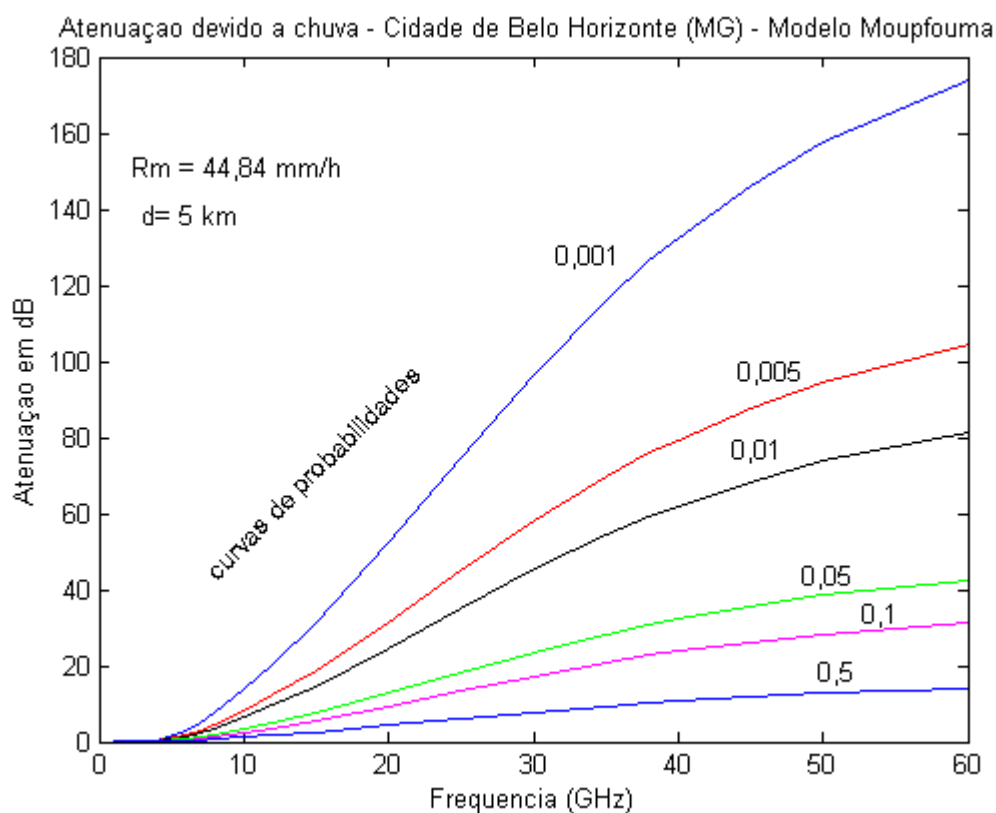


Figura 6.16 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG)

Tabela 6.17 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0135	0,0081	0,0063	0,0033	0,0024	0,0011
2	0,0655	0,0393	0,0307	0,0160	0,0117	0,0053
4	0,5064	0,3038	0,2373	0,1235	0,0906	0,0412
6	2,7907	1,6740	1,3075	0,6808	0,4995	0,2270
7	5,2621	3,1566	2,4653	1,2837	0,9418	0,4281
8	7,7863	4,6708	3,6479	1,8995	1,3936	0,6334
10	14,2482	8,5471	6,6754	3,4759	2,5501	1,1591
12	21,1570	12,6915	9,9122	5,1613	3,7866	1,7211
15	32,4463	19,4636	15,2014	7,9154	5,8072	2,6395
20	53,7835	32,2633	25,1981	13,1207	9,6261	4,3753
25	76,7750	46,0553	35,9699	18,7296	13,7411	6,2456
30	99,3350	59,5884	46,5394	24,2332	17,7788	8,0809
35	118,9466	71,3528	55,7276	29,0175	21,2888	9,6763
38	130,0348	78,0044	60,9226	31,7225	23,2734	10,5783
40	135,8084	81,4677	63,6276	33,1310	24,3067	11,0480
45	149,4159	89,6305	70,0028	36,4506	26,7422	12,1550
50	161,5236	96,8936	75,6754	39,4043	28,9092	13,1399
60	177,9545	106,7500	83,3734	43,4127	31,8500	14,4766

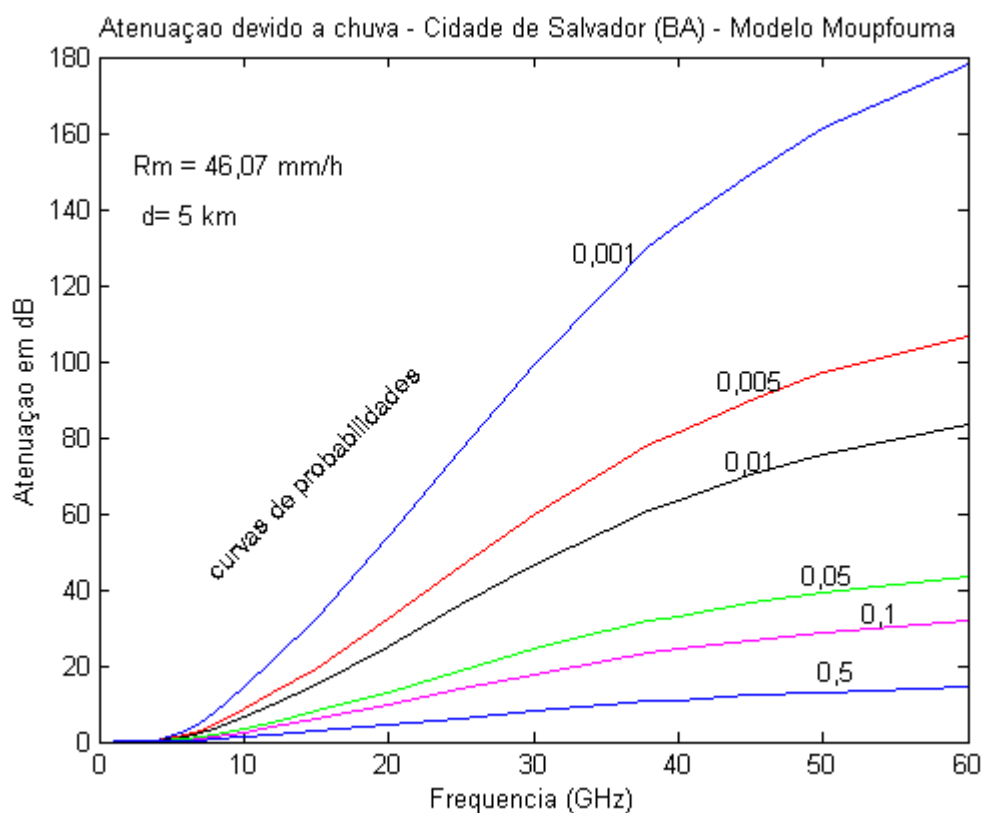


Figura 6.17 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA)

Tabela 6.18 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0120	0,0072	0,0056	0,0029	0,0021	0,0010
2	0,0574	0,0344	0,0269	0,0140	0,0103	0,0047
4	0,4345	0,2606	0,2036	0,1060	0,0778	0,0353
6	2,3339	1,4001	1,0935	0,5694	0,4177	0,1899
7	4,3865	2,6313	2,0551	1,0701	0,7851	0,3568
8	6,4951	3,8962	3,0430	1,5845	1,1625	0,5284
10	11,9684	7,1795	5,6073	2,9197	2,1421	0,9736
12	17,9152	10,7468	8,3934	4,3705	3,2064	1,4574
15	27,7116	16,6234	12,9832	6,7604	4,9598	2,2543
20	46,2809	27,7626	21,6831	11,2904	8,2833	3,7649
25	66,4082	39,8365	31,1129	16,2005	11,8856	5,4023
30	86,3916	51,8240	40,4753	21,0756	15,4622	7,0279
35	104,0416	62,4117	48,7445	25,3814	18,6212	8,4638
38	114,1131	68,4533	53,4631	27,8383	20,4237	9,2831
40	119,4399	71,6487	55,9588	29,1378	21,3771	9,7164
45	132,0536	79,2154	61,8684	32,2150	23,6347	10,7425
50	143,3393	85,9853	67,1559	34,9682	25,6546	11,6606
60	158,9352	95,3409	74,4627	38,7729	28,4459	12,9294

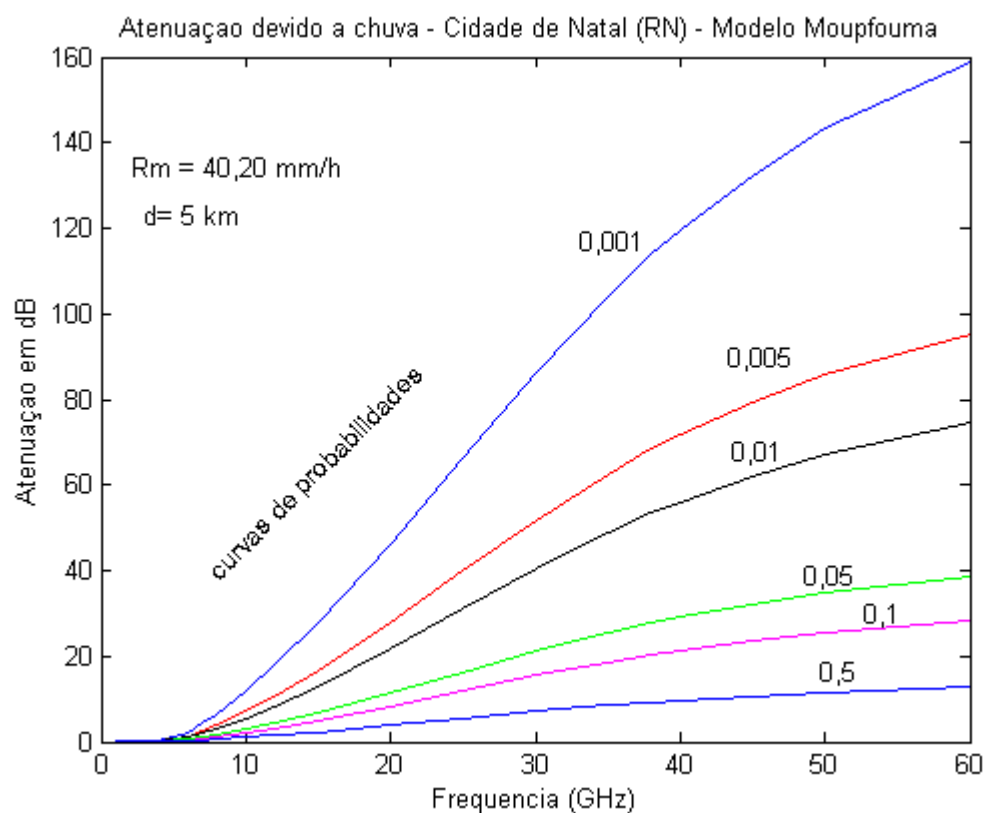


Figura 6.18 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN)

Tabela 6.19 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0156	0,0093	0,0073	0,0038	0,0028	0,0013
2	0,0758	0,0455	0,0355	0,0185	0,0136	0,0062
4	0,6004	0,3601	0,2813	0,1465	0,1075	0,0488
6	3,4032	2,0415	1,5944	0,8302	0,6091	0,2769
7	6,4405	3,8635	3,0174	1,5712	1,1527	0,5239
8	9,5228	5,7125	4,4615	2,3231	1,7044	0,7747
10	17,2919	10,3729	8,1014	4,2184	3,0949	1,4067
12	25,4481	15,2656	11,9227	6,2082	4,5547	2,0702
15	38,6568	23,1891	18,1111	9,4305	6,9187	3,1447
20	63,5468	38,1200	29,7723	15,5025	11,3735	5,1695
25	90,1917	54,1036	42,2557	22,0026	16,1423	7,3371
30	115,9896	69,5790	54,3423	28,2961	20,7596	9,4357
35	138,0090	82,7878	64,6586	33,6678	24,7006	11,2270
38	150,3271	90,1772	70,4298	36,6729	26,9053	12,2291
40	156,6218	93,9532	73,3789	38,2085	28,0319	12,7412
45	171,3783	102,8052	80,2924	41,8084	30,6730	13,9416
50	184,4262	110,6323	86,4055	44,9915	33,0083	15,0030
60	201,7463	121,0221	94,5201	49,2168	36,1082	16,4120

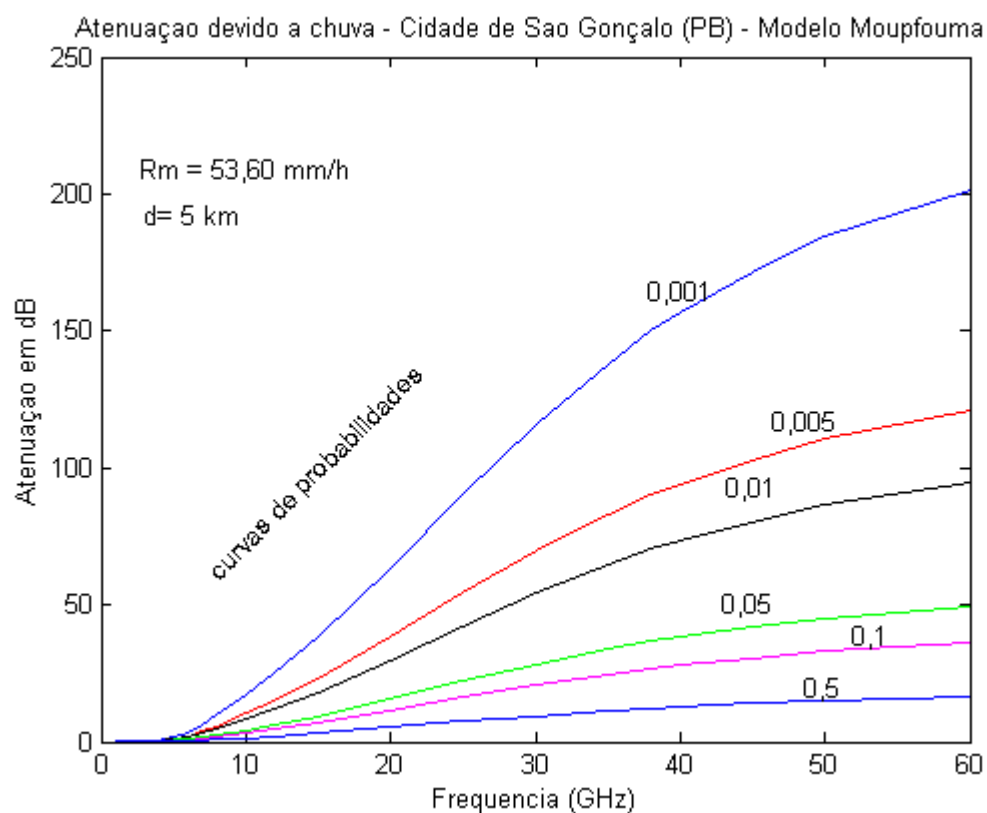


Figura 6.19 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB)

Tabela 6.20 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo Moupfouma – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0125	0,0075	0,0059	0,0031	0,0022	0,0010
2	0,0603	0,0362	0,0283	0,0147	0,0108	0,0049
4	0,4601	0,2760	0,2156	0,1122	0,0823	0,0374
6	2,4952	1,4968	1,1690	0,6087	0,4466	0,2030
7	4,6954	2,8166	2,1998	1,1454	0,8404	0,3820
8	6,9507	4,1695	3,2564	1,6956	1,2440	0,5654
10	12,7746	7,6631	5,9850	3,1164	2,2864	1,0392
12	19,0645	11,4363	8,9319	4,6509	3,4121	1,5509
15	29,3949	17,6332	13,7718	7,1710	5,2610	2,3913
20	48,9548	29,3666	22,9358	11,9427	8,7618	3,9825
25	70,1091	42,0566	32,8468	17,1034	12,5480	5,7034
30	91,0205	54,6007	42,6440	22,2048	16,2907	7,4045
35	109,3819	65,6152	51,2465	26,6842	19,5770	8,8982
38	119,8238	71,8790	56,1386	29,2315	21,4458	9,7476
40	125,3149	75,1730	58,7113	30,5711	22,4286	10,1943
45	138,2953	82,9596	64,7927	33,7377	24,7518	11,2503
50	149,8851	89,9120	70,2227	36,5651	26,8262	12,1931
60	165,7957	99,4563	77,6769	40,4465	29,6738	13,4875

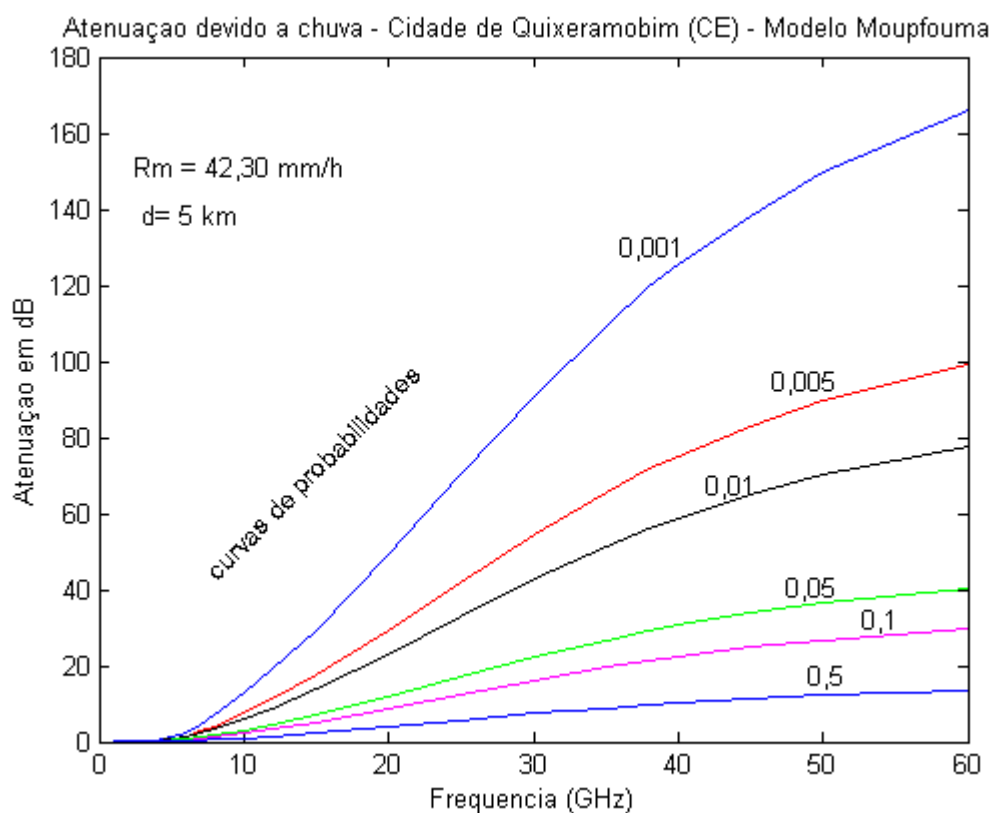


Figura 6.20 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Moupfouma, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE)

6.4 Cálculo pelo modelo Crane para enlace terrestre

Tabela 6.21 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Rio Branco (AC) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0068	0,0065	0,0061	0,0059	0,0057	0,0055
2	0,0329	0,0314	0,0297	0,0286	0,0273	0,0268
4	0,2508	0,2402	0,2271	0,2189	0,2094	0,2057
6	1,3615	1,3061	1,2377	1,1948	1,1448	1,1252
7	2,5622	2,4587	2,3305	2,2501	2,1565	2,1197
8	3,7929	3,6394	3,4495	3,3303	3,1916	3,1371
10	6,9690	6,6836	6,3309	6,1099	5,8530	5,7522
12	10,3976	9,9658	9,4331	9,0999	8,7131	8,5614
15	16,0279	15,3523	14,5205	14,0010	13,3988	13,1629
20	26,6889	25,5491	24,1483	23,2748	22,2634	21,8675
25	38,2183	36,5714	34,5499	33,2906	31,8337	31,2638
30	49,6141	47,4559	44,8102	43,1638	41,2607	40,5167
35	59,6195	57,0005	53,7939	51,8008	49,4991	48,5998
38	65,3097	62,4245	58,8947	56,7022	54,1715	53,1831
40	68,3020	65,2733	61,5699	59,2704	56,6173	55,5813
45	75,3764	72,0058	67,8889	65,3352	62,3911	61,2422
50	81,6940	78,0153	73,5262	70,7440	67,5384	66,2881
60	90,3693	86,2552	81,2423	78,1393	74,5678	73,1759

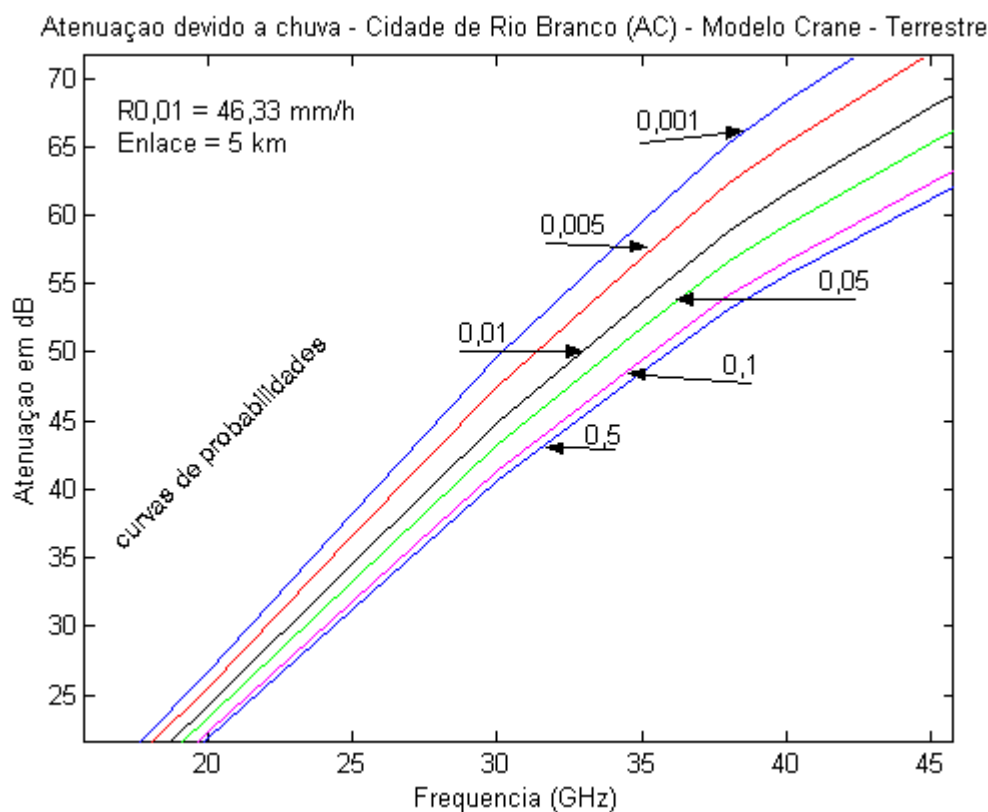


Figura 6.21 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para Rio Branco (AC)

Tabela 6.22-Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Velho (RO) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0073	0,0070	0,0067	0,0064	0,0061	0,0060
2	0,0354	0,0340	0,0322	0,0311	0,0298	0,0292
4	0,2731	0,2627	0,2498	0,2414	0,2313	0,2273
6	1,5040	1,4495	1,3811	1,3367	1,2826	1,2613
7	2,8358	2,7337	2,6055	2,5221	2,4205	2,3806
8	4,1961	4,0448	3,8550	3,7314	3,5810	3,5219
10	7,6792	7,3987	7,0473	6,8188	6,5412	6,4321
12	11,4045	10,9817	10,4528	10,1096	9,6929	9,5294
15	17,4937	16,8348	16,0120	15,4790	14,8329	14,5795
20	29,0047	27,8971	26,5163	25,6230	24,5414	24,1178
25	41,4117	39,8151	37,8271	36,5423	34,9879	34,3794
30	53,5924	51,5055	48,9100	47,2343	45,2088	44,4165
35	64,1899	61,6641	58,5266	56,5032	54,0597	53,1045
38	70,1851	67,4070	63,9583	61,7357	59,0530	58,0048
40	73,3097	70,3962	66,7815	64,4528	61,6430	60,5454
45	80,6768	77,4419	73,4325	70,8520	67,7408	66,5263
50	87,2352	83,7113	79,3476	76,5412	73,1601	71,8407
60	96,1479	92,2188	87,3599	84,2389	80,4826	79,0180

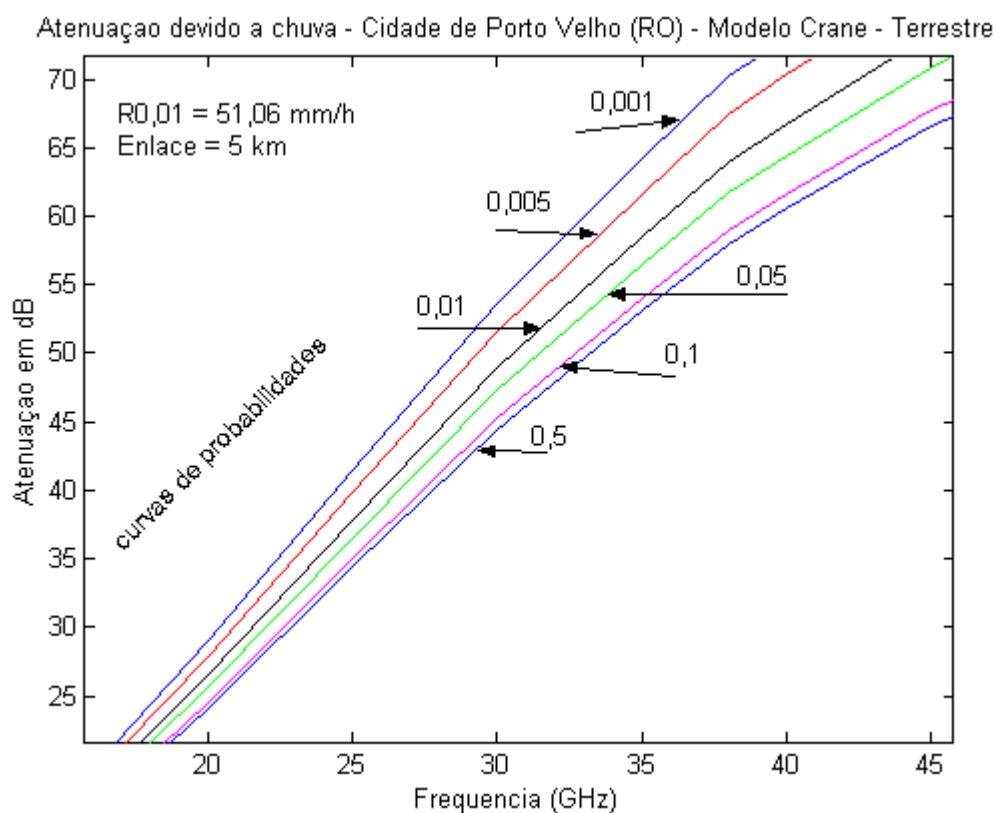


Figura 6.22 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Velho (RO)

Tabela 6.23 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Cuiabá (MT) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq, (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0067	0,0064	0,0059	0,0056	0,0053	0,0051
2	0,0322	0,0306	0,0286	0,0272	0,0254	0,0247
4	0,2439	0,2322	0,2176	0,2070	0,1942	0,1884
6	1,3127	1,2522	1,1768	1,1214	1,0545	1,0239
7	2,4679	2,3548	2,2138	2,1100	1,9846	1,9272
8	3,6541	3,4864	3,2773	3,1235	2,9378	2,8527
10	6,7293	6,4167	6,0278	5,7421	5,3976	5,2400
12	10,0665	9,5923	9,0036	8,5720	8,0525	7,8151
15	15,5612	14,8173	13,8958	13,2215	12,4115	12,0419
20	25,9754	24,7176	23,1625	22,0266	20,6643	20,0435
25	37,2597	35,4395	33,1919	31,5523	29,5881	28,6937
30	48,4561	46,0668	43,1206	40,9742	38,4058	37,2375
35	58,3372	55,4325	51,8561	49,2541	46,1444	44,7313
38	63,9735	60,7703	56,8298	53,9653	50,5441	48,9902
40	66,9524	63,5876	59,4507	56,4449	52,8567	51,2276
45	74,0057	70,2554	65,6503	62,3082	58,3230	56,5150
50	80,3158	76,2174	71,1903	67,5456	63,2031	61,2345
60	89,0313	84,4387	78,8147	74,7436	69,8998	67,7063

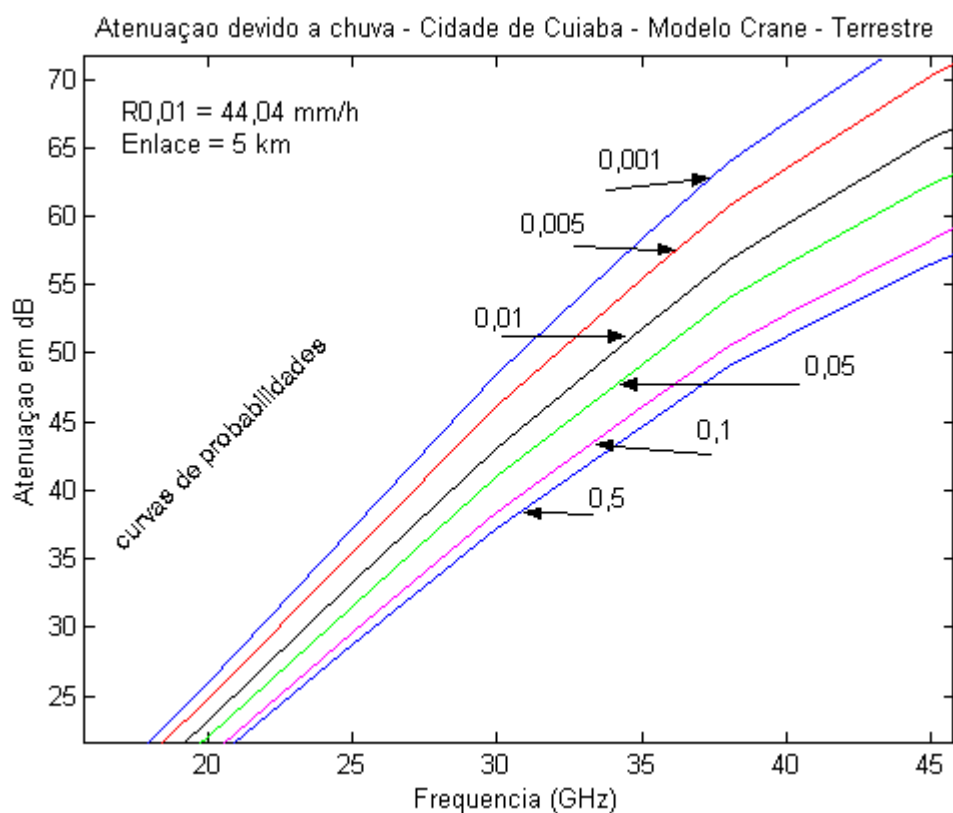


Figura 6.23 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Cuiabá (MT)

Tabela 6.24 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Porto Alegre (RS) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0049	0,0047	0,0043	0,0042	0,0040	0,0037
2	0,0234	0,0222	0,0207	0,0200	0,0191	0,0178
4	0,1717	0,1629	0,1522	0,1470	0,1405	0,1314
6	0,8892	0,8451	0,7909	0,7644	0,7314	0,6852
7	1,6634	1,5813	1,4802	1,4308	1,3692	1,2829
8	2,4654	2,3436	2,1936	2,1204	2,0291	1,9011
10	4,5883	4,3598	4,0787	3,9417	3,7709	3,5318
12	6,9476	6,5983	6,1693	5,9605	5,7004	5,3367
15	10,8799	10,3273	9,6498	9,3206	8,9108	8,3386
20	18,3671	17,4260	16,2739	15,7147	15,0193	14,0493
25	26,5520	25,1832	23,5092	22,6974	21,6884	20,2822
30	34,8143	33,0079	30,8014	29,7323	28,4044	26,5551
35	42,2745	40,0662	37,3719	36,0677	34,4488	32,1963
38	46,5862	44,1434	41,1648	39,7238	37,9357	35,4491
40	48,9146	46,3432	43,2091	41,6934	39,8131	37,1992
45	54,4653	51,5855	48,0792	46,3848	44,2841	41,3658
50	59,4709	56,3114	52,4676	50,6114	48,3112	45,1177
60	66,5562	62,9937	58,6654	56,5774	53,9917	50,4055

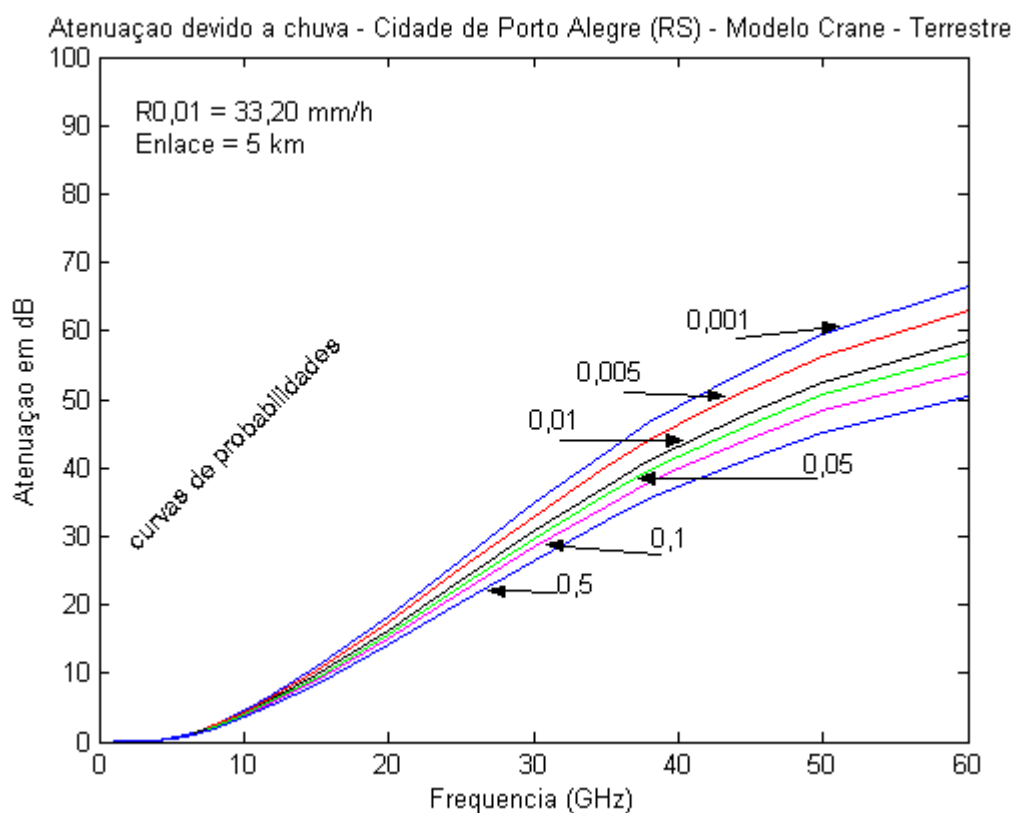


Figura 6.24 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Porto Alegre (RS)

Tabela 6.25 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Curitiba (PR) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0050	0,0047	0,0043	0,0040	0,0037	0,0034
2	0,0239	0,0224	0,0204	0,0192	0,0177	0,0165
4	0,1787	0,1673	0,1532	0,1441	0,1329	0,1240
6	0,9464	0,8877	0,8146	0,7670	0,7086	0,6616
7	1,7754	1,6658	1,5290	1,4398	1,3305	1,2424
8	2,6299	2,4674	2,2647	2,1324	1,9705	1,8399
10	4,8649	4,5620	4,1848	3,9390	3,6384	3,3964
12	7,3153	6,8557	6,2845	5,9129	5,4592	5,0944
15	11,3705	10,6494	9,7549	9,1741	8,4660	7,8975
20	19,0708	17,8513	16,3413	15,3624	14,1705	13,2149
25	27,4455	25,6804	23,4975	22,0840	20,3646	18,9872
30	35,8157	33,4985	30,6364	28,7853	26,5358	24,7355
35	43,2746	40,4571	36,9820	34,7370	32,0118	29,8329
38	47,5530	44,4458	40,6163	38,1442	35,1450	32,7483
40	49,8352	46,5710	42,5503	39,9559	36,8095	34,2963
45	55,2541	51,6155	47,1387	44,2532	40,7567	37,9662
50	60,1179	56,1413	51,2534	48,1056	44,2941	41,2544
60	66,9066	62,4497	56,9801	53,4623	49,2080	45,8187

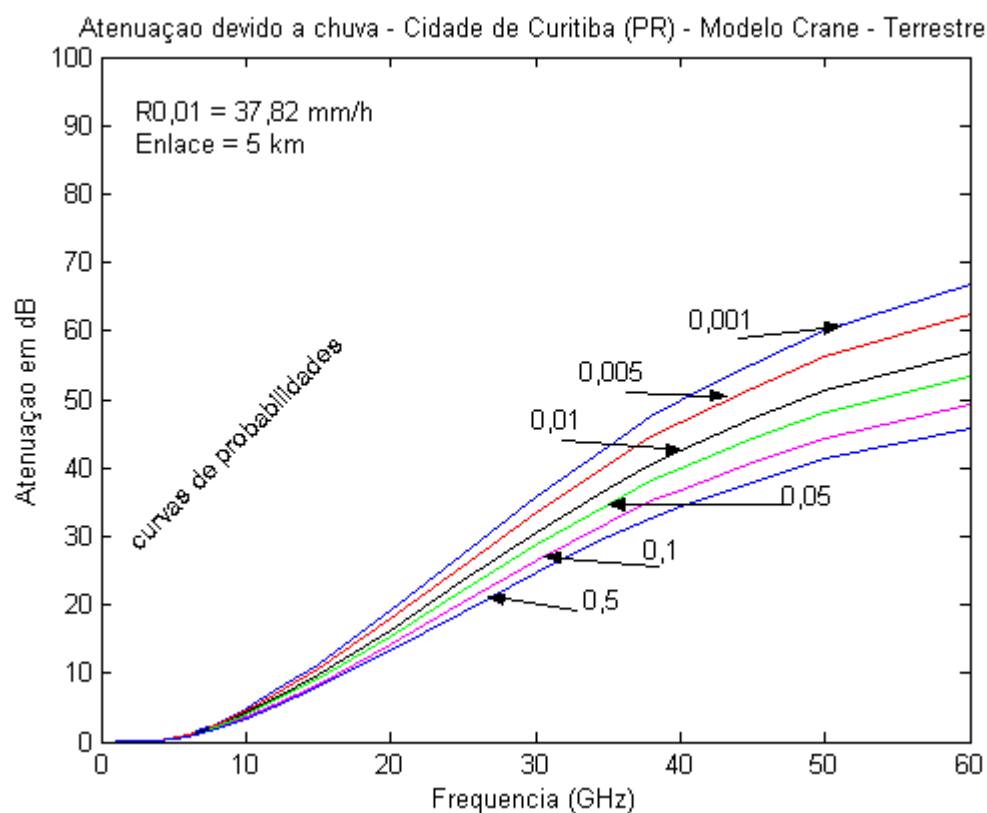


Figura 6.25 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Curitiba (PR)

Tabela 6.26 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Belo Horizonte (MG) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0055	0,0051	0,0047	0,0043	0,0039	0,0037
2	0,0262	0,0245	0,0223	0,0207	0,0186	0,0176
4	0,1963	0,1838	0,1679	0,1558	0,1404	0,1331
6	1,0412	0,9773	0,8951	0,8319	0,7511	0,7131
7	1,9537	1,8343	1,6806	1,5623	1,4110	1,3397
8	2,8938	2,7168	2,4890	2,3136	2,0894	1,9839
10	5,3504	5,0203	4,5962	4,2701	3,8541	3,6585
12	8,0408	7,5395	6,8968	6,4038	5,7761	5,4814
15	12,4907	11,7033	10,6963	9,9255	8,9462	8,4871
20	20,9388	19,6061	17,9052	16,6058	14,9579	14,1865
25	30,1232	28,1932	25,7334	23,8567	21,4799	20,3684
30	39,2956	36,7602	33,5338	31,0757	27,9667	26,5144
35	47,4610	44,3764	40,4571	37,4755	33,7098	31,9527
38	52,1419	48,7389	44,4189	41,1353	36,9915	35,0592
40	54,6365	51,0607	46,5241	43,0779	38,7312	36,7051
45	60,5579	56,5697	51,5168	47,6833	42,8538	40,6048
50	65,8711	61,5104	55,9917	51,8092	46,5454	44,0962
60	73,2791	68,3884	62,2097	57,5349	51,6608	48,9310

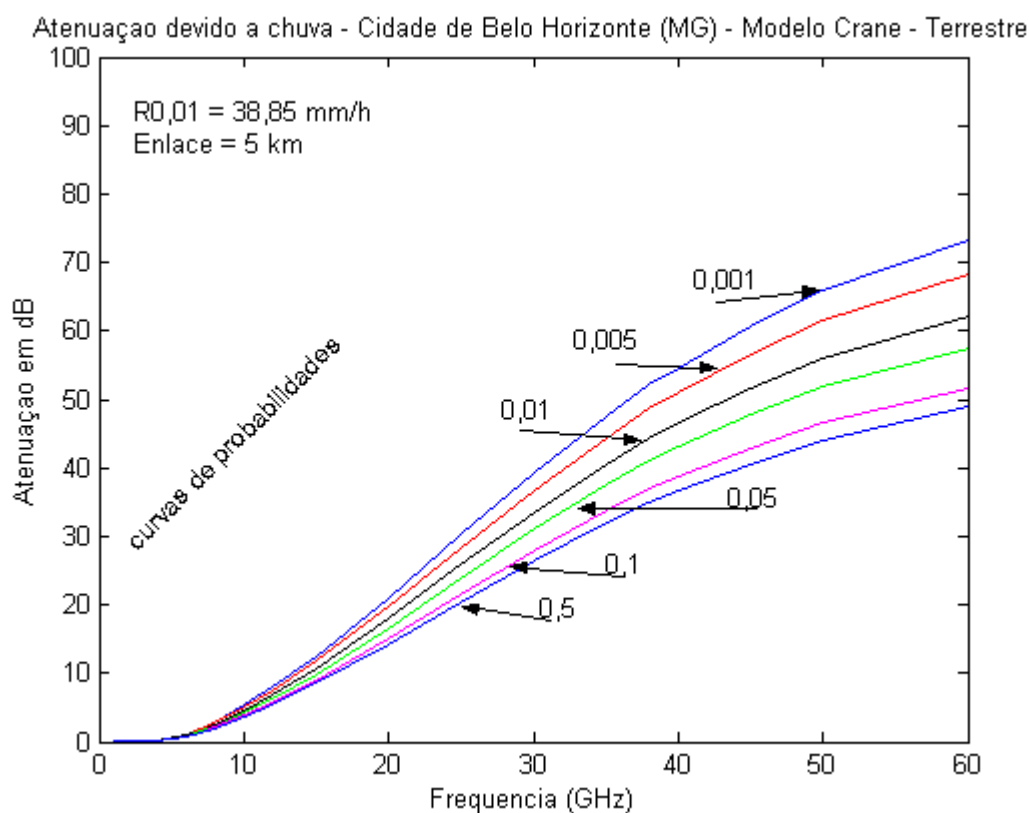


Figura 6.26 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Belo Horizonte (MG)

Tabela 6.27 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Salvador (BA) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0063	0,0060	0,0056	0,0054	0,0051	0,0049
2	0,0300	0,0286	0,0269	0,0257	0,0243	0,0237
4	0,2245	0,2143	0,2018	0,1933	0,1830	0,1787
6	1,1900	1,1378	1,0741	1,0306	0,9773	0,9551
7	2,2327	2,1354	2,0165	1,9351	1,8354	1,7938
8	3,3071	3,1629	2,9865	2,8659	2,7181	2,6565
10	6,1160	5,8461	5,5167	5,2918	5,0165	4,9019
12	9,1936	8,7825	8,2817	7,9402	7,5230	7,3495
15	14,2857	13,6378	12,8502	12,3140	11,6601	11,3885
20	23,9542	22,8544	21,5197	20,6127	19,5077	19,0494
25	34,4678	32,8718	30,9374	29,6242	28,0260	27,3635
30	44,9725	42,8715	40,3283	38,6037	36,5070	35,6385
35	54,3299	51,7680	48,6710	46,5734	44,0259	42,9716
38	59,6962	56,8663	53,4479	51,1342	48,3259	47,1641
40	62,5578	59,5817	55,9886	53,5577	50,6085	49,3888
45	69,3522	66,0265	62,0160	59,3055	56,0199	54,6621
50	75,4505	71,8082	67,4203	64,4573	60,8684	59,3860
60	83,9598	79,8647	74,9385	71,6166	67,5975	65,9390

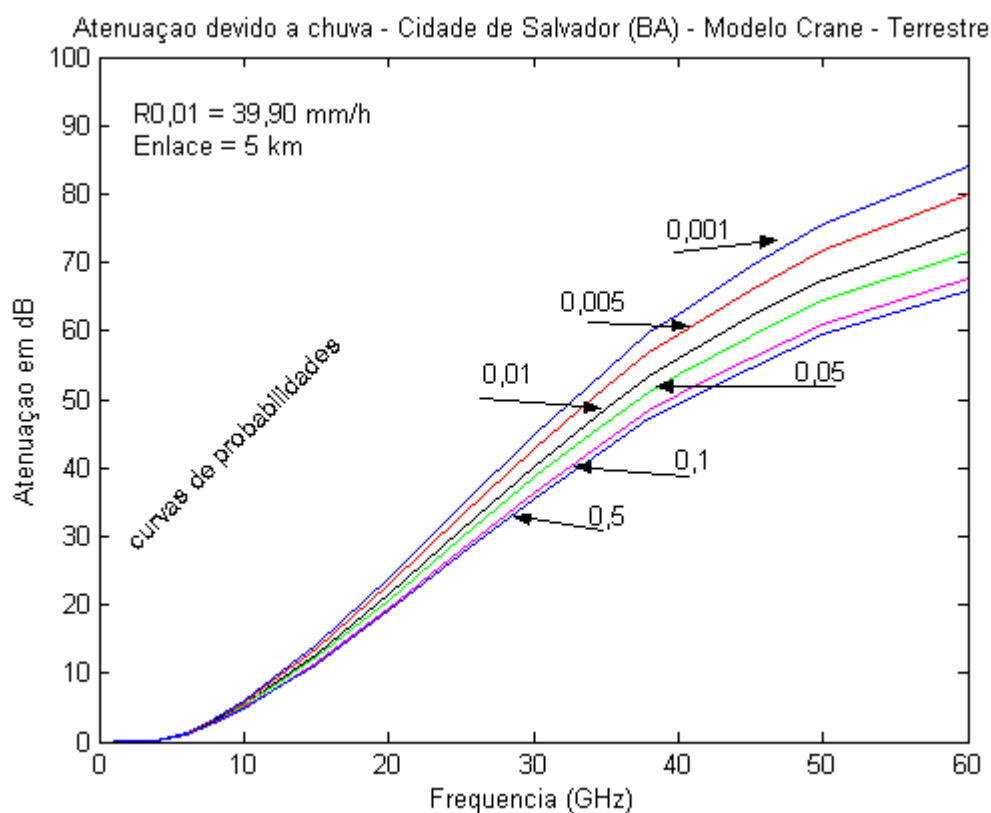


Figura 6.27 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Salvador (BA)

Tabela 6.28 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Natal (RN) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0055	0,0053	0,0051	0,0049	0,0047	0,0046
2	0,0261	0,0253	0,0242	0,0234	0,0224	0,0221
4	0,1928	0,1867	0,1792	0,1731	0,1661	0,1637
6	1,0053	0,9749	0,9366	0,9061	0,8704	0,8583
7	1,8822	1,8256	1,7543	1,6973	1,6307	1,6081
8	2,7892	2,7052	2,5994	2,5150	2,4161	2,3826
10	5,1812	5,0237	4,8254	4,6673	4,4824	4,4197
12	7,8287	7,5879	7,2852	7,0441	6,7624	6,6670
15	12,2318	11,8509	11,3727	10,9923	10,5484	10,3981
20	20,6087	19,9601	19,1465	18,5001	17,7465	17,4917
25	29,7519	28,8086	27,6264	26,6877	25,5940	25,2244
30	38,9543	37,7096	36,1508	34,9142	33,4744	32,9881
35	47,2309	45,7094	43,8056	42,2965	40,5408	39,9481
38	52,0038	50,3208	48,2158	46,5481	44,6086	43,9541
40	54,5720	52,8004	50,5854	48,8310	46,7913	46,1031
45	60,6872	58,7034	56,2248	54,2630	51,9837	51,2150
50	66,1944	64,0181	61,3005	59,1507	56,6544	55,8129
60	73,9582	71,5046	68,4435	66,0243	63,2175	62,2719

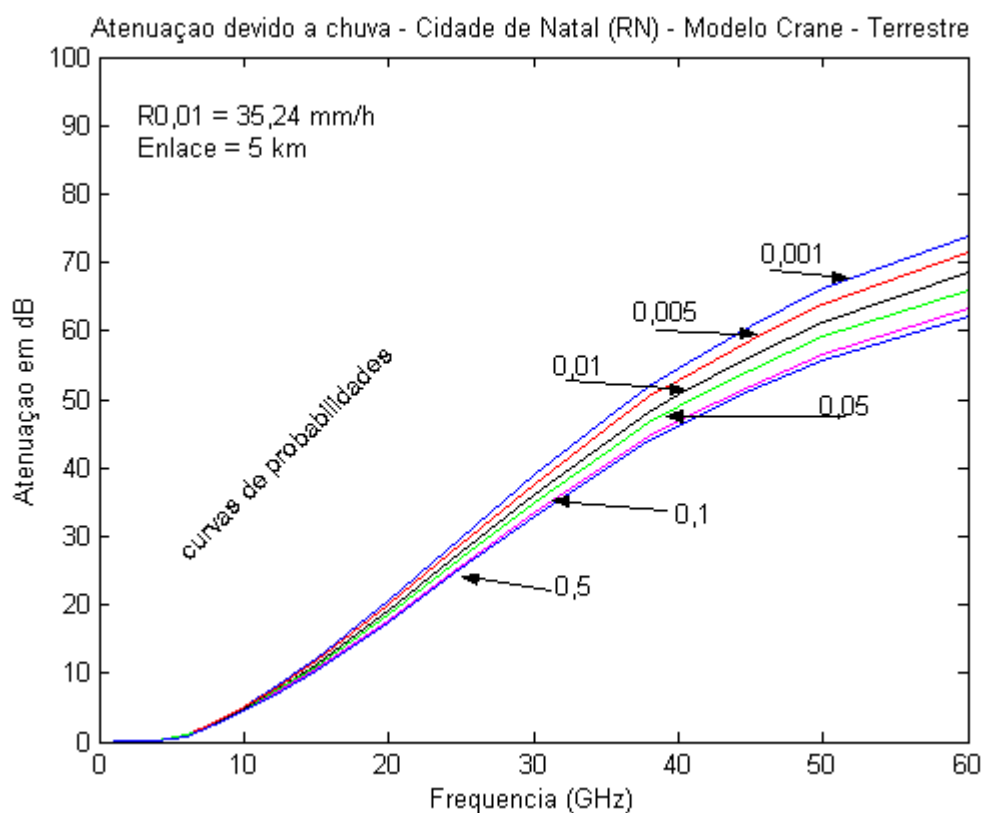


Figura 6.28 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Natal (RN)

Tabela 6.29 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de São Gonçalo (PB) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0065	0,0063	0,0060	0,0058	0,0055	0,0054
2	0,0313	0,0302	0,0288	0,0278	0,0266	0,0261
4	0,2385	0,2304	0,2201	0,2126	0,2036	0,2002
6	1,2932	1,2512	1,1971	1,1581	1,1103	1,0928
7	2,4335	2,3550	2,2536	2,1804	2,0910	2,0581
8	3,6024	3,4860	3,3357	3,2274	3,0948	3,0461
10	6,6208	6,4043	6,1254	5,9244	5,6788	5,5887
12	9,8811	9,5537	9,1324	8,8293	8,4594	8,3238
15	15,2364	14,7245	14,0667	13,5941	13,0180	12,8070
20	25,3776	24,5145	23,4068	22,6119	21,6443	21,2901
25	36,3471	35,1004	33,5019	32,3559	30,9617	30,4518
30	47,1938	45,5606	43,4686	41,9701	40,1487	39,4828
35	56,7220	54,7408	52,2056	50,3912	48,1878	47,3828
38	62,1424	59,9603	57,1696	55,1736	52,7507	51,8658
40	64,9943	62,7040	59,7760	57,6826	55,1423	54,2147
45	71,7375	69,1894	65,9348	63,6097	60,7902	59,7614
50	77,7602	74,9800	71,4313	68,8978	65,8276	64,7078
60	86,0352	82,9272	78,9646	76,1387	72,7173	71,4702

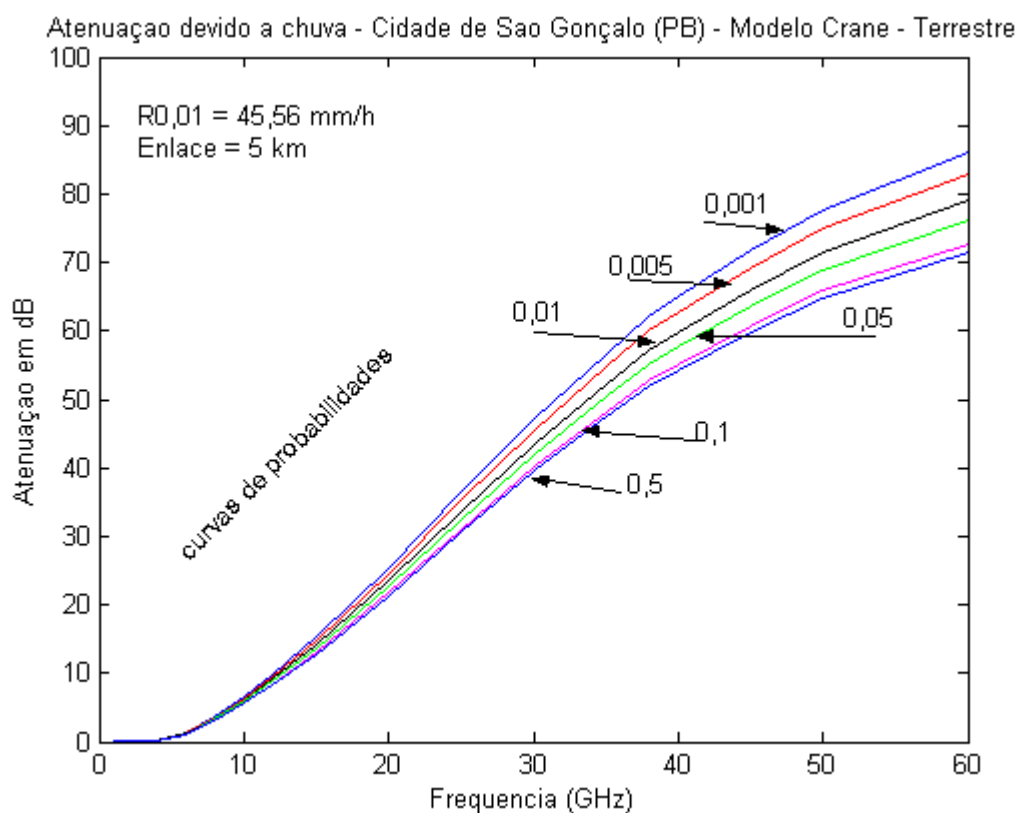


Figura 6.29 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em São Gonçalo (PB)

Tabela 6.30 -Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva da cidade de Quixeramobim (CE) – modelo Crane terrestre – 5 km

Freq. (GHz)	Atenuação em dB em função das probabilidades					
	p = 0,001	p = 0,005	p = 0,01	p = 0,05	p = 0,1	p = 0,5
1	0,0055	0,0053	0,0051	0,0049	0,0047	0,0047
2	0,0263	0,0255	0,0245	0,0236	0,0226	0,0222
4	0,1955	0,1895	0,1821	0,1758	0,1684	0,1659
6	1,0275	0,9968	0,9593	0,9270	0,8891	0,8763
7	1,9258	1,8684	1,7984	1,7381	1,6674	1,6435
8	2,8532	2,7681	2,6643	2,5749	2,4701	2,4346
10	5,2889	5,1297	4,9355	4,7684	4,5729	4,5066
12	7,9718	7,7290	7,4333	7,1792	6,8821	6,7815
15	12,4227	12,0399	11,5740	11,1741	10,7072	10,5492
20	20,8824	20,2320	19,4415	18,7636	17,9728	17,7054
25	30,0994	29,1552	28,0083	27,0253	25,8797	25,4925
30	39,3435	38,0998	36,5904	35,2977	33,7922	33,2836
35	47,6194	46,1020	44,2618	42,6872	40,8547	40,2360
38	52,3791	50,7024	48,6699	46,9316	44,9094	44,2269
40	54,9292	53,1655	51,0283	49,2008	47,0757	46,3586
45	60,9928	59,0210	56,6332	54,5929	52,2218	51,4220
50	66,4444	64,2842	61,6696	59,4368	56,8435	55,9690
60	74,0921	71,6617	68,7227	66,2152	63,3052	62,3247

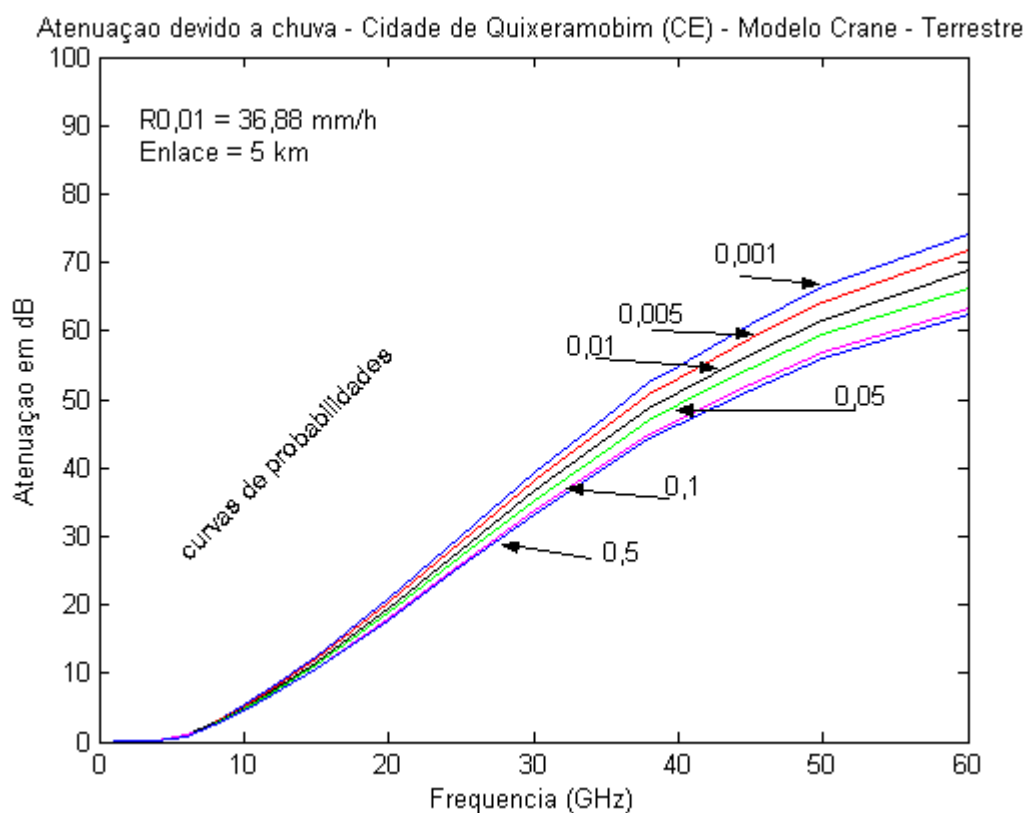


Figura 6.30 – Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal, pelo modelo Crane terrestre, para vários índices de probabilidades de ocorrência da precipitação em Quixeramobim (CE)

6.5 Comparação entre as atenuações calculadas pelos modelos ITU-R, Moupfouma e Crane (terrestre) para a mesma probabilidade

Com os resultados obtidos nas seções 6.2, 6.3 e 6.4 pode-se montar tabelas comparativas das atenuações para todas as cidades, considerando os diversos modelos estudados.

Neste procedimento, tomar-se-á para representar toda a área estudada as cidades de Cuiabá, Belo Horizonte e Quixeramobim.

Vale resaltar que a intensidade de chuva (mm/h) do modelo Moupfouma é encontrada de acordo com a seção 3.4.

Tabela 6.31 - Atenuação em dB para as taxas de chuvas medidas e as sugeridas para os modelos em Cuiabá (MT) - polarização da onda horizontal

Freq. GHz	Cidade de Cuiabá – probabilidade 0,01%					
	Crane		ITU-R		Moupfouma	
	Chuva regional 44,04 mm/h	Chuva sugerida 67 mm/h	Chuva regional 44,04 mm/h	Chuva sugerida 95 mm/h	Chuva regional 51,60 mm/h	Chuva sugerida 95 mm/h
1	0,0059	0,0081	0,0061	0,0123	0,0070	0,0155
2	0,0286	0,0395	0,0294	0,0617	0,0342	0,0786
4	0,2176	0,3172	0,2255	0,5349	0,2695	0,7087
6	1,1768	1,8281	1,2323	3,3745	1,5170	4,6859
7	2,2138	3,4672	2,3212	6,4744	2,8682	9,0449
8	3,2773	5,1241	3,4354	9,5456	4,2417	13,3186
10	6,0278	9,2617	6,3010	16,8347	7,7171	23,1903
12	9,0036	13,5584	9,3813	23,9527	11,3826	32,5112
15	13,8958	20,4811	14,4281	35,0967	17,3321	46,8904
20	23,1625	33,5062	23,9757	55,9069	28,5515	73,6705
25	33,1919	47,3982	34,2836	77,6415	40,5815	101,3406
30	43,1206	60,7455	44,4377	97,5899	52,2686	126,1068
35	51,8561	72,0176	53,3119	113,3587	62,2906	144,9487
38	56,8298	78,2854	58,3449	121,7923	67,9123	154,7982
40	59,4507	81,4528	60,9794	125,7355	70,7991	159,1702

Tabela 6.32 - Atenuação em dB para as taxas de chuvas medidas e as sugeridas para os modelos em Belo Horizonte (MG) - polarização da onda horizontal

Freq. GHz	Cidade de Belo Horizonte – probabilidade 0,01%					
	Crane		ITU-R		Moupfouma	
	Chuva Regional 38,85 mm/h	Chuva sugerida 67 mm/h	Chuva Regional 38,85 mm/h	Chuva sugerida 95 mm/h	Chuva Regional 44,84 mm/h	Chuva sugerida 95 mm/h
1	0,0047	0,0070	0,0054	0,0123	0,0062	0,0155
2	0,0223	0,0343	0,0260	0,0617	0,0299	0,0786
4	0,1679	0,2768	0,1959	0,5349	0,2302	0,7087
6	0,8951	1,6049	1,0455	3,3745	1,2619	4,6859
7	1,6806	3,0462	1,9633	6,4744	2,3779	9,0449
8	2,4890	4,5012	2,9076	9,5456	3,5190	13,3186
10	4,5962	8,1230	5,3671	16,8347	6,4483	23,1903
12	6,8968	11,8695	8,0501	23,9527	9,5903	32,5112
15	10,6963	17,8940	12,4789	35,0967	14,7328	46,8904
20	17,9052	29,2224	20,8801	55,9069	24,4577	73,6705
25	25,7334	41,2876	29,9997	77,6415	34,9489	101,3406
30	33,5338	52,8453	39,0806	97,5899	45,2674	126,1068
35	40,4571	62,5653	47,1326	113,3587	54,2661	144,9487
38	44,4189	67,9567	51,7376	121,7923	59,3634	154,7982
40	46,5241	70,6687	54,1824	125,7355	62,0260	159,1702

Tabela 6.33 - Atenuação em dB para as taxas de chuvas medidas e as sugeridas para os modelos em Quixeramobim (CE) - polarização da onda horizontal

Freq. GHz	Cidade de Quixeramobim – probabilidade 0,01%					
	Crane		ITU-R		Moupfouma	
	Chuva Regional 36,88 mm/h	Chuva sugerida 67 mm/h	Chuva Regional 36,88 mm/h	Chuva sugerida 95 mm/h	Chuva Regional 42,30 mm/h	Chuva sugerida 95 mm/h
1	0,0051	0,0079	0,0052	0,0123	0,0059	0,0155
2	0,0245	0,0388	0,0248	0,0617	0,0283	0,0786
4	0,1821	0,3117	0,1847	0,5349	0,2156	0,7087
6	0,9593	1,7981	0,9765	3,3745	1,1690	4,6859
7	1,7984	3,4106	1,8315	6,4744	2,1998	9,0449
8	2,6643	5,0404	2,7130	9,5456	3,2564	13,3186
10	4,9355	9,1084	5,0213	16,8347	5,9850	23,1903
12	7,4333	13,3306	7,5545	23,9527	8,9319	32,5112
15	11,5740	20,1312	11,7492	35,0967	13,7718	46,8904
20	19,4415	32,9258	19,7155	55,9069	22,9358	73,6705
25	28,0083	46,5691	28,3826	77,6415	32,8468	101,3406
30	36,5904	59,6720	37,0511	97,5899	42,6440	126,1068
35	44,2618	70,7313	44,7826	113,3587	51,2465	144,9487
38	48,6699	76,8786	49,2195	121,7923	56,1386	154,7982
40	51,0283	79,9831	51,5882	125,7355	58,7113	159,1702

6.6 Conclusão

Este capítulo apresentou os cálculos de atenuação devido à chuva, pelos modelos ITU-R, Crane (terrestre) e Moupfouma. Neste caso, que se refere a enlace via terrestre, o comportamento das atenuações entre os três modelos, para a mesma frequência são diferentes e com uma característica bem marcante, qual seja, dado uma mesma frequência e variando somente as probabilidades de ocorrência, nota-se que as atenuações diminuem à medida que as probabilidades aumentam. Para o modelo ITU-R e Moupfouma este decréscimo é bastante acentuado, enquanto que para o modelo Crane a diminuição da atenuação é lenta.

As tabelas 6.31, 6.32 e 6.33, mostram as comparações entre os 3 modelos, para uma mesma probabilidade das cidades de Cuiabá, Belo Horizonte e Quixeramobim, tomando-se estas para exemplificar. Nota-se que o modelo Moupfouma apresenta atenuações maiores que os modelos ITU-R e Crane para a mesma cidade. Foram calculadas também as atenuações levando em conta as intensidades de chuvas propostos pelos modelos (tabelas 2.5 e 2.6) quando não as tem nas localidades em estudo. É importante frisar que estas taxas de chuvas sugeridas estão superestimadas frente às taxas locais o que pode induzir a elaboração de projetos de telecomunicação superdimensionados.

A combinação das tabelas com suas respectivas figuras dão as probabilidades das atenuações serem maiores para uma determinada frequência, ou seja dado uma frequência, sabe-se qual é a probabilidade da atenuação ultrapassar determinado valor. Com este valor da atenuação pode-se verificar se a qualidade do sinal é ou comprometida.

Pode ser observado que quanto maior a frequência, maior é a atenuação considerando uma mesma taxa de chuva o que já era esperado, pois a atenuação é diretamente proporcional à intensidade da chuva.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES GERAIS, CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões Gerais

Para se projetar um enlace de transmissão de sinais deve levar em conta os fatores relativos às intempéries, pois estas se apresentam como fenômeno aleatório, de pouca previsibilidade, inerente ao caminho do sinal que é a atmosfera. As chuvas e os gases atmosféricos têm uma enorme capacidade de drenar potência dos sinais de rádio, devendo-se dedicar especial atenção às chuvas cujas células são formadas por gotas de água, que constituem obstáculos à boa propagação, pois estas gotas se comportam como grandes dispersoras de sinais, absorvendo potência do enlace de telecomunicação.

Com muita água no caminho do sinal a atenuação é também muito grande, uma vez que estas grandezas têm relação de proporção direta entre si. Com chuva forte a atenuação chega a 1 dB/km. Se a célula da chuva tiver 40 km, terá 40 dB de atenuação, pois a energia do sinal se espalha pelos pingos ao longo de toda a célula da chuva. Este valor de atenuação causa certamente problemas à comunicação.

É sempre interessante exemplificar com dados reais para melhor ilustrar uma idéia e aqui se recorre mais uma vez cidade de Cuiabá, onde o autor teve mais facilidade de adquirir esses dados. Nesta cidade a estação chuvosa é de novembro a fevereiro. A média de precipitação é de 192,96 mm em novembro, 166,88 mm em dezembro, 209,38 mm em janeiro e 254,82 mm em fevereiro. A média de precipitação anual é de 1315,10 mm, pela série histórica dos anos de 1961 a 1990 [23].

Nos últimos cinco anos, 2003, 2004, 2005, 2006 e 2007, a maior intensidade de chuva foi no mês de janeiro do ano de 2007 às 23 horas. Nesta hora choveu 86,40 mm o equivalente a 30,40 % de toda a chuva que caiu naquele mês que foi de 284,3 mm. Curiosamente o horário com maior frequência de chuva é 21 horas, fato este que ocorreu 154 vezes no período de 5 anos [23].

Estes dados são importantes, pois corroboram os resultados dos cálculos dos diferentes modelos que reafirmam a tendência de aproximação das intensidades de chuvas quando se tomam amostras em curto espaço de tempo.

Reportando aos exemplos de comparação dos capítulos V e VI, num período anual a precipitação de chuva de Cuiabá é de 1315,10 mm, Belo Horizonte é 1491,30 mm e Quixeramobim é 858,50 mm, ou seja, este valor é aproximadamente 60% daqueles. Agora, se tomar os dados referentes as intensidades de chuvas ou distribuição das taxas de chuvas a 0,01 % do ano (53 minutos em um ano), estes têm valores bastante próximos, quais sejam: Cuiabá é de 44,04 mm/h, Belo Horizonte é 38,85 mm/h e Quixeramobim é 36,88 mm/h.

Em função desta variação este trabalho propõe como objetivo central, o levantamento da discussão de até quanto o valor da intensidade de chuva (mm/h) para excedente de 0,01% do tempo, que é aplicada nos cálculos

relativos a projetos de enlace de sinal de rádio seja ele via satélite ou via terrestre, vem de fato alterar a concepção de projetos na área de telecomunicação, principalmente no quesito dimensionamento de equipamentos.

Os modelos utilizados nestes cálculos recomendam a utilizar, quando não se tem a série histórica de dados da região, 95 mm/h para o modelo CCIR e seus derivados e 67 mm/h. Aí vem o problema porque nem todas as regiões possuem dados de curta duração disponíveis, assim sendo lança-se mão destes valores que são globalmente recomendados.

Os cálculos feitos nos capítulos V e VI mostram que existe grande diferença entre os resultados obtidos a partir das taxas de chuvas (mm/h) medidas nos locais e aqueles obtidos considerando taxas chuvas (mm/h) sugeridas.

A principal conclusão é que mesmo considerando a intensidade de chuva local existem diferenças de resultados nos cálculos das atenuações. Nota-se as diferenças em todas as regiões sejam de maior ou menor latitude, que é uma variável importante nas rotinas de cálculos. Por se tratar de chuva a curto prazo, mesmo com resultados diferentes, notou-se grande similaridade no comportamento das curvas de probabilidades de ocorrências das atenuações em função do espectro de frequências, nas cidades estudadas. É notório que estas cidades possuem índice de precipitação anual diferentes, mas quando se reduz o tempo, 53 minutos, 0,01% de um ano, estes índices tendem a se igualarem. Portanto, o modelo global sempre apresenta riscos de sobreestimação ou subestimação do fenômeno da chuva, o que implica em alteração sumária no valor da atenuação do sinal.

Isto tem de ser visto em conformidade com a estatística natural da chuva e do seu comportamento histórico. A função acumulada anual comparada com o desvio entre a previsão das medidas coloca os modelos na mesma ordem de precisão. A variação anual das chuvas entre as cidades está em torno de 30%, a 0,01% do tempo anual esta variação está em torno de 10%, pode-se a partir daí elaborar mapas com níveis diferenciados de precipitação e atenuação, propositadamente a 0,01% do tempo excedente, para que sirva de referencia em projetos de telecomunicação. Assim, com as intensidades de chuvas a curto prazo relacionadas, embora haja diferenças entre elas, pelo fato da imprevisibilidade do fenômeno, pode se obter um mapa de taxa de chuva em mm/h, para cada micro região, mesmo ciente de que pela aleatoriedade, pode chover forte por curtíssimo espaço de tempo e deixar de fazê-lo por um longo período.

Nos enlace via terrestre, o comprimento deste é fundamental para achar a atenuação específica, expressa em dB/km. Aqui se volta à questão do tamanho da célula da chuva presente no enlace, pois os modelos existentes para os cálculos nesta modalidade (via terrestre), basea-se no modelo ITU-R global. Nestes cálculos utilizam-se as precipitações da chuva excedente de 0,01% do tempo (53 minutos do ano) dos diferentes locais, em relação à faixa de frequências de 1 a 60 GHz. Voltando às cidades comparadas, Cuiabá, Belo Horizonte e Quixeramobim, atribuiu-se também a taxa de chuva recomendada, conforme visto no capítulo VI, para se obter a atenuação e assim proceder as comparações com aquelas resultantes dos cálculos feitos com as taxas de chuvas locais.

Observando frequências abaixo de 5 GHz, as diferenças na atenuação específica são notáveis, concordando de certa forma com Moupfouma que diz que a incidência forte de chuva no enlace de radio na região tropical torna-se importante para frequências tão baixa como 7 GHz.

Os valores estimados diferentes de atenuação no trecho, a partir dos diferentes modelos (ITU-R, Crane e Moupfouma) com diferentes frequências e comprimento de enlace são esperados, vistos que estes valores dependem da intensidade da chuva do local, da frequência de operação, do comprimento do enlace e outras variáveis.

Nota-se que os valores das atenuações do modelo Crane são ligeiramente menores que o ITU-R enquanto que no hemisfério norte ou zonas temperadas, ocorre o contrário [13]. O modelo Moupfouma tentou introduzir melhorias no modelo ITU-R para que fosse utilizado em outras regiões.

7.2 Contribuições deste Trabalho

Com os dados vistos nota-se que a intensidade de chuva em mm/h de toda a área geográfica estudada que compreendeu praticamente todo o território brasileiro, exceto os estados do Amazonas e do Pará, não são aquelas apontadas pelo modelo CCIR, conforme tabela 2.5 associada a figura 2.3 que põe essa área na região N para seus estudos, nem tão pouco a apontada pelo modelo Crane que põe a região na área G, conforme tabela 2.6 associada com a figura 2.4.

Outra contribuição é que se deduziu a partir dos dados para longo período, as intensidades de chuvas em milímetro por hora para curta duração, das cidades selecionadas, para que sejam utilizados em cálculos de atenuações de sinais em enlaces tanto via satélite quanto via terrestre. Estes cálculos podem ser feitos escolhendo um dos modelos estudados, pois este trabalho mostra a diferença dos resultados produzidos por cada um deles e ao conhecer estas diferenças pode-se optar por um, embora seja recomendada a adoção de mais modelos, pois os cálculos envolveriam mais variáveis locais e desta forma os seus resultados tendem a aproximar bastante da realidade da região.

Estes fatores são fundamentais no cálculo da atenuação de sinais de radio, pois podem servir de base para empresas do ramo elaborar seus projetos visando melhor performance do sinal com as respectivas grades de probabilidade de ocorrência de maior atenuação em função das chuvas.

7.3 Sugestões

A banda Ka (20/30 GHz) e a banda V (40/50 GHz) estão se tornando gradualmente preferidas pelos usuários orientados para o futuro dos serviços de satélite comercial devido as suas larguras de faixa disponível. Entretanto, a qualidade do sinal é mais prejudicada com chuvas fracas que a quase saturada banda Ku (12/14 GHz), pois é a partir desta faixa de frequência que começa a ser um fator muito importante, a atenuação devido a condições atmosféricas. O aperfeiçoamento do uso destas faixas pode servir de socorro à banda C usada para radiocomunicação em geral, (uplink 6GHz, downlink 4GHz) que é muito empregada para tráfego de sinais de telefonia, dados e

principalmente TV, cuja faixa sofre pouca atenuação por chuva e outras perturbações atmosféricas e por isso está sobrecarregada.

Desta forma há cada vez mais necessidade de se obter a intensidade de chuva em cada local, como uma espécie de espectro histórico fino das chuvas, para poder obter maior aproveitamento das faixas de frequências destinadas a comunicação, que estão saturando rapidamente, em função da demanda que cresce exponencialmente, obrigando as Instituições governamentais e companhias ligadas ao setor de telecomunicação a se desdobrarem em busca de solução para evitar colapso do sistema a médio e longo prazo. Portanto, tomar uma intensidade de chuva genérica para grande região pode dificultar o gerenciamento das faixas de frequências e por consequência privar a sociedade do serviço de telecomunicação de qualidade. Pode-se sugerir o uso combinado dessas bandas levando em consideração as horas com probabilidade de ocorrer maior ou menor intensidade de chuva, o que parte do pressuposto, o conhecimento do comportamento histórico das chuvas em cada local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gagliard, R., "Satellite Communication, New York, VNR, 1984.
- [2] Disponível em : <http://web.rcts.pt/~pr1085/Humidade/Precipitacao.htm> em 25/07/2008.
- [3] CCIR, Report 719-1, "Attenuation By Atmospher: Gases" in Volume V, Propagation Non-ionzed Media, Recommendation and Reports of the CCIR, 1982, pp 138-150, International Telecommunications Union, Geneva, 1982.
- [4] Sonntag & Borgnakke; Wylen, V., "Fundamentos da Termodinâmica", Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.
- [5] Maral, G., Bousquet, "Satellite Communication System", Baffin Lane: Wiley, 1993.
- [6] Ippolito, L. J., "Radiowave Propagation in Satellite Communications".
- [7] CCIR, Report 721-1, "Attenuation by Hydrometeors in Particular Precipitation, and other Atmospheric Particles", in Volume V, Propagation Non-ionzed Media, Recommendation and Reports of the CCIR, 1982, pp 167-181, International Telecommunications Union, Geneva, 1982.
- [8] Crane, R. K., "Prediction of Attenution by Rain", IEEE Trans. On Communications, 1980.
- [9] Crane, R. K., "An Algorithm to Retrieve Water Vapor Information from Satellite Measurements" NEPRF Tech. Rept. 7-76 (ERT), Final Report, Project Nº. 1423, Environmental Research and Technology, Inc., November 1976.
- [10] Recommendation ITU-R 530-10, Propagation Prediction Techniniques and Data Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems, 2001.
- [11] M.P.M. Hall, L. W. Barclay and M.T. Hewitt, "Propagation of Radiowaves, Peter Peregrinus, IEE, 1996.
- [12] ITU-R WP document, Republico f Korea, Nº 3J/TEMP?126-E, 2006
- [13] Odedina, M. O., "Rain Attenuation Prediction Along Terrestrial Paths In South Africa Using Existing Attenuation Models", 2007
- [14] M.O. Fashuyi, P.A. Owolawi: "A Study of Rain Attenuation on Terrestrial Paths of Millimetric Wavelengths in South Africa, Msc Dissertation, University of Kwazulu-Natal, South Africa, February, 2006.

- [15] Fidele Moupfouma, “Improvement of a Rain Attenuation Prediction Method for Terrestrial Microwave Links”. IEEE Transactions Antennas Propagation, 1984.
- [16] Ross Gunn and Gilbert D. Kinzer, “The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air”, 1946.
- [17] Recommendation ITU-R 838-2, “Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Models”, Genova, 2003.
- [18] Joo-Hwan Lee, Jong-Ho Kim, Yong-Ho Park, “Empirical Conversion Process of Rain Rate Distribution for Various Integration Time”, ClimDiff, USA, 2005.
- [19] Burgueño, A. M. Puigcerver and E. Vilar, “Influence of Raingauge Integration Time on the Rain Rate Statistics used in Microwave Communications”, Ann. Telecom, 1988.
- [20] DAEE/CETESB – “Drenagem Urbana: Manual de Projeto” por Departamento de Águas e Energia elétrica e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2ª ed. Corrigida. São Paulo, 1980.
- [21] Silveira, Alexandre. “Curva de Intensidade-Duração-Frequência das Precipitações Extremas para o município de Cuiabá”.
- [22] Villela, Swami Marcondes, “Hidrologia Aplicada” por Swami M. Villela e Arthur Mattos. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- [23] INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, “Normais Climatológicas” e “Planilhas de Dados”, tel. (65) 3685-2855 em 04 de março de 2008.
- [24] Robert K. Crane, “Electromagnetic Wave Propagation Through Rain”, New York, 1996.