

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E SISTEMAS

MÁRCIO ROBERTO BEZERRA FIALHO

Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DA TAXA DE CHUVA E DA  
ATENUAÇÃO POR CHUVA EM ENLACES TERRESTRES  
NO ESTADO DO MARANHÃO**

SÃO LUÍS  
2016

MÁRCIO ROBERTO BEZERRA FIALHO

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DA TAXA DE CHUVA E DA  
ATENUAÇÃO POR CHUVA EM ENLACES TERRESTRES  
NO ESTADO DO MARANHÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Rogerio Moreira Lima Silva

SÃO LUÍS  
2016

Fialho, Márcio Roberto Bezerra

Estudo da distribuição da taxa de chuva e da atenuação por chuva em enlaces terrestres no Estado do Maranhão / Márcio Roberto Bezerra Fialho. - São Luís, 2016.

58f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Computação, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Rogerio Moreira Lima Silva

1. Propagação. 2. Métodos de predição. 3. Efeitos da precipitação. 4. Atenuação. I.Título

CDU: 556.12.042(812.1)

MÁRCIO ROBERTO BEZERRA FIALHO

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DA TAXA DE CHUVA E DA  
ATENUAÇÃO POR CHUVA EM ENLACES TERRESTRES  
NO ESTADO DO MARANHÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Rogerio Moreira Lima Silva

Aprovado em        de        2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rogerio Moreira Lima Silva (Orientador)  
Doutor em Engenharia de Telecomunicações, PUC-RJ, Brasil

---

Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva  
Doutor em Engenharia de Telecomunicações, PUC-RJ, Brasil

---

Prof. Dr. Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira  
Doutor em Engenharia Elétrica, Unicamp-SP, Brasil

*Dedico a minha mãe, Edmiria Fialho sem a qual nada seria possível.  
A meu pai Gilberto Fialho, que já partiu, mas sua lembrança ainda é forte.*

# Agradecimentos

Agradeço a todos os professores deste Mestrado que contribuíram para o nosso aprendizado. Em especial ao Prof. Dr. Rogerio Moreira Lima Silva por acreditar na concretização deste trabalho e por todo o incentivo durante estes anos.

À professora Marlene Sabino Pontes da PUC-RIO, pela motivação e incentivo.

Aos meus colegas de pós-graduação, pela amizade no decorrer desta longa jornada.

A todos os amigos que torceram para a conclusão deste trabalho e tornaram esta caminhada mais leve.

Ao meus irmãos Mirtes, Rosinete e em especial, Marcos Fialho cujo exemplo de profissionalismo e dedicação a família sempre me inspira.

À minha esposa Valéria Fialho, que sempre esteve ao meu lado suportando com bravura os meus momentos de ausência, com carinho e fé.

*“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto,  
é a coisa mais preciosa que temos.”*  
*Albert Einstein(1879-1955).*

# Resumo

O modelo ITU-R para o cálculo da atenuação por chuva necessário em projetos de redes e sistemas de comunicação sem fio que operam acima de 10 GHz tais como: radioenlaces, sistemas de comunicação via satélite, etc.; considera a taxa de chuva que excede a 0,01% de um ano médio no percurso do enlace. A recomendação ITU-R 837.6 estima esta taxa em dado ponto a partir de um modelo que considera a precipitação média anual, a probabilidade de ocorrência de chuva em 6 horas e informações sobre a relação entre os dados de precipitação provenientes de sistemas convectivos e estratiformes. Por outro lado, tem-se pouca informação sobre os impactos das mudanças da quantidade de precipitação nas atenuações devido a chuva. Neste contexto, na falta de informações de medições de atenuações e taxas de chuvas no local a ser estudado, utilizou-se o método ITU-R aplicando os históricos de dados de precipitação acumulada do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) coletados em 12 pontos do Estado do Maranhão em dois períodos: de 1961 a 1990, e de 1991 a 2015; e gerou-se mapas de contornos para as percentagens de tempo (1%; 0,1%; 0,01% e 0,001%) através de interpolação bilinear. Em seguida, aplicou-se estas taxas de chuva nos principais modelos para cálculo de atenuação em links terrestres: Modelos ITU-R, brasileiro (3M-2008), Australiano e o Crane. Em um estudo de caso, estes modelos foram alimentados com informações de um link de frequência ( $f=20$  GHz), com distância de 1 km e polarização circular, com os dados calculados de taxa de chuva, para percentagem de 0,01%, obtendo-se diversos valores de atenuação. Constatou-se que, apesar dos valores de atenuações por chuva com dados dos últimos 25 anos resultarem em valores menores que os valores gerados com as normais climatológicas, estes ainda são maiores que os valores obtidos pelo banco de dados recomendado pela ITU-R (reanálise ERA-40).

**Palavras-chave:** Propagação. Métodos de predição. Efeitos de precipitação. Atenuação.



# Abstract

The ITU-R model to calculate the attenuation by rain needed in network design and wireless communication systems operating above 10 GHz such as radio link of satellite communication systems, etc .; considers the rain rate that exceeds 0.01% of an average year in the link path. The ITU-R 837.6 recommendation estimated this rate at a given point from a model that considers the average annual rainfall, rain probability of occurrence in 6 hours and information on the relationship between rainfall data from convective and stratiform systems. On the other hand, there is little information on the impact of changes in the amount of rainfall attenuation due to rain. In this context, in the absence of attenuation measurements of information and rainfall rates in the area to be studied, we used the ITU-R method applying the historical accumulated rainfall data INMET (National Meteorological Institute) collected 12 points state of Maranhao in two periods: 1961-1990 and from 1991 - 2015 and was generated contour maps for the time percentage (1%; 0,1%; 0,01% e 0,001%) by bilinear interpolation. Then applied these rain rates in the main models for calculating attenuation in terrestrial links: ITU-R model, Brazil (3M-2008), Australian and Crane. In a case study, these models were fed information from a link frequency ( $f = 20$  GHz) with a distance of 1 km and circular polarization, with the data of rainfall rate to a percentage of 0,01% obtaining different attenuation values. It was found that, despite the attenuations for rain values with data from the last 25 years result in lower values than the values obtained with the climatological normal, they are still higher than those obtained by the database recommended by ITU-R (reanalysis ERA-40).

**Key Words:** Propagation. Prediction method. Precipitation effects. Mitigation.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de medição de atenuação e intensidade de chuva(UAD). . . . .	19
Figura 2 – Classificação de Koppen-Geiger. . . . .	22
Figura 3 – Zonas ITU-R. . . . .	23
Figura 4 – Classificação de Koppen-Geiger para o Brasil. . . . .	24
Figura 5 – Modelo Crane Global para a América do Sul. . . . .	25
Figura 6 – Estações Meteorológicas do INMET. . . . .	26
Figura 7 – Distribuição das taxas de chuvas medidas x ajustadas no Brasil. . . . .	30
Figura 8 – Taxa de chuva(mm/h) que excede a 0,01% de um ano médio. . . . .	33
Figura 9 – Intersecção entre a célula de chuva com dimensão $d_0$ e o enlace $d$ . . . . .	37
Figura 10 – MAPA 01 com $R_{0,01}$ utilizando ERA-40. . . . .	43
Figura 11 – MAPA 02 com $R_{0,01}$ utilizando ERA-40 e Normais. . . . .	44
Figura 12 – MAPA 03 com $R_{0,01}$ utilizando ERA-40 e últimos 25 anos. . . . .	45
Figura 13 – MAPA 04 com $R_{0,001}$ utilizando ERA-40 e Normais. . . . .	46
Figura 14 – MAPA 05 com $R_{0,1}$ utilizando ERA-40 e Normais. . . . .	47
Figura 15 – Mapa 06 com $R_1$ utilizando ERA-40 e Normais. . . . .	48
Figura 16 – $R_p$ (mm/h) x $p$ (%) das normais climatológicas em São Luís. . . . .	48
Figura 17 – Enlace Telemar S.R. das Mangabeiras - Balsas . . . . .	53

# Lista de tabelas

Tabela 1 – $R_p$ para as Zonas Climáticas da ITU-R (mm/h) . . . . .	23
Tabela 2 – Classificação de Koppen para o Brasil. . . . .	24
Tabela 3 – $R_p$ para as Zonas Climáticas de CRANE (mm/h) . . . . .	25
Tabela 4 – Dados de precipitação acumulada das estações do INMET. . . . .	27
Tabela 5 – Valores de $k_h, \alpha_h, k_v$ e $\alpha_v$ em função da frequência. . . . .	36
Tabela 6 – Coeficientes de $k_h$ . . . . .	38
Tabela 7 – Coeficientes de $k_v$ . . . . .	38
Tabela 8 – Coeficientes de $\alpha_h$ . . . . .	38
Tabela 9 – Coeficientes de $\alpha_v$ . . . . .	39
Tabela 10 – Valores de $R_{0,01}$ para os 12 Locais de Monitoramento(mm/h). . . . .	44
Tabela 11 – Erro percentual $\varepsilon(\%)$ . . . . .	45
Tabela 12 – $R_p$ (mm/h) x $p(\%)$ utilizando reanálise ERA-40. . . . .	50
Tabela 13 – $R_p$ (mm/h) x $p(\%)$ utilizando as normais climatológicas. . . . .	50
Tabela 14 – $R_p$ (mm/h) x $p(\%)$ utilizando dados dos últimos 25 anos. . . . .	51
Tabela 15 – Atenuação dos Modelos Australiano, Brasileiro, ITU em função das taxas de chuva para $p = 0, 01\%$ , $f=20$ GHz e distância de 1km em São Luís . . . . .	52
Tabela 16 – Dados do Enlace Telemar S.R. das Mangabeiras - Balsas . . . . .	53
Tabela 17 – Disponibilidade do Enlace Telemar S.R. das Mangabeiras - Balsas. . . . .	53

# Lista de abreviaturas e siglas

ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
f.d.e	Função de Distribuição Empírica
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GTS	<i>Global Telecommunication Systems</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
NCEP-NCAR	<i>National Centres for Environmental Prediction-National Centre for Atmospheric Research</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
UAD	Unidade de Aquisição de Dados
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
WCRP	<i>World Climate Research Program</i>
XPD	<i>Cross-polarization discrimination</i>
SPB	Método <i>Solonen Poaires Baptista</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Organização do trabalho	15
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO</b>	<b>16</b>
2.1	Efeitos da Chuva sobre a Atenuação.	16
2.2	Estudos dos Eventos de Precipitação	17
2.3	Dados de Precipitação	18
2.4	Banco de Dados de Precipitação	19
2.5	Zonas Climáticas Globais	20
2.6	Características Climáticas do Maranhão	25
2.6.1	Localização Geográfica e Caracterização Climática	25
2.6.2	Dados das Estações do INMET no Maranhão	26
2.7	Considerações Finais	27
<b>3</b>	<b>MODELOS ESTATÍSTICOS PARA CÁLCULO DE TAXAS DE CHU- VAS</b>	<b>29</b>
3.1	Cálculo da Taxa de Precipitação excedida $R_p$	29
3.2	Conversão para Vários Intervalos de Integração	29
3.3	Recomendação ITU-R para o cálculo de $R_p$	31
3.4	Considerações Finais	33
<b>4</b>	<b>ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA ENLACES TERRESTRES</b>	<b>35</b>
4.1	Modelo CRANE	35
4.2	Modelo ITU-R	36
4.3	Modelo Australiano	39
4.4	Modelo Brasileiro	40
4.5	Considerações Finais	40
<b>5</b>	<b>MAPA DE CONTORNO DAS TAXAS DE CHUVA PARA O MA- RANHÃO</b>	<b>42</b>
5.1	Mapas de Contorno de $R_{0,01}$	42
5.2	Cálculo do erro percentual para a $R_{0,01}$	43

5.3	Mapas de Contorno para outras percentagens $R_p$ . . . . .	46
5.4	Considerações Finais . . . . .	49
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	50
7	CONCLUSÕES . . . . .	54
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	55
	REFERÊNCIAS . . . . .	56

# 1 Introdução

A ocorrência de precipitação no decorrer do percurso das ondas eletromagnéticas quando estas se propagam através do espaço pode causar atenuações do sinal transmitido, especialmente em frequências acima de 10 GHz. As bandas Ku e Ka - que englobam os intervalos de 11 a 18 GHz e de 20 a 30 GHz, respectivamente - tem se tornado cada vez mais importantes para a comunicação móvel terrestre e por satélite, devido ao congestionamento das frequências abaixo de 10 GHz e ao aumento da demanda por serviços de comunicação (SILVA, 2002). Na presença de chuvas intensas, os sistemas de comunicação que operam nestas faixas experimentam perdas significativas no sinal transmitido, causando interrupções momentâneas dos serviços disponibilizados. Isto ocorre por dois fenômenos físicos já conhecidos que são: a absorção e o espalhamento da energia da onda (MIYOSHI, 2008). O estudo destes fenômenos e de seus efeitos despertou maior interesse da comunidade científica a partir da utilização militar das comunicações por rádio durante a segunda guerra mundial.

Existem vários modelos teóricos utilizados para tentar descrever e prever as atenuações devido a precipitação. Entende-se por precipitação a liberação, a partir da atmosfera em direção ao solo, de água na forma de chuvisco, chuva, granizo ou neve. Em regiões de clima equatorial ou tropical, o principal responsável pela atenuação é a chuva, ou precipitação líquida <sup>1</sup>. Os cientistas buscam compreender o comportamento das chuvas, gerando modelos de previsão ou aperfeiçoando os modelos já existentes, para que possam mitigar de forma mais precisa as perdas por atenuação em projetos de radioenlaces.

Este trabalho propõe um estudo dos principais métodos para atenuação por chuva aplicados ao Estado do Maranhão para enlaces terrestres, levando-se em consideração as taxas de chuvas obtidas através dos dados das normais climatológicas disponibilizados pelo INMET em (INMET, 2009), que compreendem 30 anos de dados (1961 a 1990) e dados de precipitação acumulados de 1991 a 2015. Através da análise destes dados, serão gerados mapas de contorno de taxa de chuva utilizando-os nos principais modelos de atenuação aplicáveis em regiões tropicais, comparando estes resultados aos obtidos com as taxas de chuvas recomendadas para cada um dos modelos de atenuação selecionados.

## 1.1 Justificativa

Os modelos que possibilitam a previsão da atenuação devido à chuva levam em consideração diferentes modos de estimar a taxa de chuva. Cada modelo recorre a mapas

---

<sup>1</sup> Para efeito de simplificação neste trabalho, utiliza-se o termo geral precipitação ou chuva, referindo-se à precipitação líquida.

de valores de taxas de chuva gerados a partir de estudos de predições globais que, em geral, atribuem as mesmas taxas de chuvas para regiões climáticas semelhantes. Estas atribuições se devem principalmente a escassez de dados de precipitação medidos nas regiões estudadas, obtendo em alguns casos, aproximações grosseiras quando comparadas a valores adquiridos através dos dados locais.

A *International Telecommunication Union* (ITU-R), através do Setor de Radiocomunicações, disponibiliza recomendações que incluem mapas com taxas de chuvas espalhadas por diversas regiões do globo a serem adotadas pelos engenheiros para projetos de redioenlaces na ausência de dados de precipitação locais que fundamentem o cálculo destas taxas. Contudo, estas mesmas recomendações estimulam a utilização de dados de precipitação medidos no local de estudo, caso se tenha acesso a esses dados, ao invés da utilização de mapas gerados a partir das semelhanças entre regiões climáticas (ITU-REC.P.837-6, 2012). De fato, devido a algumas características da chuva, como a distribuição espacial não-homogênea, quanto melhor a resolução espacial das taxas de chuva melhor será a resolução espacial das atenuações preditas.

Por outro lado, algumas regiões do planeta dispõem de poucas informações sobre as taxas de chuvas através de medições locais, tendo seus dados estimados a partir dos dados medidos em locais mais próximos. O Estado do Maranhão, com 331.936,955  $km^2$  de extensão e com população estimada em 6.904.241 habitantes (IBGE, 2015) concentrados principalmente na região metropolitana, não possui, até o presente momento, medições adequadas que relacionem as taxas de chuva e a atenuação <sup>2</sup>. Com esta extensão territorial e carência em infraestrutura de fibra ótica que cubra todo o seu território, as redes sem fios ocupam um importante papel na conectividade desta região, bem como na disponibilidade de acesso às redes de comunicação para os municípios mais remotos. Desta forma, os problemas da carência em infraestrutura de rede cabeada no Estado do Maranhão e da falta de medições locais de taxas de chuvas e atenuações, motivaram a elaboração deste estudo, levando-se em conta os dados de precipitações acumuladas locais para estimar estas taxas, ao invés de utilizar dados medidos fora do território em estudo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Com a crescente expansão do uso de sistemas de rádio e a necessidade de maior confiabilidade dos serviços proporcionados por estes sistemas nota-se que poucas informações sobre as atenuações devido a ocorrência de precipitação estão disponíveis. O objetivo deste estudo é adequar o método da recomendação 837.6 (ITU-REC.P.837-6, 2012) para

<sup>2</sup> O local de medição mais próximo é no município de Mosqueiro no Pará, aproximadamente a 500 km da capital do Maranhão, São Luís.



cálculo da intensidade de chuva a partir de dados coletados em 12 pontos do território do Estado do Maranhão, apresentando como resultado final um mapa de taxa de chuva que possa servir de apoio para futuros projetos de sistemas de rádio. Pretende-se utilizar os dados de taxa de chuva a partir dos mapas gerados para simular cálculos da atenuação utilizando os principais modelos aplicáveis em regiões equatoriais e tropicais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem por objetivos:

- avaliar a utilização das intensidades de chuvas nos modelos de atenuação aplicáveis em regiões equatoriais e tropicais;
- aplicar o método sugerido pela recomendação ITU 837.6 (ITU-REC.P.837-6, 2012) para o cálculo da taxa de chuva a partir de dados de precipitação acumulados em 12 pontos de coleta no Estado do Maranhão;
- propor mapas de intensidade de chuva utilizando o conjunto de dados de precipitação acumulada do INMET de 1961 a 1990, e de 1991 a 2015;
- contribuir para o estudo do fenômeno da atenuação devido a precipitação provenientes das amostras de dados locais com maiores intervalos de tempo.

## 1.3 Organização do trabalho

Para melhor organização, este trabalho foi dividido da seguinte forma: No capítulo 1 apresenta-se uma breve descrição do problema a ser tratado. No capítulo 2, aborda-se as características da chuva e como ocorre a relação entre a chuva e a atenuação de sinais. Aborda-se também as características climáticas da região em estudo e os dados de precipitação utilizados. No capítulo 3, serão abordados os principais métodos para estimar taxas de chuvas para efeito de cálculo da atenuação. No capítulo 4, apresentam-se os métodos para cálculo da atenuação devido a chuva em enlaces terrestres que serão utilizados nos capítulos posteriores. No capítulo 5 serão apresentados os mapas de taxa de chuvas obtidos através dos dados referidos no capítulo 2. No capítulo 6 serão apresentados os resultados das atenuações calculadas pelos modelos abordados no capítulo 4 a partir dos mapas de contorno. Finalmente, no capítulo 7 encerra-se com as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Análise da Precipitação

### 2.1 Efeitos da Chuva sobre a Atenuação.

A chuva desempenha um papel importante no dimensionamento de um enlace de comunicação em faixas de frequência acima de 10 GHz. Segundo MIYOSHI (MIYOSHI, 2008), estudos têm demonstrado que três características da estrutura das chuvas influenciam na atenuação em enlaces de rádio. São eles:

- Distribuição horizontal;
- Distribuição da taxa pluviométrica;
- Tamanho, formato e distribuição da gota de chuva.

A distribuição horizontal consiste na forma como a chuva é distribuída no decorrer do enlace. Estudos efetuados com dados de sistemas de radar meteorológico revelam que a chuva não é homogênea no decorrer do enlace, apresentando regiões onde ocorrem altas taxas pluviométricas conhecidas por "células de chuva". Alguns modelos são propostos para descrever o formato da célula de chuva: cônico, cilíndrico e gaussiano (MIYOSHI, 2008).

A distribuição de taxa pluviométrica está relacionada com a obtenção das chuvas de maior intensidade em um curto espaço de tempo. Dados relativos a taxas pluviométricas intensas são raros e de difícil obtenção experimental. Na ausência destes dados necessitamos de modelos estatísticos que descrevam esta distribuição. Alguns destes modelos serão descritos adiante.

O tamanho, o formato e a distribuição da gota da chuva variam com a intensidade da chuva. Existem alguns modelos elaborados para descrever a distribuição do tamanho da gota da chuva, como os LAWS & PARSON (LAWS; PARSONS, 1943) e MARSHALL & PALMER (MARSHALL; PALMER, 1948). É na gota da chuva que ocorre de fato os fenômenos físicos de absorção e espalhamento da energia da onda. Os diâmetros das gotas variam de 0,01 a 6,0 mm. Gotas de dimensões fora deste intervalo ou evaporam (inferiores a 0,01 mm) ou se fracionam (superiores a 6,00 mm) devido à baixa tensão superficial.

No espalhamento ocorre a modificação na geometria da onda para que esta contorne a geometria de cada gota. A absorção corresponde a dissipação de energia térmica em função da condutividade da água.

Para simplificar, considera-se o formato esférico para a gota neste trabalho. Segundo (CRANE, 1997), os eventos de atenuação podem ocorrer em qualquer lugar onde há precipitação líquida no decorrer do caminho de propagação. A atenuação específica em um ponto onde ocorre a chuva neste percurso está relacionada a intensidade da chuva naquele ponto. A atenuação total em um instante de tempo no percurso da onda é dada a partir da integração de todas as atenuações específicas naquele momento. Isto é:

$$A(t) = \int_0^D \gamma(x, t) dx. \quad (2.1)$$

Sendo que;

$$\gamma(x, t)_{(dB/km)} = k[R(x, t)]^\alpha \quad (2.2)$$

Onde a  $A(t)$  calculada pela equação 2.1 é a atenuação total (em dB) e  $D$  é o comprimento do percurso do sinal de rádio. A função  $\gamma(x, t)$  calculada pela equação 2.2 é a atenuação específica na posição  $x$  ao longo do percurso e é representada como uma função da taxa de chuva (acumulação de precipitação por unidade de tempo) medida sobre algum intervalo de tempo agregado  $R(x, t)$ . Os coeficientes  $k$  e  $\alpha$  de 2.2 dependem da frequência e da polarização da onda eletromagnética.

## 2.2 Estudos dos Eventos de Precipitação

Segundo Crane (CRANE, 1997) as ocorrências de chuvas são aleatoriamente distribuídas no espaço e no tempo, em escalas de medidas de dezenas de quilômetros ou mais e em intervalos de duração de vários minutos. Os serviços meteorológicos monitoram as chuvas através de medidores de precipitação e radares meteorológicos. Destes dois equipamentos, somente os medidores de precipitação (os mais comuns são os pluviômetros) possuem informações pontuais de natureza quantitativa sobre a chuva. Os dados dos pluviômetros são acumulados em intervalos de 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60 (dados em minutos) ou intervalos maiores ao longo de um ano, ou em um mês. Os registros de precipitação acumulada distribuídas no tempo (série temporal) são utilizados para desenvolver um histograma com as ocorrências de taxas de chuvas de diferentes intensidades. Com este histograma é possível gerar uma distribuição cumulativa de ocorrência da intensidade de chuva. Esta distribuição ordenada resultante, que representa uma variável aleatória, é uma amostra do processo estatístico que governa a ocorrência da chuva, a função de distribuição empírica (f.d.e.).

A f.d.e. de taxas de chuvas anuais varia quando comparados os resultados ano a ano. Em outras palavras, várias amostras em um mesmo ponto diferem estatisticamente de um ano para o outro. Ocorrem variações também dentro da mesma região climática.

A distribuição é utilizada para descrever a probabilidade de ocorrência de eventos de taxas de chuvas com intensidades específicas, sendo possível determinar a probabilidade de ocorrência para as taxas de chuvas de maior intensidade, bem como as de menor intensidade para um determinado ano ou para vários anos. Por essa razão, utilizam-se históricos de dados de longo prazo sempre que possível.

## 2.3 Dados de Precipitação

O pluviômetro é o equipamento mais utilizado para medições de precipitações líquidas. Estes equipamentos registram a quantidade de chuva (em milímetros). Dados de taxa de chuva (mm/h), que interessam ao estudo da atenuação devido à chuva, são obtidos de forma indireta, a partir de cálculos efetuados nos registros de quantidade de chuva. Nos casos em que temos dados acumulados em intervalos de tempo superiores a 1 minuto e não temos registros da quantidade de medições efetuadas durante este intervalo, divide-se a quantidade acumulada em um intervalo de tempo pelo intervalo acumulado obtendo taxas em milímetro por minuto. Converte-se então milímetro por minuto para milímetro por hora.

Os principais dados de precipitação que geram as altas intensidades de chuva são oriundos de sistemas denominados convectivos ou de convecção. Este tipo de sistema ocorre quando a superfície terrestre aquece causando a ascensão do ar que arrefece e condensa gerando a precipitação líquida. As chuvas desta natureza precipitam rápida e intensamente em curta duração (menos de 10 minutos). Ocorrem com frequência nas regiões intertropicais e equatoriais e no interior dos continentes devido as temperaturas elevadas (ARRUDA, 2008). A outra natureza das precipitações são de sistemas estratiformes que dão origem a uma precipitação de caráter leve e contínuo. Estas acrescentam nos valores de precipitação acumuladas mas tem pouca interferência nas intensas taxas de chuva. Infelizmente, são raras as bases de dados de precipitação que distinguem a percentagem provenientes de cada um destes dois sistemas.

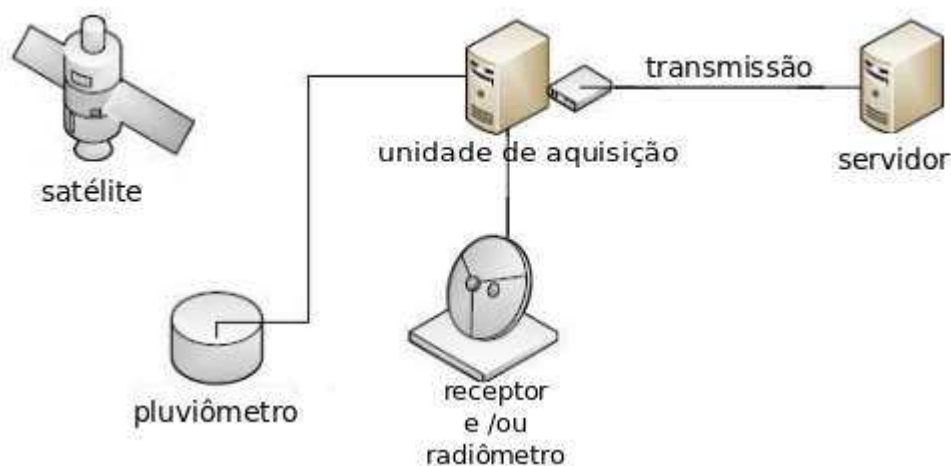
O período ideal para intervalos entre a medição da taxa de precipitação para efeito de cálculo da atenuação está relacionado à velocidade com que a célula de chuva se desloca e a sua dimensão. Recomenda-se a utilização de dados de precipitação com intervalos de 1 minuto a 5 minutos identificando assim, as chuvas de maiores intensidades (CRANE, 1997). Quando se utilizam dados com intervalos acima de 5 minutos, percebe-se uma diminuição considerável das intensidades máximas de chuva. Felizmente existem alguns estudos que correlacionam dados de intervalos de integração maiores com intervalos menores.

Várias observações da relação entre a atenuação e a intensidade de chuva são obtidas através de um arranjo que captura simultaneamente, a intensidade de chuva, através de um disdrômetro ou um pluviômetro de maior precisão, e a atenuação, através de radiômetros.

Uma UAD (unidade de aquisição de dados) processa as informações coletadas. Este tipo de arranjo é instalado na estrutura das antenas medindo em tempo real, a relação entre esses dois elementos. Na Figura 1, adaptada de (MIRANDA; PONTES; MELO, 1998), é possível visualizar um modelo deste arranjo.

Os bancos de dados de precipitação e atenuação são apresentados de forma resumida no item 2.4.

Figura 1 – Sistema de medição de atenuação e intensidade de chuva(UAD).



Fonte: Adaptado de (MIRANDA; PONTES; MELO, 1998).

## 2.4 Banco de Dados de Precipitação

Os registros de precipitação de longos períodos são de grande utilidade para os mais diversos campos da atividade humana. Estes registros são utilizados para análise de possíveis mudanças climáticas em escala regional ou global, bem como para análises de ciclos hidrológicos. Alguns bancos de dados, especialmente gerados por arranjos exemplificados na Figura 1, são de interesse específico ao estudo de atenuações de sinais. Os demais bancos de dados de precipitação podem ser originários de observações de pluviômetros, observações por satélite ou de vários modelos numéricos conhecidos. Alguns bancos de dados distinguem entre os dados de chuva provenientes de sistemas convectivos ou os oriundos de sistemas estratiformes.

O grupo de estudo 3 da ITU-R mantém um banco de dados para enlaces terrestres e terra-espço com dados de propagação medidos em vários pontos do globo (DBSG3). Ele inclui estatísticas de desvanecimento para várias localizações com distribuições de taxas de chuva média anual por um ou mais anos e as estatísticas de atenuação de vários enlaces operando em diferentes frequência e ângulos de elevação. Este banco é atualizado desde a década de 60.

O ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) mantém alguns bancos de dados meteorológicos. O primeiro banco de dados de reanálise, denominado ERA-15 com 15 anos de dados de precipitação, engloba o período de 1979 a 1993. O ERA-15 contém dados observacionais obtidos em tempo real da *World Meteorological Organizations Global Telecommunication Systems* (GTS) e de várias outras fontes adicionais (RANATUNGA, 2014). O segundo banco do ECMWF, conhecido como ERA-40, contém observações meteorológicas de 1957 a 2002. Este banco foi acrescido com dados de bóias oceânicas e outras plataformas de superfícies, adquirindo dados de diversas fontes, com maior resolução espacial do que o ERA-15.

Outras bases de dados importantes são a reanálise NCEP-NCAR (*National Centres for Environmental Prediction-National Centre for Atmospheric Research*) com dados de 1957 até a presente data, a cada 6 horas (00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC). A precipitação acumulada é somada e disponibiliza-se a parcela de precipitação convectiva e total.

Finalmente, o banco de dados GPCP (*Global Precipitation Climatology Project*) estabelecido pela *World Climate Research Program* (WCRP) em 1986 são precipitações derivadas principalmente de observações por satélite. Neste trabalho, além do banco de dados reanálise ERA-40, utiliza-se o banco de dados disponibilizado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) que possui 12 estações espalhadas pelo território de análise. O INMET possui as normais climatológicas que englobam 30 anos (1961 a 1990) e os dados dos próximos 25 anos (1991 a 2015).

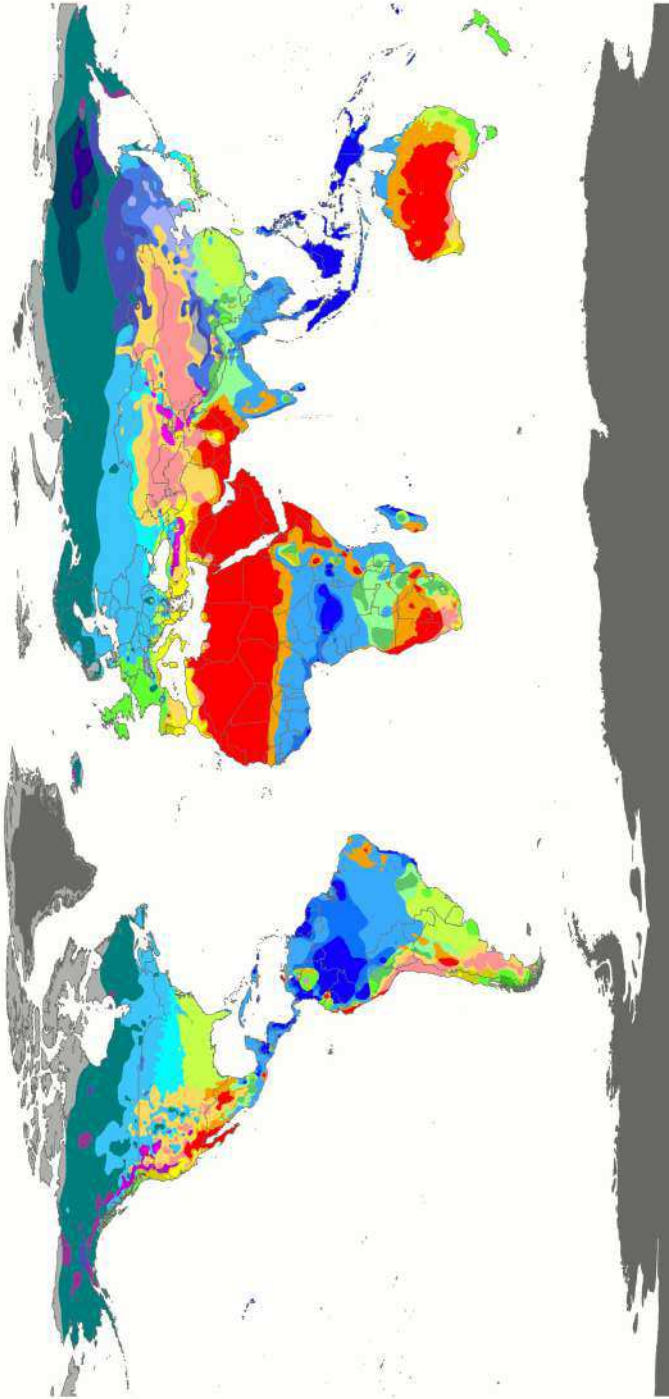
## 2.5 Zonas Climáticas Globais

Devido a baixa resolução espacial dos dados de taxa de chuva medidos em enlaces e a dificuldade na obtenção desta variável, alguns modelos que são encontrados na literatura propõem a adoção de regiões ou zonas climáticas com características semelhantes e mesma taxa de precipitação. Este tipo de classificação é inspirado nos estudos do climatologista russo Wladimir Koppen que propôs a classificação climática de Koppen. Esta classificação, aperfeiçoada pelo meteorologista e climatologista alemão Rudolf Geiger, passou a ser conhecida por Koppen-Geiger e é apresentada na Figura 2.

Os parâmetros utilizados para gerar classificações climáticas como a temperatura, o relevo, a precipitação média acumulada e o tipo de vegetação, são necessários mas não suficientes para obter-se informações sobre a taxa de chuva. É necessário comparar essas áreas classificadas com os modelos da função de distribuição gerados a partir de medições em cada região, resultando na prática em uma redução de regiões climáticas que descreve as distribuições de chuva (CRANE, 1997). Existe um vasto histórico de medições que serviram para gerar informações sobre as taxas de precipitação por zonas climáticas. Pode-se citar como exemplos de estudos nessa área os trabalhos de (RICE; HOLMBERG,

1973), (CRANE, 1977) e (DUTTON, 1977).

Figura 2 – Classificação de Köppen-Geiger.  
**World map of Köppen-Geiger climate classification**



**DATA SOURCE** : GHCN v2.0 station data  
 Temperature (N = 4,844) and  
 Precipitation (N = 12,396)  
**PERIOD OF RECORD** : All available  
**MIN LENGTH** : ≥30 for each month.  
**RESOLUTION** : 0.1 degree lat/long

AF	BWh	Csa	Cwa	Cfa	Dsa	Dwa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	Dsb	Dwb	EF
Aw	BSh	Cwc	Cwc	Cfc	Dsc	Dwc	
	BSk				Dsd	Dwd	

**Contact** : Murray C. Peel (mpeel@unimelb.edu.au) for further information

Fonte: (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2015).



Aborda-se a seguir, os dois principais modelos baseados em zonas climáticas: Modelo ITU-R e o modelo Crane.

A ITU-R define 15 diferentes zonas climáticas em todo o globo. Elas são referenciadas pelas letras do alfabeto (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P e Q) e apresentam curvas características de taxas de precipitação por percentagens de tempo para essas áreas (GARCIA, 2003). Este modelo não apresenta boa precisão para o Brasil pois contempla apenas as zonas P e N para representar toda a diversidade climática do país.

A Tabela 1 apresenta os valores que devem ser considerados da taxa de chuva para cada zona climática prevista pela ITU-R.

Tabela 1 –  $R_p$  para as Zonas Climáticas da ITU-R (mm/h)

p(%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
0,001	22	32	42	42	70	78	65	83	83	100	150	120	180	250	170
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
1	< 0,1	0,5	0,7	2,1	0,6	1,7	3	2	8	1,5	2	4	5	12	24

Fonte: Adaptado de (ARRUDA, 2008).

Comparando as Figuras 3 e 4 observa-se que a classificação de Koppen-Geiger apresenta melhor detalhamento para o Brasil do que as zonas ITU-R.

Figura 3 – Zonas ITU-R.



Fonte: (ASSIS, 2001).

Figura 4 – Classificação de Koppen-Geiger para o Brasil.



Fonte: (ASSIS, 2001).

A Tabela 2 apresenta as características de cada zona climática de Koppen-Geiger presentes no Brasil.

Tabela 2 – Classificação de Koppen para o Brasil.

Zona	Característica
Af	Equatorial Chuvoso sem estação de seca.
Am	Tropical de Monções com curta estação de seca.
Aw	Tropical com inverno seco e verão úmido.
Cw	Tropical de altitude com taxas de precipitação mais elevadas.
Cf	Subtropical
BS	Semi-árido

Fonte: (ARRUDA, 2008)

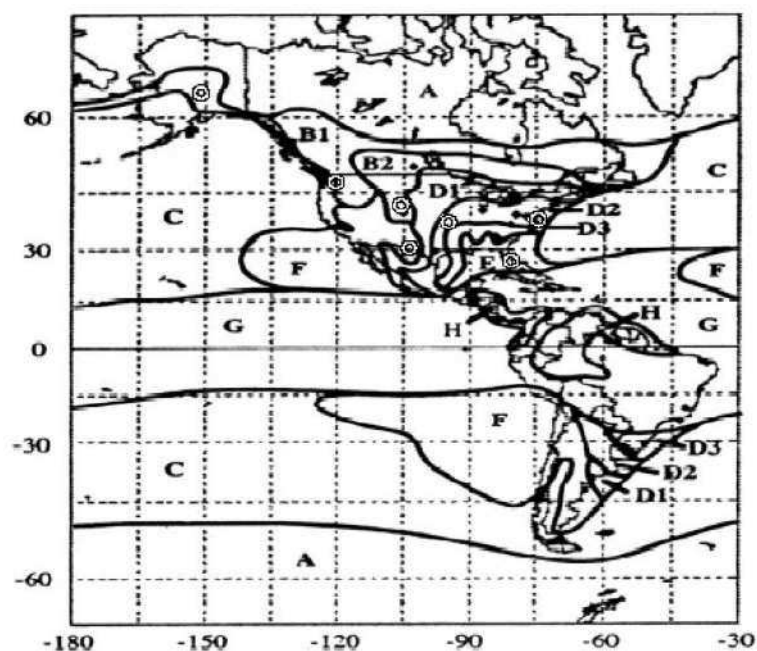
Um outro modelo baseado em zonas climáticas é o Global CRANE. Inicialmente, este modelo classifica o clima global em quatro tipos, com duas sub-áreas cada: Polar, Temperado, Sub-Tropical e o Tropical.

O clima Polar possui as sub-áreas A (seco) e B (moderado); o Temperado apresenta as sub-áreas C (marítimo) e D (continental); o Sub-Tropical divide-se em E (úmido) e F (árido) e, finalmente o Tropical, que apresenta as sub-áreas G(moderado) e H (úmido). Em 1978 o modelo foi revisto e a região D foi subdividida em D1, D2 e D3, sendo que D1 é a mais seca e D3 mais úmida.

Com os trabalhos de (SEGAL, 1979) e EUROCOP-COST 25/4 Project (FEDI, 1979) a região B passou a contar com os itens B1 e B2.

Na Figura 5 é possível visualizar as áreas definidas pelo modelo Global CRANE para a América do sul.

Figura 5 – Modelo Crane Global para a América do Sul.



Fonte: (CRANE, 1977).

A Tabela 3 apresenta as taxas de chuva estimadas de cada zona climática para as percentagens de tempo 0,001%, 0,01%, 0,1% e 1%.

Tabela 3 –  $R_p$  para as Zonas Climáticas de CRANE (mm/h)

p(%)	A	B	C	D1	D2	D3	E	F	G	H
0,001	28	54	80	90	102	127	164	66	129	251
0,01	15	19	28	37	49	63	98	23	67	147
0,1	6,5	6,8	72	11	15	22	35	5,5	22	51
1,0	1,7	1,8	1,9	2,2	2,0	4,0	4,0	1,7	2,7	6,4

Fonte: Adaptado de (ARRUDA, 2008).

## 2.6 Características Climáticas do Maranhão

### 2.6.1 Localização Geográfica e Caracterização Climática

Embora o efeito da atenuação seja um fenômeno global a nossa área de estudo restringe-se aos limites geográficos do Estado do Maranhão. Com uma área total de

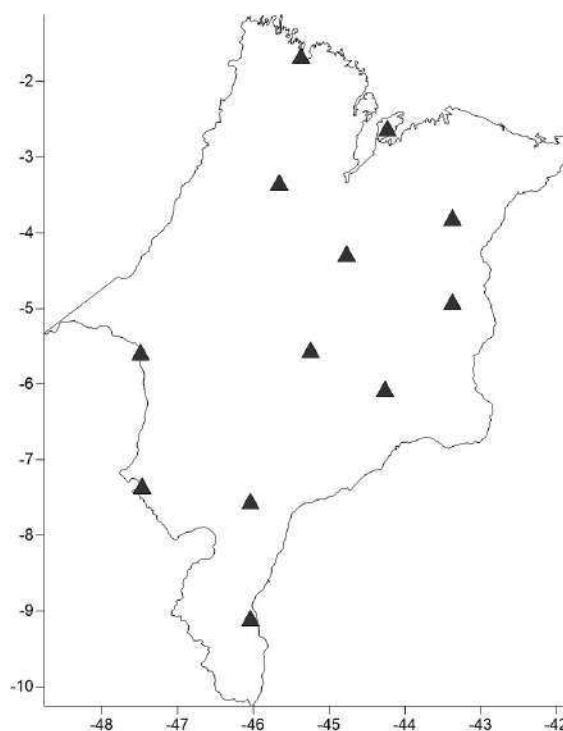
331.937,45  $km^2$ , o Estado do Maranhão situa-se na região Nordeste do Brasil, entre 48,6 ° W e 41,7 ° W de longitude e 10,25 ° S e 1,12 ° S de latitude e é caracterizado pelo clima tropical. Como visto na Tabela 2, grande parte do território Maranhense está inserido na zona Aw. A região nordeste do Estado contempla a zona Am/Af.

Levando-se em conta o Modelo CRANE, o Brasil está inserido na região G que estima uma probabilidade de chover mais que 67 mm/h, em 0,01% ao ano. Já o mapa das zonas ITU-R considera para o Brasil valores de 95 mm/h para a região N e 145 mm/h para a região P. O Estado do Maranhão encontra-se, em quase sua totalidade, inserido na região P deste modelo.

Comparando os valores da taxa de chuva para o Estado do Maranhão propostos pelos dois modelos percebe-se uma variação de 65% para  $p = 0,01\%$  conferindo pouca confiabilidade nestes valores. Esta variação ocorre pois estes modelos não consideram as características de precipitação local para classificar estas regiões.

## 2.6.2 Dados das Estações do INMET no Maranhão

Figura 6 – Estações Meteorológicas do INMET.



Fonte: Autor.

Na Figura 6 é possível visualizar a distribuição das 12 estações do INMET em todo o território do Estado. Percebe-se pelo mapa que, apesar do número reduzido de estações, a rede do INMET é bem distribuída por todo o território. O INMET monitora a precipitação acumulada destas estações há décadas. Utiliza-se neste trabalho, os dados

das normais climatológicas que representam a média da precipitação acumulada, dada em milímetros, do ano de 1961 a 1990, ou seja, 30 anos de dados medidos.

Os dados acumulados de precipitação para o período de 1991 a 2015, embora não sejam consideradas normais climatológicas por compreender apenas 25 anos de dados (as normais climatológicas referem-se a 30 anos de registros de dados), são utilizados neste trabalho comparando seus resultados com os resultados obtidos com as normais. Estes dados podem indicar o impacto da variação na precipitação acumulada nos cálculos de atenuação por chuva.

Tabela 4 – Dados de precipitação acumulada das estações do INMET.

Cód.	Localização	Lat(°)	Lon(°)	Alt(m)	Prec. Acum.(mm)	
					1961-1990	1991-2015
82376	Zé Doca	-3,26	-45,65	45,28	1744,1	1792,0
82382	Chapadinha	-3,73	-43,35	103,50	1716,9	1607,1
82460	Bacabal	-4,21	-44,76	25,07	1606,1	1789,1
82476	Caxias	-4,86	-43,35	103,56	1690,4	1388,1
82564	Imperatriz	-5,53	-47,48	123,30	1533,3	1461,7
82571	B. do Corda	-5,50	-45,23	153,00	1122,5	1116,0
82676	Colinas	-6,03	-44,25	179,75	1316,7	1273,5
82765	Carolina	-7,33	-47,46	192,83	1724,4	1734,7
82768	Balsas	-7,53	-46,03	259,38	1231,0	1009,6
82970	Alto Parnaíba	-9,10	-45,93	285,05	1378,9	1068,4
82198	Turialvo	-1,56	-45,36	-44,06	2222,0	2148,5
82280	São Luís	-2,53	-44,21	50,86	2290,0	2068,8

Fonte: Autor.

Na Tabela 4 é possível visualizar as estações meteorológicas, suas coordenadas em décimos de grau e as precipitações acumuladas para os períodos de 1961 a 1990 e de 1991 a 2015. A primeira coluna refere-se a um código identificador da estação de coleta de dados. Nas estações de Zé Doca, Carolina e Bacabal percebe-se um aumento da precipitação acumulada entre os dois períodos. Nas demais estações, ocorreu uma diminuição desta variável.

## 2.7 Considerações Finais

Neste capítulo abordamos os principais conceitos que envolvem a taxa de chuva e a sua relação com a atenuação devido a chuva. Foram apresentados os conceitos de Zonas Climáticas e as classificações da ITU-R e CRANE. Apresentou-se os dados de precipitação acumulada média e a caracterização do Estado do Maranhão no contexto das zonas climáticas com valores de 145 *mm/h* para a região P (Modelo ITU-R) e 67 *mm/h* para a região G (Modelo CRANE). Finalmente apresentou-se os dados de precipitação acumulada

dos doze pontos de coletas de dados do INMET referentes as Normais Climatológicas (1961-1990) e dos últimos 25 anos (1991-2015).

## 3 Modelos Estatísticos para Cálculo de Taxas de Chuvas

A dificuldade na obtenção de dados reais das taxas de chuva com intervalos de integração de 1 minuto e com boa resolução espacial já foi mencionada em sessões anteriores. Esta informação, contudo, é de fundamental importância para os principais modelos no cálculo da atenuação. Visando contornar este problema existem alguns modelos propostos na literatura que estimam esta taxa de chuva a partir de dados com maiores intervalos de integração. Neste capítulo abordaremos tais modelos após uma breve explicação sobre o significado da taxa de chuva.

### 3.1 Cálculo da Taxa de Precipitação excedida $R_p$

Para o cálculo da atenuação estamos interessados em um dado valor de taxa de queda de chuva  $R_p$ (mm/h), que é excedido em uma dada percentagem de tempo, no intervalo de um ano médio, obtido através da distribuição da probabilidade cumulativa. No modelo de atenuação proposto pela ITU-R, adota-se usualmente o valor de  $p = 0,01\%$ , o que corresponde a aproximadamente 53 minutos durante o ano. Em outras palavras, a probabilidade de chover mais de  $R_p$ (mm/h), no local estudado é de  $0,01\%$  do ano.

Apesar do modelo ITU-R trabalhar com a probabilidade de  $0,01\%$ , valores de  $R_p$  para outros percentuais são também analisados. Probabilidades maiores tendem a estimar taxas menores e conseqüentemente, atenuações menores. Probabilidades menores tendem a estimar valores de  $R_p$ (mm/h) maiores.

### 3.2 Conversão para Vários Intervalos de Integração

Um método de conversão da distribuição de diversos intervalos de integração para 1 minuto que apresentou excelentes resultados para o clima no Brasil foi o proposto por (MIGLIORA; PONTES; MELLO, 2003). Este método baseia-se na distribuição de três parâmetros proposta por (MOUPFOUMA, 1987), representada de forma resumida nas equações 3.1 e 3.2. A probabilidade cumulativa da taxa de precipitação é:

$$P(R) = P(r \geq R) = 100.F(r \geq R) \quad (3.1)$$

Onde  $F(r \geq R)$  é a função de distribuição acumulativa dada por:

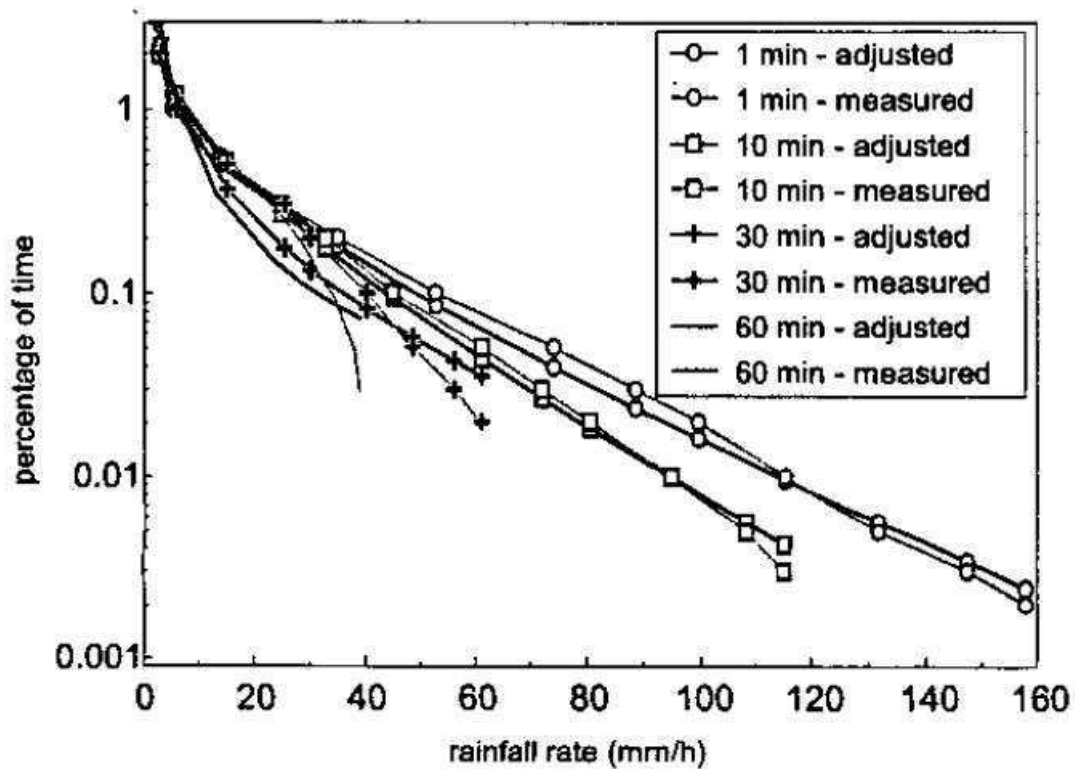
$$F(r \geq R) = aR^{-b} \exp(-\mu R) \tag{3.2}$$

A equação 3.2 é válida para  $R \geq 2$  mm/h e  $\mu = 0,025$ . Os valores de  $a$  e  $b$  são parâmetros positivos e empíricos que dependem da localização e do intervalo de tempo dos valores de precipitação disponíveis. A fórmula para a conversão de uma dada probabilidade  $P_t(R)$  com um intervalo de tempo  $t$ , que equivale a probabilidade de intervalo de tempo de 1 minuto  $P_1(R)$  para a mesma taxa de chuva  $R$  é dada por:

$$P_1(R) = \left(\frac{a_1}{a_t}\right) R^{(b_t - b_1)} \exp[(\mu_t - \mu_1)R] P_t(R) \tag{3.3}$$

A Figura 7 extraída de (MIGLIORA; PONTES; MELLO, 2003) mostra o resultado do método aplicado em 6 pontos de coletas de dados medidos em todo o Brasil e os resultados da conversão quando comparados aos valores medidos.

Figura 7 – Distribuição das taxas de chuvas medidas x ajustadas no Brasil.



Fonte:(MIGLIORA; PONTES; MELLO, 2003).

Vários outros métodos de conversão derivam do modelo Moupfouma, como o proposto por (JUNG et al., 2007). Outros métodos conhecidos são o (SEGAL, 1986), (CHEIBIL; RAHMAN, 1999) e (SINGH; TANAKA; LIDA, 2007). Contudo, todos esses modelos tendem a distanciar-se dos valores medidos em intervalos acima de 10 minutos



para probabilidades  $p$  de 0,01%, sendo que o limite máximo para estas conversões são intervalos de até 60 minutos. Essa diminuição da correlação entre os valores medidos e estimados para intervalos de tempo acima de 10 minutos dificultam a utilização de dados de precipitação registrados em sistemas de coleta das redes meteorológicas pois, frequentemente, os valores registrados são de intervalos de tempo superiores a 10 minutos. Algumas destas redes de coletas trabalham com valores acumulados em intervalos de até 3 horas.

Infelizmente, os métodos para conversão de intervalos de tempo de integração maiores para intervalos de 1 minuto não são aplicáveis aos dados meteorológicos de precipitação acumulada disponibilizadas pelo INMET visto que os intervalos mínimos de precipitação acumulada que esta instituição disponibiliza para domínio público é de 3 horas.

No item 3.3, aborda-se o método recomendado em (ITU-REC.P.837-6, 2012), baseado no conhecimento da probabilidade de chuva em 6 horas e da precipitação acumulada média anual.

### 3.3 Recomendação ITU-R para o cálculo de $R_p$

A recomendação (ITU-REC.P.837-6, 2012), no anexo I, sugere um modelo para o cálculo da taxa de chuva que excede uma certa probabilidade de tempo  $R_p$  em uma dada localização do globo a partir do banco de dados de reanálise ERA-40 com mais de 40 anos, disponibilizados pelo Centro de Previsão do Tempo Europeu (*European Center for Medium-range Weather Forecast - ECMWF*). Este método, conhecido por Solonen Poaires Baptista (SPB), foi proposto inicialmente por (SALONEN; BAPTISTA, 1997) e assimilado pela ITU-R. O método converte dados da probabilidade de chuva para um período de 6 horas na probabilidade de chuva em 1 minuto. Outros parâmetros utilizados pelo método são a precipitação média anual (ou a precipitação total) e  $\beta$  que consiste na razão entre o componente de precipitação convectiva ( $M_c$ ) pela precipitação total ( $M_t$ ). Estes parâmetros estão inclusos na base de dados reanálise ERA-40, mas podem ser substituídos por parâmetros medidos localmente caso se tenha conhecimento destes valores. Os parâmetros deste modelo são:

- $P_{r6}$ : que corresponde a probabilidade de ocorrência de chuva por período de 6 horas;
- $M_t$ : é a precipitação média total acumulada;
- $\beta$ : razão entre  $M_c$  (componente proveniente da precipitação convectiva) e  $M_t$ ;
- (lat,lon): correspondem a coordenada geográfica do ponto em estudo, sendo que lat é a latitude e lon a longitude da coordenada;

- $R_p$ : é a taxa de chuva (em mm/h) que excede dado percentual de tempo  $p$  de um ano médio. A  $R_{0,01}$  é a taxa de chuva excedida em 0,01% do tempo de um ano médio, o que equivale a aproximadamente 53 minutos durante um ano;
- $M_s$ : é a precipitação proveniente de sistemas estratiformes.

Onde os componentes das precipitações com origens convectivas e estratiformes são obtidas por:

$$M_c = \beta M_t \quad (3.4)$$

$$M_s = (1 - \beta)M_t \quad (3.5)$$

A equação do percentual de probabilidade de chuva em um ano médio é:

$$P_0(lat, lon) = P_{r6}(lat, lon) \left(1 - e^{-0,0079 \frac{M_s(lat, lon)}{P_{r6}(lat, lon)}}\right) \quad (3.6)$$

Considerando um resultado diferente de zero para  $P_0(lat, lon)$  na equação 3.6 o valor de  $R_p$  será determinada pela equação 3.7:

$$R_p(lat, lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.7)$$

Onde os parâmetros da equação 3.7 são calculados pelas equações 3.8, 3.9 e 3.10:

$$A = ab \quad (3.8)$$

$$B = a + cC \quad (3.9)$$

$$C = \ln\left(\frac{p}{P_0(lat, lon)}\right) \quad (3.10)$$

Sendo que:

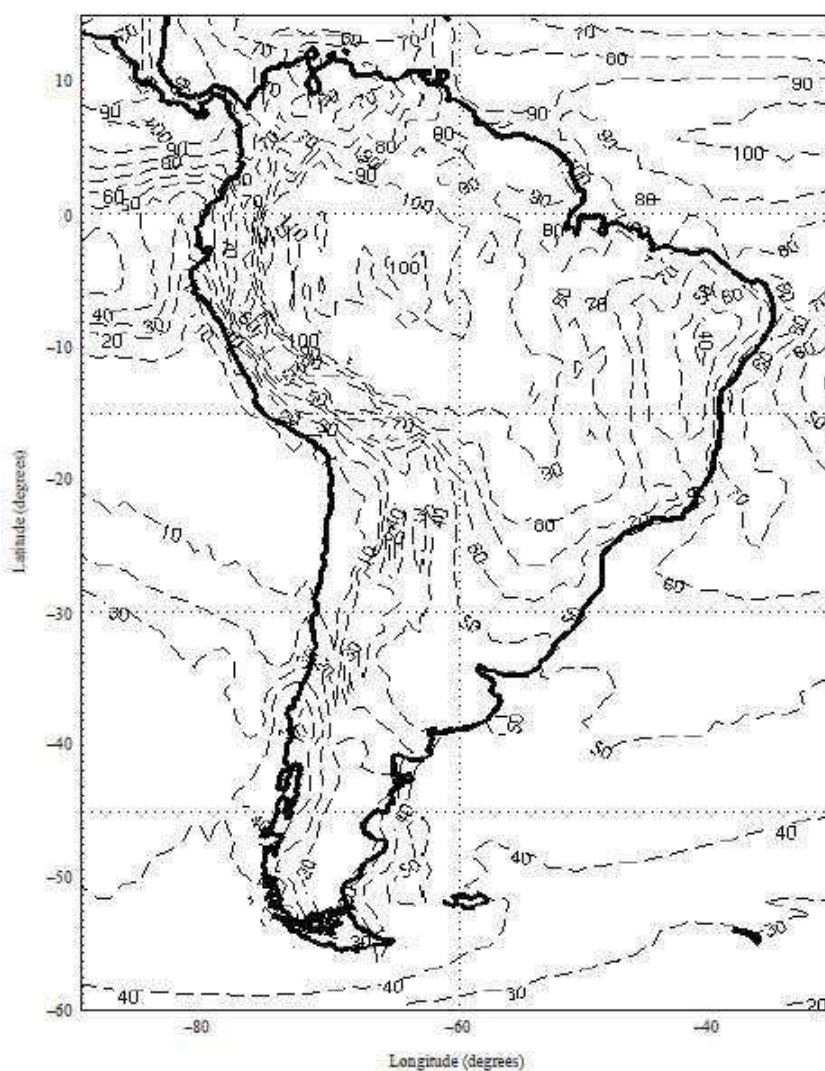
$$a = 1,09 \quad (3.11)$$

$$b = \frac{M_t(lat, lon)}{21797P_0(lat, lon)} \quad (3.12)$$

$$c = 26,02b \quad (3.13)$$

O resultado deste modelo é um mapa de contorno para todo o globo terrestre. Este mapa com recortes para todos os continentes, é disponibilizado por (ITU-REC.P.837-6, 2012), conforme visto na Figura 8 para a América do Sul.

Figura 8 – Taxa de chuva(mm/h) que excede a 0,01% de um ano médio.



Fonte: (ITU-REC.P.837-6, 2012).

### 3.4 Considerações Finais

Neste capítulo abordou-se os principais métodos para estimar a taxa de precipitação. Dedicou-se especial atenção ao método ITU-R 837.6 que baseia-se no conhecimento da precipitação média acumulada e na probabilidade de chuva em 6 horas. Este modelo que

utiliza o banco de dados ERA-40, que diferencia a percentagem de chuvas de origem convectias e estratiformes.

Observa-se finalmente, o mapa gerado a partir desse modelo para toda a América do Sul que serve de base para estimar dados de precipitação em locais onde não há medições diretas desses valores.

No capítulo 4, abordaremos os principais modelos para o cálculo da atenuação para enlaces terrestres.

## 4 Atenuação Devido à Chuva para Enlaces Terrestres

### 4.1 Modelo CRANE

O Modelo Crane é composto por duas funções exponenciais no comprimento do enlace para distâncias de até 22,5 km. A primeira função representada pela equação 4.1 cujo comprimento  $D$  vai de 0 até uma distância  $x$ , e a segunda apresentada pela equação 4.2 representa a distância  $L$  que complementa o primeiro percurso, de  $x$  até os 22,5 km.

$$A_{(dB)} = k \cdot R_p^\alpha \left[ \frac{e^{\mu a D} - 1}{\mu a} \right]; \text{ quando } 0 \leq D \leq d(\text{km}) \quad (4.1)$$

$$A_{(dB)} = k \cdot R_p^\alpha \left[ \frac{e^{\mu a D} - 1}{\mu a} - \frac{g^a \cdot e^{ca d}}{c \cdot a} + \frac{g^a \cdot e^{ca D}}{c \cdot a} \right]; \text{ quando } d \leq D \leq 22,5(\text{km}) \quad (4.2)$$

Onde os coeficientes  $g$ ,  $c$  e  $d$  são funções de  $R_p$  obtidos por:

$$g = 2,3 \cdot R_p^{-0,17}, c = 0,026 - 0,03 \cdot \ln R_p \text{ e } d = 3,8 - 0,6 \cdot \ln R_p \quad (4.3)$$

$$\mu = \frac{\ln(g \cdot e^{cd})}{2} \quad (4.4)$$

O Modelo prevê que, no caso de distâncias maiores que 22,5 km, deve-se utilizar uma nova taxa de precipitação  $R'_p$  calculada por:

$$R'_p = R_p \left( \frac{22,5}{D} \right) \quad (4.5)$$

A atenuação específica do modelo  $\gamma_{(dB/km)}$  é a apresentada na equação 2.2. Sendo  $\alpha$  e  $k$  parâmetros dependentes da frequência e da polarização do sinal, obtidos pelas equações 4.6 e 4.7:

$$k = \left( \frac{1}{2} \right) [k_h + k_v + (k_h - k_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau] \quad (4.6)$$

$$\alpha = \left( \frac{1}{2k} \right) [k_h \cdot \alpha_h + k_v \cdot \alpha_v + (k_h \cdot \alpha_h - k_v \cdot \alpha_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau] \quad (4.7)$$

Onde:

- $\theta$  é o ângulo de elevação;
- $\tau$  é o ângulo de inclinação da polarização em graus com relação a horizontal. Para polarização circular é  $\tau = 45^\circ$ ;
- $k_h, k_v, \alpha_h$  e  $\alpha_v$  são parâmetros de regressão cujos valores são em função da frequência, conforme apresentados na Tabela 5 contida em (ITU-REC.P.838-1, 1999).

Tabela 5 – Valores de  $k_h, \alpha_h, k_v$  e  $\alpha_v$  em função da frequência.

Frequência(GHz)	$k_h$	$\alpha_h$	$k_v$	$\alpha_v$
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1.5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129
40	0,4431	0,8673	0,4274	0,8421
50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
60	0,8606	0,7656	0,8515	0,7486

Fonte: Adaptada de (ITU-REC.P.838-1, 1999).

A Tabela 5 reproduz parcialmente os dados da tabela contida em (ITU-REC.P.838-1, 1999). A Tabela original contém dados de frequências de 1 a 1000 GHz. Para frequências que não encontram-se em (ITU-REC.P.838-1, 1999), é possível obter os valores de  $\alpha$  através de interpolação logarítmica e de  $k$  por meio de uma interpolação linear. Considerando-se que  $f_1, \alpha_1, k_1$  e  $f_2, \alpha_2, k_2$  são os dados conhecidos das frequências inferior e superior de uma dada frequência  $f$  sem dados estabelecidos na Tabela 5, obtém-se os valores desta frequência intermediária através das equações 4.8 e 4.9:

$$k_f = \log^{-1} \left\{ \log \frac{k_2}{k_1} \left[ \frac{\log \left[ \frac{f}{f_1} \right]}{\log \left[ \frac{f_2}{f_1} \right]} + \log k_1 \right] \right\} \quad (4.8)$$

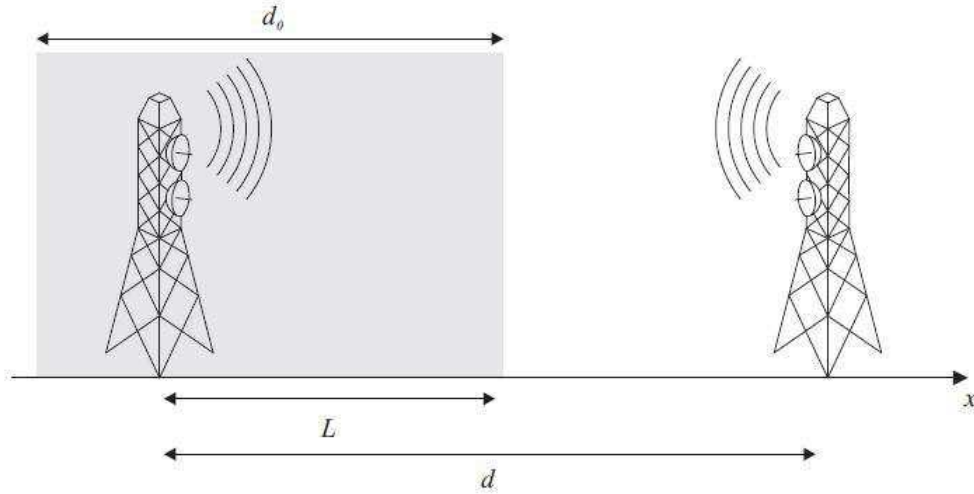
$$\alpha_f = \left\{ [\alpha_1 - \alpha_2] \left[ \frac{\log \left[ \frac{f}{f_1} \right]}{\log \left[ \frac{f_2}{f_1} \right]} \right] + \alpha_2 \right\} \quad (4.9)$$

## 4.2 Modelo ITU-R

O modelo proposto pela recomendação (ITU-REC.P.530-16, 2015) depende do conhecimento da atenuação específica abordada na recomendação (ITU-R 838-1,1999) (ITU-REC.P.838-1, 1999). O modelo toma como base uma célula equivalente com taxa de precipitação constante e com raio  $d_0$  para modelar a precipitação ao longo do percurso

do enlace. A célula pode interceptar o enlace em qualquer posição, conforme observado na Figura 9. Calcula-se a distância efetiva ou  $L$ , que representa o comprimento médio da intersecção entre a célula de chuva e o enlace.

Figura 9 – Intersecção entre a célula de chuva com dimensão  $d_0$  e o enlace  $d$ .



Fonte: (FAGUNDES, 2014).

Este modelo leva em consideração a atenuação excedida em 0,01 do tempo em um ano médio, calculado pela equação 4.10:

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{eff} \text{ (dB)} \quad (4.10)$$

Sendo que a atenuação específica na equação 4.10 é dada por  $\gamma_R = k \cdot R^\alpha$ .

A distância efetiva é dada pela equação 4.11:

$$d_{eff} = \frac{1}{d_0 + d} \int_{-d_0}^d L(x) dx = r \cdot d = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \cdot d \text{ (dB)} \quad (4.11)$$

Onde  $d$  é o comprimento total do enlace (distância entre as duas antenas) e  $d_0$  é o fator que associa a intensidade da chuva à dimensão da célula de chuva. Ou seja, quanto maior a intensidade da chuva menor será a dimensão da distância entre enlaces que ela influencia. Este fator é obtido através da equação 4.12:

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 \cdot R_{0,01}} \text{ km, quando } R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (4.12)$$

Quando  $R_{0,01} > 100 \text{ mm/h}$ , adota-se o valor de  $100 \text{ mm/h}$ . Os valores de  $k$  e  $\alpha$  da equação são coeficientes determinados em função da frequência  $f$ , já descritos no modelo Crane e calculados através das equações 4.6 e 4.7 com dados obtidos da Tabela 5. Caso

não se tenha acesso a Tabela 5 pode-se calcular os valores de  $k$  e  $\alpha$  através das equações 4.13 e 4.14:

$$\log_{10}k = \sum_{j=1}^4 a_j \cdot \exp\left[-\left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j}\right)^2\right] + m_k \cdot \log_{10}f + c_k \quad (4.13)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \cdot \exp\left[-\left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j}\right)^2\right] + m_a \cdot \log_{10}f + c_a \quad (4.14)$$

Onde  $f$  é a frequência em GHz,  $k$  é o coeficiente de polarização horizontal  $k_h$  ou coeficiente de polarização vertical  $k_v$ . O  $\alpha$  se refere a polarização horizontal  $\alpha_h$  ou a polarização vertical  $\alpha_v$ . As constantes para o cálculo dos valores de  $k_h$ ,  $k_v$ ,  $\alpha_h$  e  $\alpha_v$  são apresentadas nas Tabelas 6, 7, 8 e 9 extraídas da ITU-R 838-3 (ITU-REC.P.838-1, 1999):

Tabela 6 – Coeficientes de  $k_h$ .

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-5,33980	-0,10008	1,13098		
2	-0,35351	1,26970	0,45400	-0,18961	0,71147
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Fonte: (ITU-REC.P.838-1, 1999).

Tabela 7 – Coeficientes de  $k_v$ .

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-3,80595	-0,56934	0,81061		
2	-3,44965	-0,22911	0,51059	-0,16398	0,63297
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	-0,50167	1,07319	0,27195		

Fonte: (ITU-REC.P.838-1, 1999).

Tabela 8 – Coeficientes de  $\alpha_h$ .

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-0,14318	1,82442	0,55187		
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164	0,67849	-1,95537
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Fonte: (ITU-REC.P.838-1, 1999).

Para polarizações circulares os coeficientes de  $k$  e  $\alpha$  são obtidos através das equações 4.6 e 4.7 já descritas no modelo Crane.



Tabela 9 – Coeficientes de  $\alpha_v$ .

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-0,07771	2,33840	-0,76280		
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809	-0,053739	0,83433
4	-48,2991	-0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Fonte: (ITU-REC.P.838-1, 1999).

A partir das equações 4.6, 4.7, 4.13, 4.14, constrói-se a Tabela 5 que relaciona coeficientes com as frequências em que se quer estimar a atenuação por chuva.

A atenuação por chuva excedida para outros tempos percentuais é calculada pela equação 4.15 para latitudes maiores ou iguais a  $30^\circ$  :

$$A_p(dB) = A_{0,01} \cdot 0,12 \cdot p^{-(0,546 - 0,0431 \cdot \log_{10} p)} \quad (4.15)$$

Onde  $p$  é o percentual entre 0,001% e 1%.

Para valores com latitude inferiores a  $30^\circ$ , a atenuação é calculada pela equação 4.16:

$$A_p(dB) = A_{0,01} \cdot 0,07 \cdot p^{-(0,855 - 0,139 \cdot \log_{10} p)} \quad (4.16)$$

### 4.3 Modelo Australiano

O modelo australiano é baseado em medições de 34 enlaces operando a 11 GHz e entre 5,1 e 58 km em acréscimo ao valor do banco de dados da ITU-R. A partir da análise destes enlaces, o comprimento efetivo do modelo ITU-R foi ajustado e passou a ser calculado pelas equações 4.17 e 4.18:

$$d_0 = 65 \cdot e^{-0,0111 \cdot R_{0,01}} \text{ km, quando } R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (4.17)$$

$$d_0 = 65 \cdot e^{-0,011} \text{ km, quando } R_{0,01} > 100 \text{ mm/h} \quad (4.18)$$

A atenuação é obtida através da equação 4.19.

$$A_p(dB) = A_{0,01} \cdot 0,12 \cdot p^{-(0,546 - 0,043 \cdot \log_{10} p)} \quad (4.19)$$

## 4.4 Modelo Brasileiro

O modelo documento (3M/208, 2007) ou modelo Brasileiro, foi desenvolvido a partir de dados experimentais medidos no Brasil e emprega o conceito de taxa de chuva efetiva com o objetivo de permitir a obtenção de comprimentos efetivos de enlace maiores que o comprimento real. A taxa de chuva efetiva é dada pela equação 4.22 e utilizada na equação 4.23 para o cálculo da atenuação:

$$r_p = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0(p)}} \quad (4.20)$$

$$d_0(p) = 191.R_p^{-0,244} \quad (4.21)$$

$$R_{eff}(p) = 1,763.R_p^{-0,753 + \frac{0,197}{d}} \quad (4.22)$$

$$A_p = k.R_{eff}^\alpha(p).d.r_p \text{ (em dB)} \quad (4.23)$$

Este método é válido para frequências de até 60 GHz e comprimento de enlaces de até 60 km.

## 4.5 Considerações Finais

Neste capítulo abordou-se quatro modelos que possibilitam o cálculo da atenuação devido a chuva para enlaces terrestres: O modelo CRANE, o modelo ITU-R, o modelo Australiano e o modelo (3M/208, 2007) (Brasileiro). O modelo CRANE leva em conta a estrutura da chuva e sua estrutura espacial. Utiliza duas funções exponenciais para representar todo o comprimento do enlace até 22,5 km. Este modelo pode ser calculado para qualquer percentagem de tempo  $p$ . A principal vantagem deste modelo é o fato de ter sido elaborado a partir de dados com cobertura espacial limitada.

O segundo modelo abordado é o modelo oficial ITU-R, presente na recomendação (ITU-REC.P.530-16, 2015). Este modelo toma como base uma célula de chuva equivalente para encontrar o comprimento do enlace que, de fato, é atingido pela precipitação. Este modelo considera que, para taxas de chuva superiores a 100 mm/h deve-se utilizar a taxa de precipitação igual a 100 mm/h. Os coeficientes de  $k$  e  $\alpha$  devem ser calculados a partir das tabelas com valores encontrados em (ITU-REC.P.838-1, 1999).

Outro modelo é o Australiano, baseado em medições de 34 enlaces operando a 11 GHz, acrescido do banco de dados da ITU-R que permitiu ajustes no cálculo do comprimento efetivo, apresentados nas equações 4.17 e 4.18.

Finalmente o modelo Brasileiro foi elaborado a partir de dados experimentais do Brasil e emprega o conceito de taxa de chuva efetiva do enlace. Este modelo visa adequar o modelo ITU-R as características climáticas de climas equatorial e tropical.

## 5 Mapa de Contorno das Taxas de Chuva para o Maranhão

Com os dados de precipitação acumulada  $M_t$  do INMET descritos em 2.6.2, substituiu-se os dados da base ERA-40 nas equações 3.4, 3.5 e 3.12. Estes dados foram interpolados a partir das coordenadas geográficas dos 12 pontos de coleta, gerando mapas de estatísticas de chuvas utilizando o modelo descrito na sessão 3.3. Em seguida utilizou-se estas coordenadas para gerar um mapa com os dados de reanálise ERA-40.

Foram gerados mapas a partir de dados do INMET utilizando as Normais Climatológicas de 1961 a 1990 e os dados mais recentes de 1991 a 2015. Importante mencionar que, segundo a OMM (Organização Meteorológica Mundial), as Normais Climatológicas compreendem períodos de 30 anos de dados. O período de 1991 a 2015, embora possa ser analisado para estudos específicos, só comporão as Normais em 2020. A partir da precipitação total, calculou-se as componentes convectivos e estratiformes por meio das equações 3.3 e 3.4. Em seguida o percentual de probabilidade de chuva em um ano médio é calculado por meio da equação 3.6.

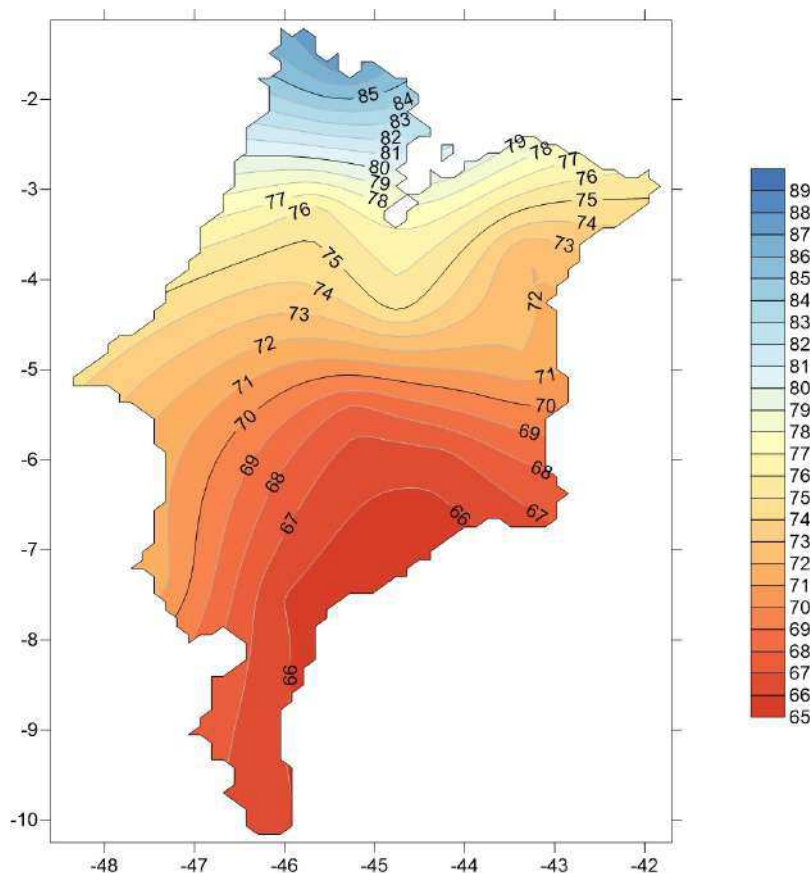
Os dados do INMET não distingue o percentual de precipitação proveniente de sistemas convectivos. Utilizou-se então o valor de  $\beta$  estimado pelo próprio banco ERA-40. A partir destes dados foram gerados os seguintes mapas:

- MAPA 01 - Mapa de Contorno utilizando banco reanálise ERA-40;
- MAPA 02 - Mapa de Contorno utilizando  $M_t$  das Normais Climatológicas e banco reanálise ERA-40;
- MAPA 03 - Mapa de Contorno utilizando  $M_t$  de precipitações acumuladas das estações INMET (1991-2015) e banco reanálise ERA-40.

### 5.1 Mapas de Contorno de $R_{0,01}$

O mapa de contorno gerado para  $R_{0,01}$  utilizando as normais climatológicas do INMET e o banco reanálise ERA-40 é apresentado na Figura 10 e é denominado MAPA 01. A Figura 11 apresenta o MAPA 02 gerado somente com os dados da reanálise ERA-40. A Figura 12 apresenta o MAPA 03 com dados do INMET para os últimos 25 anos.

Quando os MAPAS 02 e 03 das Figuras 11 e 12 são comparados ao mapa gerado a partir da base reanálise ERA-40 (MAPA 01 da Figura 10), nota-se que o ERA-40

Figura 10 – MAPA 01 com  $R_{0,01}$  utilizando ERA-40.

Fonte: Autor.

subestima as intensidades de chuva para a grande São Luís. Os resultados indicam uma tendência da variação da intensidade de chuva em função da diminuição da precipitação média acumulada para a mesma probabilidade de chuva em 6 horas. Na Tabela 11 é possível visualizar as taxas de chuva para os 12 municípios onde as estações de coleta estão instaladas.

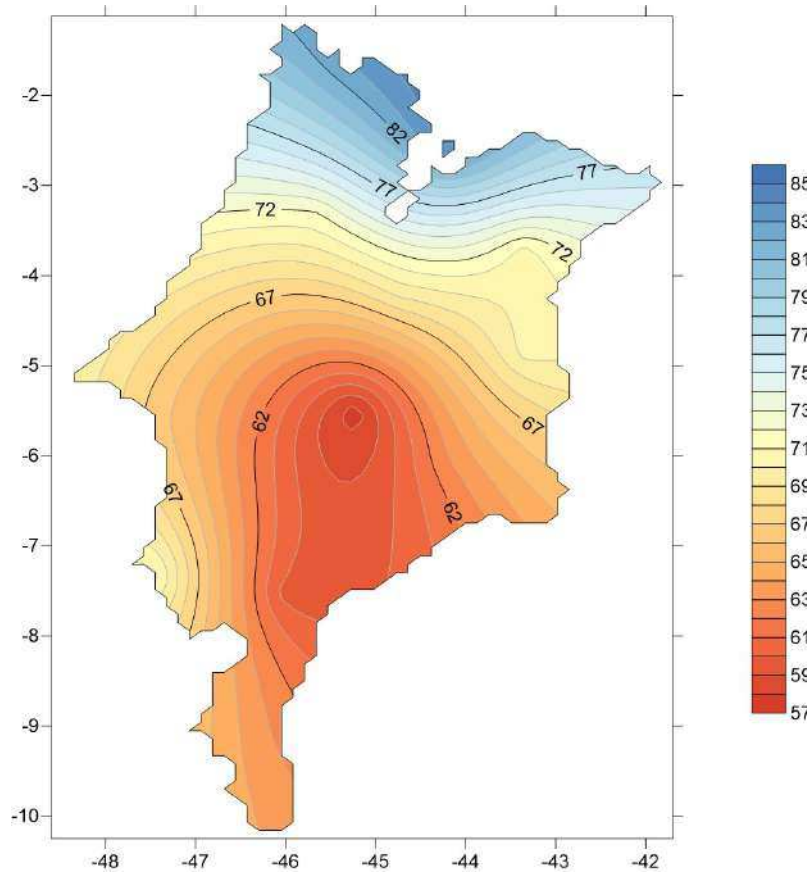
É possível observar que nas estações de Zé Doca e Carolina ocorreu sensível aumento na taxa de chuva quando utiliza-se dados do INMET dos 25 anos mais recentes. Nota-se na Tabela 10 que os maiores decréscimos foram apresentados em Municípios com grande aumento do crescimento demográfico ou de atividades agrícolas, como em São Luís (2,69 mm/h), Caxias (5,2 mm/h) e Balsas (5 mm/h).

## 5.2 Cálculo do erro percentual para a $R_{0,01}$

O erro percentual  $\varepsilon$  (%) pode ser calculado a utilizando-se a equação 5.1:

$$\varepsilon(\%) = \left[ \frac{R_{est} - R_{med}}{R_{med}} \right] \cdot 100(\%) \quad (5.1)$$

Figura 11 – MAPA 02 com  $R_{0,01}$  utilizando ERA-40 e Normais.



Fonte: Autor.

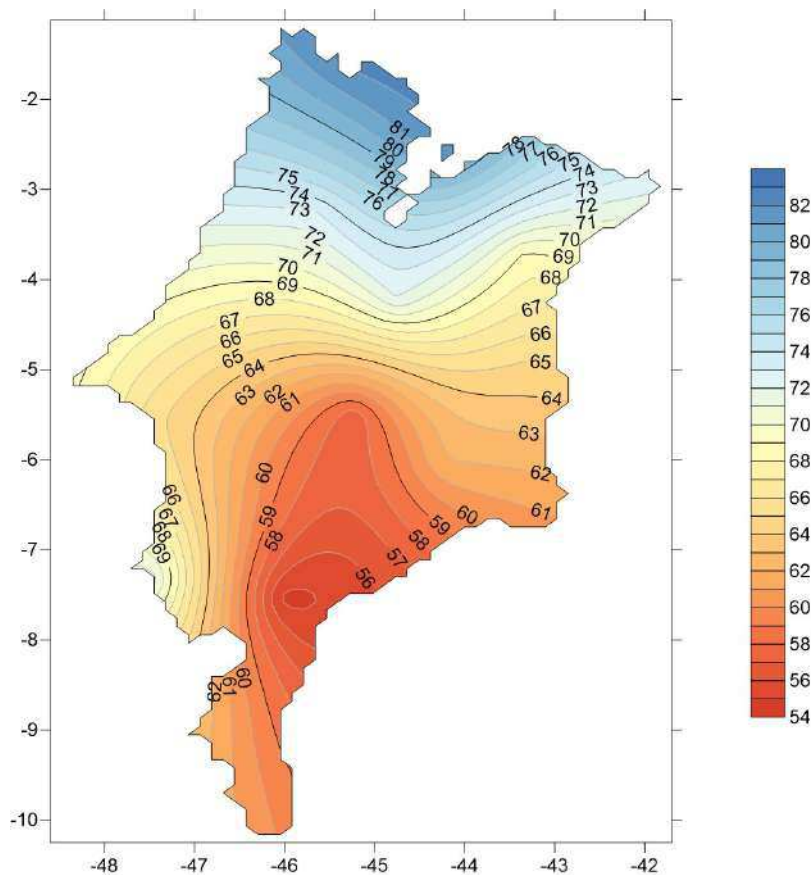
Tabela 10 – Valores de  $R_{0,01}$  para os 12 Locais de Monitoramento(mm/h).

Localidade	MAPA 01	MAPA 02	MAPA 03
São Luís	77,57	84,51	81,82
Turiaçu	84,48	83,11	82,22
Chapadinha	68,46	70,58	68,79
Zé Doca	77,58	77,38	78,08
Caxias	68,48	70,33	65,13
Imperatriz	68,61	66,64	65,41
B.do Corda	63,94	57,47	57,33
Colinas	63,01	62,75	61,89
Carolina	68,19	71,32	71,48
Balsas	62,56	59,71	54,71
Alto Parnaíba	62,56	62,67	58,48

Fonte: Autor.

Onde  $R_{est}$  representa os valores considerados estimados da base de dados ERA-40 e  $R_{med}$  são os valores calculados a partir dos dados de medições da precipitação do INMET (Normais e 25 anos). Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Figura 12 – MAPA 03 com  $R_{0,01}$  utilizando ERA-40 e últimos 25 anos.



Fonte: Autor.

Tabela 11 – Erro percentual  $\varepsilon(\%)$

Localidade	ITU-NORMAIS	ITU-25 ANOS
São Luís	8,94	5,47
Turiação	-1,62	-2,67
Chapadinha	3,10	0,49
Zé Doca	0,32	1,30
Caxias	2,69	-4,89
Imperatriz	-2,87	-4,66
B.do Corda	-10,11	-10,33
Colinas	-0,41	-1,76
Carolina	4,59	4,82
Balsas	-4,56	-12,55
Alto Parnaíba	0,17	-6,52

Fonte: Autor.

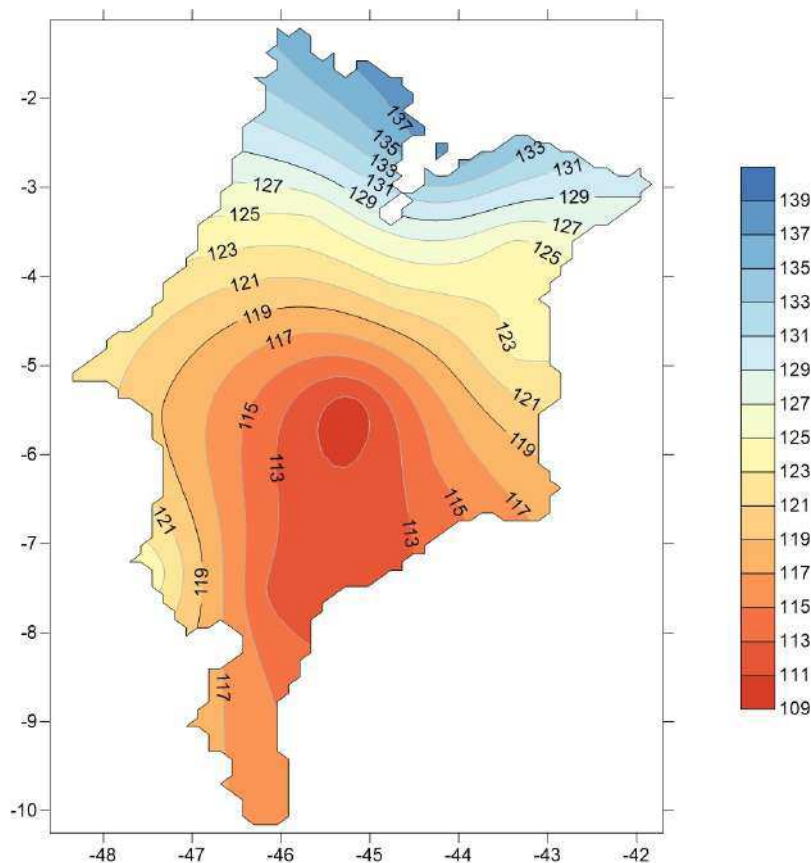
Os erros quadráticos médio (EQMs) das Normais e dos últimos 25 anos, em relação a precipitação do reanálise ERA-40 calculados a partir da Tabela 11 são, respectivamente, 10,98% e 14,98%. O acréscimo de 4% entre ambos os períodos indica maior variação da

intensidade de chuva em razão da variação de precipitação acumulada medida, supondo que a percentagem de chuva convectiva em relação a precipitação acumulada total permaneça a mesma. Esta suposição deve ser aceita pois os dados disponíveis referem-se a precipitação total, sem informações sobre o valor de  $\beta$  para estas medições.

### 5.3 Mapas de Contorno para outras percentagens $R_p$

O Modelo ITU-R que estima a taxa de chuva para  $p=0,01\%$  pode ser utilizada para estimar taxas de chuvas com outras percentagens de tempo. Estes valores são usados no cálculo de disponibilidades distintas da percentagem definidas pela ITU-R, como por exemplo, em projetos de sistemas críticos com aplicação militar. Nas Figuras 13, 14 e 15 apresentam-se mapas das taxas de chuvas para os seguintes percentuais: 0,001%; 0,1% e 1%, gerados a partir das normais climatológicas:

Figura 13 – MAPA 04 com  $R_{0,001}$  utilizando ERA-40 e Normais.

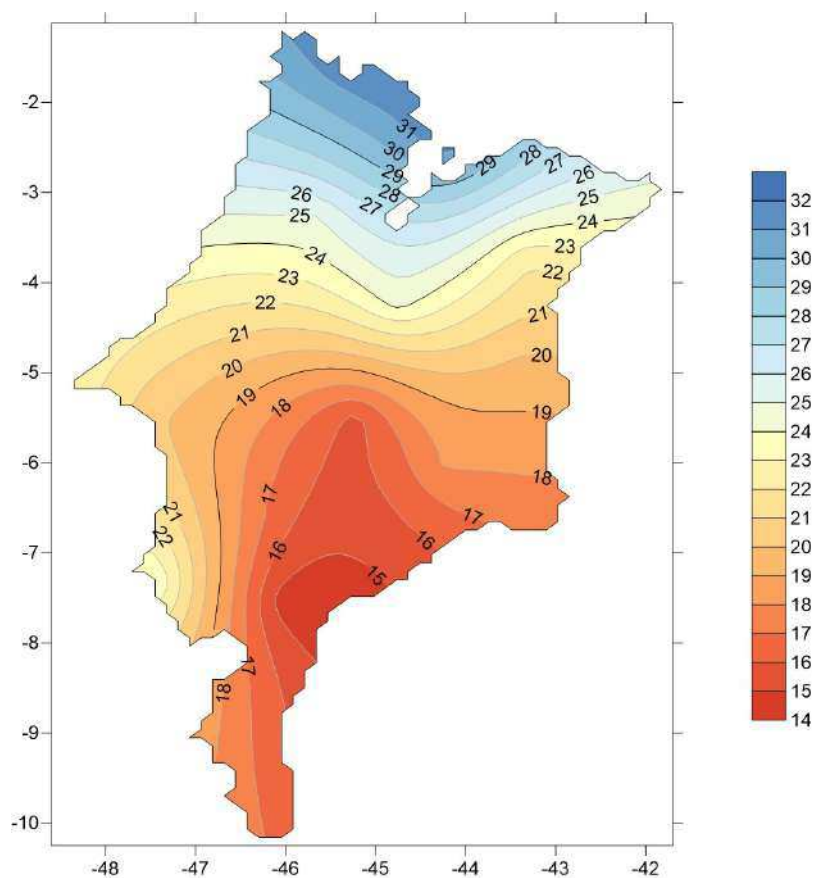


Fonte: Autor.

Percebe-se pelo gráfico apresentado na Figura 16, gerada a partir dos dados das normais climatológicas de São Luís provenientes dos valores extraídos dos mapas das Figuras 11, 13, 14 e 15 que, quanto maior a percentagem de tempo em relação ao um ano



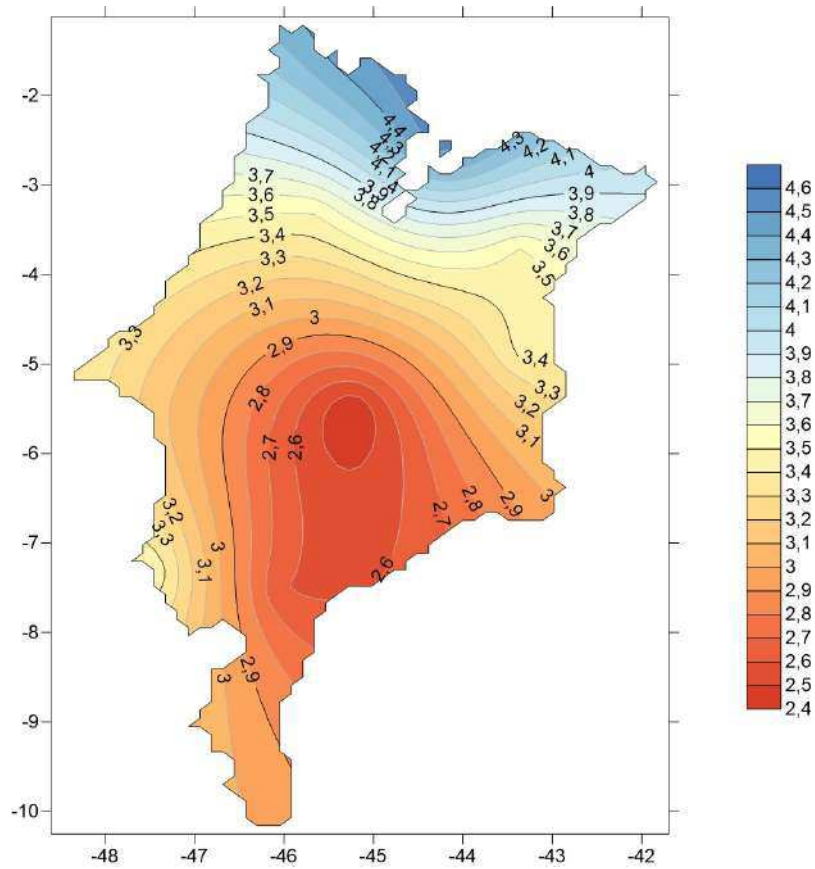
Figura 14 – MAPA 05 com  $R_{0,1}$  utilizando ERA-40 e Normais.



Fonte: Autor.

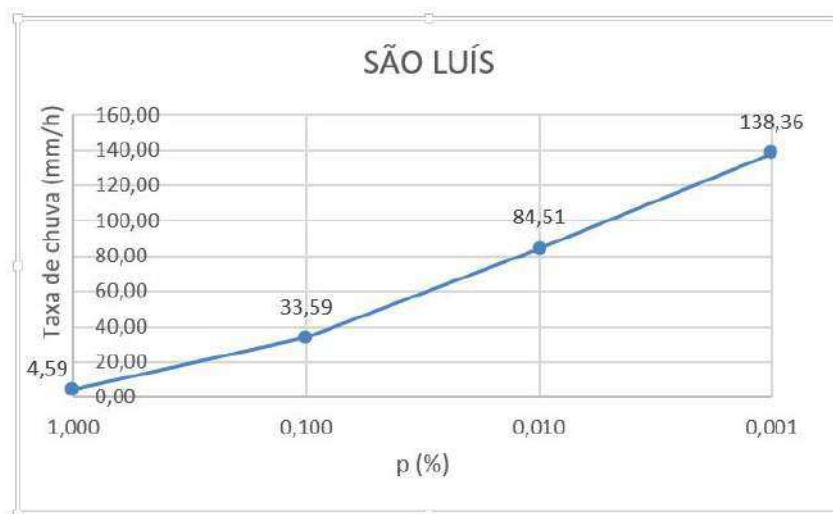
médio, menor será a intensidade de chuva, apresentando os valores de  $R_1 = 4,59$  mm/h,  $R_{0,1} = 33,59$  mm/h,  $R_{0,01} = 84,51$  mm/h e  $R_{0,001} = 138,36$  mm/h.

Figura 15 – Mapa 06 com  $R_1$  utilizando ERA-40 e Normais.



Fonte: Autor.

Figura 16 –  $R_p(\text{mm/h}) \times p(\%)$  das normais climatológicas em São Luís.



Fonte: Autor.

## 5.4 Considerações Finais

Neste capítulo utilizou-se os dados do banco ERA-40 e das precipitações medias acumuladas para gerar os mapas de contorno para as percentagens de tempo 1%; 0,1%; 0,01% e 0,001% para todo o Estado do Maranhão através de interpolação bilinear. Foram gerados três mapas: o primeiro com dados de precipitação acumulada do ERA-40, o segundo com dados de precipitação acumulada das normais climatológicas do INMET e o terceiro com dados de precipitação acumulada dos últimos 25 anos (1991-2015). Foi possível observar que nas estações de Zé Doca e Carolina ocorreu um aumento das taxas de chuva quando comparadas com os dados das normais climatológicas. Percebe-se que, mesmo com a diminuição da precipitação acumulada nas demais estações de coleta, os valores das taxas de precipitação são superiores aos valores estimados através da base de dados ERA-40. No capítulo 6, abordaremos os resultados do cálculo da atenuação a partir destas taxas de chuvas.

## 6 Resultados e Discussões

Os valores numéricos das taxas de chuva obtidos a partir dos dados do INMET para diferentes percentagens de tempo são apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14:

Tabela 12 –  $R_p$ (mm/h) x  $p$ (%) utilizando reanálise ERA-40.

Cód.	Percentagem de Tempo $p$ (%)								
	0,001	0,00285	0,0057	0,00856	0,01	0,0287	0,03425	0,1	1
82198	138,32	113,70	97,52	88,08	84,49	60,45	56,50	33,64	4,68
82280	131,23	106,67	90,54	81,15	77,58	53,78	49,90	27,86	3,52
82376	125,10	100,69	84,71	75,44	71,92	48,67	44,93	24,30	3,50
82382	121,41	97,07	81,17	71,95	68,46	45,52	41,86	22,07	3,24
82460	125,51	101,11	85,14	75,87	72,35	49,11	45,37	24,74	3,65
82476	121,44	97,10	81,19	71,98	68,48	45,53	41,86	22,06	3,23
82564	121,52	97,20	81,30	72,10	68,61	45,71	42,06	22,32	3,37
82571	116,49	92,28	76,50	67,39	63,94	41,52	37,99	19,51	3,02
82676	115,59	91,36	75,57	66,46	63,01	40,59	37,07	18,73	2,78
82765	121,17	96,82	80,91	71,69	68,19	45,23	41,57	21,80	3,14
82768	115,03	90,84	75,09	66,00	62,57	40,27	36,79	18,67	2,87
82970	114,98	90,74	74,94	65,82	62,37	39,93	36,42	18,15	2,59

Fonte: Autor.

Tabela 13 –  $R_p$ (mm/h) x  $p$ (%) utilizando as normais climatológicas.

Cód.	Percentagem de Tempo $p$ (%)								
	0,001	0,00285	0,0057	0,00856	0,01	0,0287	0,03425	0,1	1
82198	136,91	112,3	96,13	86,70	83,11	59,12	55,19	32,48	4,45
82280	138,37	113,75	97,55	88,11	84,51	60,45	56,50	33,60	4,59
82376	125,34	100,93	84,95	75,67	72,15	48,88	45,14	24,47	3,52
82382	123,65	99,28	83,34	74,09	70,59	47,49	43,78	23,53	3,48
82460	122,19	97,83	81,90	72,67	69,18	46,15	42,48	22,50	3,28
82476	123,39	99,02	83,08	73,84	70,33	47,24	43,54	23,33	3,43
82564	119,44	95,15	79,29	70,12	66,64	43,90	40,29	21,01	3,15
82571	109,55	85,47	69,84	60,86	57,48	35,76	32,43	15,82	2,40
82676	115,31	91,09	75,30	66,20	62,75	40,35	36,85	18,57	2,75
82765	124,46	100,06	84,10	74,84	71,33	68,38	44,42	23,96	3,49
82768	111,96	87,83	72,15	63,12	59,72	37,73	34,33	17,04	2,61
82970	115,14	90,95	75,20	66,11	62,68	40,37	36,88	18,74	2,88

Fonte: Autor.

Os valores resultaram em mapas com sensível diferença na distribuição espacial da taxa chuva para o território. Considerando que o fenômeno da precipitação possui

Tabela 14 –  $R_p$ (mm/h) x  $p$ (%) utilizando dados dos últimos 25 anos.

Cód.	Porcentagem de Tempo $p$ (%)								
	0,001	0,00285	0,0057	0,00856	0,01	0,0287	0,03425	0,1	1
82198	135,99	111,40	95,23	85,81	82,23	58,27	54,34	31,74	4,30
82280	135,60	111,01	94,84	85,41	81,82	57,86	53,93	31,33	4,15
82376	126,08	101,66	85,66	76,38	72,85	49,54	45,79	24,98	3,61
82382	121,77	97,42	81,51	72,29	68,80	45,83	42,16	22,30	3,28
82460	125,14	100,75	84,78	75,51	72,00	48,78	45,05	24,48	3,61
82476	117,90	93,62	77,77	68,60	65,13	42,45	38,86	19,87	2,87
82564	118,14	93,87	78,03	68,88	65,41	42,77	39,19	20,22	3,02
82571	109,39	85,32	69,69	60,71	57,33	35,64	32,31	15,74	2,39
82676	114,40	90,19	74,43	65,34	61,90	39,59	36,10	18,06	2,67
82765	124,63	100,23	84,26	75,00	71,49	48,29	44,56	24,07	3,51
82768	106,54	82,53	66,98	58,07	54,72	33,39	30,16	14,44	2,18
82970	110,82	86,66	70,94	61,90	58,49	36,47	33,08	15,95	2,25

Fonte: Autor.

distribuição espacial e temporal relativamente complexa de serem previstas, os mapas de contorno e a utilização dos dados de precipitação pontuais podem contribuir para a melhoria na predição de chuvas intensas que possam causar interrupção de sinais de comunicação que utilizam frequências sensíveis a esse fenômeno. Modelos como o apresentado por (VELASCO-CASILLAS et al., 2008) utilizam dados de precipitação de estações meteorológicas em tempo quase real para calcular a atenuação por chuva em diversas faixas de frequência e gerar mapas de contorno. Com os dados de taxas de chuva adquiridos para  $p=0,01\%$  é possível realizar simulações para enlaces terrestres utilizando os modelos de cálculo de atenuações mencionados no capítulo 4.

Para estudo de caso optou-se por um enlace com frequência  $f=20$  GHz, de 1 km localizado em São Luís (latitude =  $-2,530^\circ$ ), com polarização circular  $\tau=45^\circ$ .

Utilizou-se os modelos ITU-R, brasileiro, australiano e o Crane para o cálculo da atenuação para  $0,01\%$  ( $A_{0,01}$ ) aplicando as taxas de chuva adquiridas através dos MAPAS 01, 02 e 03 apresentados no item 5.1 e os valores de  $R_p$  das zonas de P região climática ITU e da região climática G do modelo CRANE. Os resultados podem ser vistos na Tabela 15.

É possível observar na Tabela 15 que o modelo ITU-R subestima os valores de atenuação devido a chuva, quando comparados aos modelos Brasileiro e Australiano.

Percebe-se também que, os valores calculados para a atenuação utilizando os dados de precipitação dos últimos 25 anos excedem os valores estimados pela taxa de chuva da ITU-R, embora sejam inferiores aos valores estimados pelas Normais Climatológicas. Percebe-se que o modelo ITU-R subestima os valores de taxa de chuva e atenuação para

Tabela 15 – Atenuação dos Modelos Australiano, Brasileiro, ITU em função das taxas de chuva para  $p = 0,01\%$ ,  $f=20$  GHz e distância de 1km em São Luís

Origem de $R_p$	$R_p(mm/h)$	Atenuação $A_{0,01}$ , segundo cada modelo(dB)			
		Australiano	Brasileiro	ITU	Crane
$R_p$ do MAPA01	77,57	7,3574	10,9496	6,9789	7,5896
$R_p$ do MAPA02	84,51	8,0458	11,9477	7,5829	8,2734
$R_p$ do MAPA03	81,82	7,7791	11,5607	7,3504	8,0002
$R_p$ Zona G Crane	67,00	6,3088	9,4335	6,0358	6,5003
$R_p$ Zona P ITU	145,00	14,2806	20,6971	13,2329	2.807,00

Fonte: Autor.

as regiões equatoriais e tropicais. Por outro lado, o decréscimo dos valores estimados dos últimos 25 anos em relação as Normais Climatológicas estão associadas na diminuição na média dos índices pluviométricos ocorridos neste período.

Vale destacar que, quando utiliza-se os valores de taxa de chuva proposta pelas zonas CRANE e ITU para todo o Estado, observa-se que a zona de CRANE subestima e a zona da ITU superestima os valores de atenuação quando comparados as demais taxas de chuva. Isto se deve pelo fato destes modelos terem sido construídos predominantemente com dados de regiões com clima temperado. No mapa das zonas Climáticas de CRANE por exemplo, estipula a região G para o Brasil e para o Norte da África, que na prática possuem valores de precipitação acumulada distintos.

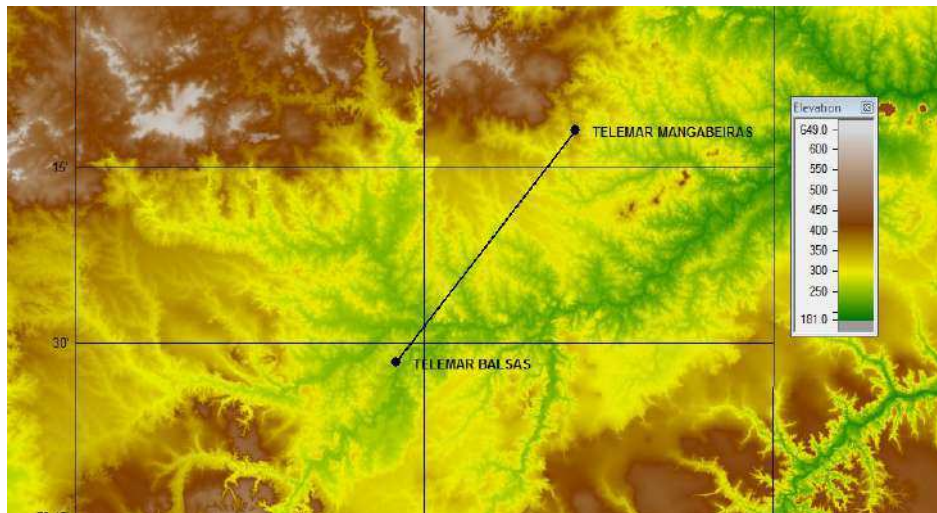
Uma outra desvantagem do modelo para cálculo da atenuação de CRANE quando utiliza-se a taxa de precipitação proveniente da região G adotado no Brasil é que resulta em valores irreais para a atenuação devido a chuva (2.807 dB). Esse valor pode demonstrar a inviabilidade do enlace utilizando esse modelo.

Em outro experimento utilizou-se do enlace já existente da TELEMAR Balsas - São Raimundo das Mangabeiras extraído do portal SitarWeb em (ANATEL, 2016) como base para simulações com as taxas de chuvas extraídas dos MAPAS 02 (Figura 11) e 03 (Figura 12). Como as frequências de operação eram de 8.412 MHz e 8.293 MHz optou-se por simular o enlace na faixa frequência mais alta (15.064,5 MHz e 14.574,5 MHz) pois nestas frequências o fenômeno da atenuação por chuva são mais acentuados. Para essa simulação utilizou-se o software PathLoss. O enlace é apresentado na Figura 17. Os dados do enlace são apresentados na Tabela 16.

A Figura 17 apresenta o enlace de 46,26 km, de polarização vertical utilizado para o experimento. Como a faixa de frequência foi alterada, vários dados do projeto como a antena e o rádio foram alterados.

Inicialmente utilizou-se a taxa de chuva disponibilizada pelo banco de dados do software PathLoss no valor de 101,13 mm/h. Depois foram realizadas simulações com

Figura 17 – Enlace Telemar S.R. das Mangabeiras - Balsas



Fonte: Autor.

Tabela 16 – Dados do Enlace Telemar S.R. das Mangabeiras - Balsas

	São Raimundo das Mangabeiras	Balsas
Estação	4222349160	403000882
Latitude	07 11 47,50 S	07 31 40,00 S
Longitude	045 47 01,80 W	046 02 23,00 W
DADOS ORIGINAIS		
Tx	8.412 MHz	8.293 MHz
Rx	8.293 MHz	8.412 MHz
DADOS SIMULADOS		
Tx	14.574,5 MHz	15.064,5 MHz
Rx	15.064,5 MHz	14.574,5 MHz

Fonte: Autor.

Tabela 17 – Disponibilidade do Enlace Telemar S.R. das Mangabeiras - Balsas.

	ITU-R	MAPA01	MAPA02	MAPA03
Taxa de Chuva (mm/h)	101,13	62,56	59,71	54,71
Disponibilidade devido a chuva (%)	99,9876	99,9893	99,9898	99,9910
Indisponibilidade devido a chuva (%)	0,01240	0,01068	0,01012	0,00898

Fonte: Autor.

as taxas obtidas nos mapas das Figuras 10, 11 e 12. Na Tabela 17 pode-se verificar os resultados obtidos da disponibilidade devido a chuva.

## 7 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo sobre a distribuição de precipitação líquida no Estado do Maranhão e a sua influência na estimativa da taxa de chuva utilizada no cálculo da atenuação devido a chuva em sinais propagados por enlaces terrestres. Através da utilização do modelo de cálculo da intensidade de chuva proposto pela ITU-R 878.6 (baseado no modelo SPB) e a partir de dados da precipitação média acumulada das estações de coleta do INMET que cobrem todo o território foi possível gerar mapas de contorno de taxas de chuvas por meio de interpolação bilinear dos 12 pontos de coleta. Os mapas de contorno foram gerados utilizando três fontes de dados: dados de reanálise ERA-40 utilizados oficialmente pela ITU-R, dados das Normais Climatológicas do INMET (1961-1990) e dados dos últimos 25 anos do INMET (1991-2015), extraídos dos mesmos locais das Normais. Observou-se que os resultados da intensidade de chuva provenientes dos últimos 25 anos, na maioria das localidades, apresentam valores inferiores aos produzidos pelas normais climatológicas (dos 30 anos anteriores), exceto para os municípios de Zé Doca, Bacabal e Carolina. Nestes municípios, a precipitação acumulada média apresentou um acréscimo nos últimos 25 anos quando comparados as Normais Climatológicas, refletindo assim nos valores de intensidade das chuvas.

Na segunda parte deste trabalho, abordou-se os quatro modelos para cálculo da atenuação devido a chuva em enlaces terrestres aplicáveis em regiões de clima Equatorial: Modelo ITU-R, Brasileiro (3M-2008), Australiano e o CRANE. Como estudo de caso, estes modelos foram alimentados com informações de um enlaces de frequência ( $f=20$  GHz), com distância de 1 km e polarização circular, com os dados obtidos de taxa de chuva, para percentagem de 0,01%, obtendo diversos valores de atenuação.

Constatou-se que, apesar dos valores de atenuações por chuva com dados dos últimos 25 anos serem menores que os valores gerados com as normais climatológicas, estes ainda são maiores que os valores obtidos pelo banco de dados recomendado pela ITU-R (reanálise ERA-40). Os resultados demonstram também que as regiões climáticas definidas pela ITU-R e por CRANE produzem atenuações pouco confiáveis, visto que são modelos contruídos a partir de dados predominantes de regiões temperadas. É possível concluir que a caracterização climática possui pouca informação sobre os índices pluviométricos de uma determinada região.

Finalmente, este trabalho pode auxiliar em estudos mais aprofundados visando aprimorar estes mapas de contornos de taxas de chuva para o cálculo das atenuações em radio enlaces terrestres em diversas frequências, através de outros pontos de coleta a serem inclusos. De fato, outras instituições possuem dados de precipitação acumulada que podem



enriquecer a resolução espacial destes mapas visto que, como abordado anteriormente, informações sobre altas intensidades de chuvas medidas são inexistentes no território abordado neste trabalho.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Visando melhorar a resolução dos mapas de contorno, novos pontos de coleta podem ser acrescentados com a ampliação das redes de pluviômetros em todo o Estado aumentando assim os pontos de coleta. Sugere-se a adoção de pontos de coleta de precipitação e medição da atenuação de modo simultâneo em todo o território, as UAD's. O local mais próximo de coleta simultânea destas informações situa-se em Mosqueiro no Estado do Pará.

Com o implemento de plataformas de coletas de dados automáticas, com dados de precipitação acumulada com intervalos inferiores a 20 minutos, seria possível gerar mapas de contorno em tempo quase real, ou a cada 20 minutos, com dados de taxa de chuva ou de atenuação devido a chuva, gerando um histórico importante para estudos desse tipo de efeito.

Um outro fenômeno que merece ser estudado e que não foi abordado neste trabalho é o da despolarização. A despolarização é um fenômeno físico que ocorre quando a onda se propaga pelo ar contendo gotas com formato não esférico, de base côncava, com diâmetro a partir de 4 mm. Diferentes polarizações propagam-se com diferentes velocidades através das gotas não esféricas causando deslocamento entre fases. Nos casos em que a simetria da gota não está alinhada com a polarização, a energia da onda será distribuída entre os estados de polarização. O componente co-polarizado representa o de mesma polarização do sinal transmitido (WILLIS, 2016). O cross-polarizado é o componente que sofre o efeito da despolarização. A discriminação de polarização cruzada (XPD) é o valor em dB que relaciona os efeitos do componente cross-polarizado com o co-polarizado (MIYOSHI, 2008). Este fenômeno também causa atenuação do energia da onda e está diretamente relacionado com a precipitação.

# Referências

- 3M/208, I. D. *Proposed modification to Recommendation ITU-R P.530-11: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Brazil, 2007. 40
- ANATEL. *Dados de Enlace*. 2016. Disponível em: <[http://sistemas.anatel.gov.br/apoio\\_sitarweb/Tabelas/Canalizacao/Consulta/Tela.asp?op=C&SISQSm modulo=6269&Aviso=1](http://sistemas.anatel.gov.br/apoio_sitarweb/Tabelas/Canalizacao/Consulta/Tela.asp?op=C&SISQSm modulo=6269&Aviso=1)>. Acesso em: 20 out 2016. 52
- ARRUDA, B. A. de. *Estudo Comparativo das Técnicas para cálculo de atenuação devido à chuva*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. 18, 23, 24, 25
- ASSIS, M. S. Rainfall characteristics for propagation modelling. *CLIMPARA*, v. 01, p. 1131–1136, 2001. 23, 24
- CHEIBIL, J.; RAHMAN, T. A. Rain rate statistics conversion for the prediction of rain attenuation in malaysia. *Electronics Letters*, p. 1019–1021, 1999. 30
- CRANE, R. K. Prediction of the effects of rain on satellite communication systems. *Proc. IEEE*, v. 65, p. 456–474, 1977. 21, 25
- CRANE, R. K. *Electromagnetic Wave Propagation through Rain*. 4. ed. Canada: Wiley Interscience Publication. 288 f, 1997. 17, 18, 20
- DUTTON, E. J. *Precipitation variability in the USA for microwave terrestrial system design*. Boulder, CO, 1977. 21
- FAGUNDES, I. F. *Previsão da Atenuação por chuvas a partir de dados meteorológicos globais*. 72 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2014. 37
- FEDI, F. Rainfall characteristics across europe. *Alta Frequenza*, v. 4, n. 46, p. 52–60, 1979. 25
- GARCIA, N. A. P. *Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto*. 175 f. Tese (Doutorado) — PUC-RIO. Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2003. 23
- IBGE. *Dados do Estado do Maranhão*. 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=ma>>. Acesso em: 10 jun 2016. 14
- INMET. *Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990*. 2009. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 20 abr 2016. 13
- ITU-REC.P.530-16. *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Genebra, 2015. 36, 40
- ITU-REC.P.837-6. *Characteristics of precipitation for propagation modelling*. Genebra, 2012. 14, 15, 31, 33

- ITU-REC.P.838-1. *CSpecific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Genebra, 1999. 36, 38, 39, 40
- JUNG, M. et al. Study on the empirical prediction of 1-min rain rate distribution from various integration time data. *Korea-Japan Microwave Conference*, Dept. of Radio Science & Engineering, Chungnam National University, Daejeon, KOREA, p. 89–92, 2007. 30
- LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relation of raindrop-size to intensity. *Trans American Geophysics Union*, v. 24, p. 452–460, 1943. 16
- MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, v. 5, p. 165–166, 1948. 16
- MIGLIORA, C.; PONTES, M.; MELLO, L. Conversion of rainrate statistics with various integration times to equivalent one-minute distributions. *Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, p. 35–37, 2003. 29, 30
- MIRANDA, E. C. de; PONTES, M. S.; MELO, L. A. R. Rainfall induced satellite beacon attenuation on three 12 ghz links inequatorial and tropical brazil in proc. antennas and propagation. *Society International Symposium. IEEE*, v. 4, p. 1892–1895, 1998. 19
- MIYOSHI, E. M. *Projetos de Sistemas de Rádio*. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008. Acesso em: 21 ago 2013. 13, 16, 55
- MOUPFOUMA, F. Model of rain rate distribution for radio system design. *IEE Proc.*, 134, Pt.H, p. 527–537, 1987. 29
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. *World map of Koppen-Geiger climate classification*. 2015. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World\\_Koppen\\_Map.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_Koppen_Map.png)>. Acesso em: 10 jan 2016. 22
- RANATUNGA, C. *Introducing an effect of climate change into global models of rain fade on telecommunications links*. Tese (Doutorado) — University of Hull, Kingston upon Hull, 2014. 20
- RICE, P. L.; HOLMBERG, N. R. Cumulative time statistics of surface-point rainfall rates. *IEEE Trans. Commun*, v. 21, p. 1131–1136, 1973. 21
- SALONEN, E. T.; BAPTISTA, J. P. V. P. A new global rainfall rate model. *Antennas and Propagation, Tenth International Conference on*, Edinburgh, v. 2, n. 436, p. 182–185, 1997. 31
- SEGAL, B. High-intensit rainfall statistics for canada.crc report no. 1329-e. Ottawa, 1979. 25
- SEGAL, B. The influence of raingage integration time on measured rainfall-intensity distribution functions. Ottawa, v. 3, p. 662–671, 1986. 30
- SILVA, A. T. da Costa e. *Análise da atenuação por chuva em regiões tropicais e equatoriais aplicada ao problema do desempenho de sistemas de comunicações por satélite em banda Ka*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002. 13

SINGH, M.; TANAKA, K.; LIDA, M. Conversion of 60-, 30-, 10- and 5-minute rain rates to 1-minute rates in tropical rain rate measurement. *ETRI Journal*, v. 29, n. 4, p. 1019–1021, 2007. 30

VELASCO-CASILLAS, F. et al. Automatic generation of rain-attenuation maps according to the rain-rate provided by instant data of meteorological stations in Mexico. *CONIELECOMP 2008, 18th International Conference on, Puebla*, p. 65–69, 2008. 51

WILLIS, M. *Propagation Tutorial Rain and other Hydrometeors*. 2016. Disponível em: <<http://www.mikewillis.com/Tutorial/PF10.htm1>>. Acesso em: 04 nov 2016. 55