



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRÉIA COELHO DOMINGOS

**ESTUDO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA ENLACES VIA SATÉLITE  
EM UBERLÂNDIA**

Uberlândia

2019

ANDRÉIA COELHO DOMINGOS

**ESTUDO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA ENLACES VIA SATÉLITE  
EM UBERLÂNDIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Coutinho Mateus

Uberlândia

2019

ANDRÉIA COELHO DOMINGOS

**ESTUDO DA ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVA PARA ENLACES VIA SATÉLITE  
EM UBERLÂNDIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Uberlândia, 17/12/2019

Banca Examinadora:

---

Orientador - Prof. Dr. Alexandre Coutinho Mateus – UFU

---

Examinador – Prof. Dr. Antônio Cláudio Paschoarelli Veiga – UFU

---

Examinador – Prof. Dr. Gilberto Arantes Carrijo - UFU

Primeiramente dedico esse trabalho a Deus, que foi um verdadeiro guia nessa jornada. E Aos meus pais, que são meus maiores exemplos de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

**Agradeço a Deus ao meu lado e me deu força, ânimo e crença para não desistir e continuar lutando por este meu sonho e objetivo de vida. A Ele eu devo minha gratidão.**

**A minha família por todo o carinho, amor e força, em especialmente, aos meus pais Antônio e Mariângela, que sempre me incentivou e nunca me deixaram perder a fé. Obrigada minha irmã Daniela e meu irmão Gustavo, por me ouvir nos momentos difíceis, e sempre tiveram paciência e confiança.**

**Ao Pastor Renato e Bispo Humberto por todo carinho, direcionamento, palavras de incentivo e por todas as orações.**

**A minha madrinha Angelita e meu padrinho Jorge pelo todo o carinho e incentivo.**

**Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho.**

**Ao meu Prof. Dr. Antônio Paschoarelli pelo incentivo e apoio desde o início da minha graduação.**

**Ao meu Prof. Dr. Éderson pela oportunidade da minha iniciação científica na qual engrandeceu meus conhecimentos.**

**A todos meus professores por me proporcionar o conhecimento e afetividade da educação no processo formação profissional.**

**Enfim, agradeço a todos as pessoas que fizeram parte dessa etapa decisiva em minha vida.**

“A memória do justo é abençoada, mas o  
nome dos perversos apodrecerá.”

(Provérbios 10:7)

## RESUMO

Em enlaces via satélite, a atenuação provocada pelas chuvas tem sido o efeito mais significativo e prejudicial. Esse fator aumenta com a frequência e com a quantidade de chuva.

Em geral, foram feitos grandes esforços para medir e modelar estatísticas de atenuação da chuva a longo prazo para auxiliar no projeto do sistema de comunicação. Os dados medidos são necessariamente restritos a locais específicos e parâmetro de link.

Os dados utilizados deste trabalho foram obtidos pelo departamento de Geografia (Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na cidade de Uberlândia.

Para isso, foram utilizadas dois modelos de atenuação da chuva que tiveram bom desempenho: o modelo CCIR e modelo Crane.

De acordo com a intensidade de chuva na cidade pode efetuar o cálculo das atenuações de sinais pelos modelos existentes, obtendo-se as estatísticas e as probabilidades de ocorrência sejam em enlace via satélite como em enlace via terrestre.

**Palavras-chave:** Enlace via satélite, chuva, atenuação devido à chuva, propagação.

## ABSTRACT

In satellite links, rain attenuation has been the most significant and detrimental effect. This factor increases with the frequency and amount of rainfall.

In general, major efforts have been made to measure and model long-term rainfall mitigation statistics to assist in the design of the communication system. Measured data is necessarily restricted to specific locations and link parameter.

The data used in this work were obtained by the Department of Geography (Laboratory of Climatology and Water Resources) and the National Institute of Meteorology (INMET), during the last 5 years, in the city of Uberlandia.

For this, two models of rain attenuation that had good performance were used: the CCIR model and Crane model.

Depending on the intensity of rainfall in the city, it is possible to calculate the signal attenuation by the existing models, obtaining the statistics and the probabilities of occurrence in satellite as well as terrestrial link.

**Keywords:** Satellite link, rain, attenuation due to rain, spread.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Esquemática transmissão em via satélite.....	14
Figura 2 –	Principais tipos de órbita.....	16
Figura 3 –	Atenuação por absorção e espalhamento.....	17
Figura 4 –	Chuva Frontal.....	17
Figura 5 –	Chuva Orográfica.....	18
Figura 6 –	Chuva convectiva.....	19
Figura 7 –	Regiões Climáticas.....	20
Figura 8 –	Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática do INMET.....	27
Figura 9 –	Pluviógrafo.....	28
Figura 10 –	Pluviômetro.....	28
Gráfico 1 –	Precipitação anual de Uberlândia -MG de 1981 a 2015.....	30
Gráfico 2 –	Precipitação total anual.....	32
Gráfico 3 –	Precipitação total anual de Uberlândia -MG de 2014 -2018.....	33
Gráfico 4 –	Volume de chuva x meses do ano durante 5 anos.....	34
Gráfico 5 –	Precipitação durante anos no mês de dezembro.....	34
Gráfico 6 –	Curvas de IDF das chuvas intensas de Uberlândia.....	38
Figura 11 –	Regiões das Américas.....	43
Gráfico 7 –	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.....	47
Gráfico 8 –	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.....	49
Gráfico 9 –	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.....	49
Gráfico 10 –	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal variando o período de retorno.....	50
Gráfico 11 –	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.....	52
Gráfico 12 –	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal Crane.....	53

Gráfico 13-	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal variando o período de retorno.....	53
Gráfico 14-	Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal variando o período de retorno.....	56
Gráfico 15-	Comparação da atenuação em relação a frequência entre modelo CCIR (teórico e medido) com modelo Crane Global (teórico e medido) .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Frequências para diversas banda.....	15
Tabela 2 -	Taxa de Chuva.....	20
Tabela 3 -	Período de retorno.....	22
Tabela 4 -	Coefficiente de precipitação que representam a desagregação.....	23
Tabela 5 -	Precitação máxima para diferentes tempos de duração.....	24
Tabela 6 -	Intensidade de chuva, duração e período de retorno.....	24
Tabela 7-	Precipitação de chuva máxima anual.....	29
Tabela 8 -	Precipitação anual em Uberlândia, no período de 1981 a 2015....	31
Tabela 9 -	Precipitação de chuva anual.....	32
Tabela 10 -	Precipitação de chuva em cada mês durante os cinco anos.....	33
Tabela 11 –	Precipitação máxima de cada mês e ano.....	36
Tabela 12 –	Tabela de IDF para as chuvas intensas de Uberlândia.....	37
Tabela 13 –	Coeficientes de atenuação levando em conta a polarização da onda.....	41
Tabela 14 –	Taxas de chuva conforme o método Crane.....	43
Tabela 15 –	Altura isotérmica 0° (km) como função da latitude e probabilidade de ocorrência.....	44
Tabela 16 –	Atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva na cidade de Uberlândia.....	47
Tabela 17 –	Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva.....	48
Tabela 18 –	Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva na cidade de Uberlândia.....	51
Tabela 19 –	Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva na cidade de Uberlândia.....	52
Tabela 20 –	Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane na cidade de Uberlândia.....	55

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
CCIR	International Radio Consultive committee
GEO	Orbita geoestacionário
MEO	Órbita terrestre média
LEO	Órbita terrestre baixa
LCRH	Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos
SADMET	Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Considerações preliminares .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivo.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 SiStema via satélites.....</b>	<b>14</b>
2.1.1 Satélite .....	14
2.1.2 Efeitos da chuva .....	16
2.1.3 Tipos de chuva .....	17
2.1.3.1 Chuva frontal.....	17
2.1.3.2 Chuva orográfica.....	18
2.1.3.3 Chuva convectiva.....	18
2.1.4 Precipitação .....	19
2.1.5 Distribuição de Gumbel .....	21
2.1.6 Atenuação devido à chuva .....	25
2.1.7 Considerações finais .....	26
<b>3 MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO DA CHUVA.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Medidas do INMET.....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Dados e medidas.....	28
3.1.2 Análise probabilística da precipitação .....	34
3.1.3 Considerações finais .....	38
<b>4 MODELO DE CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Modelo do CCIR.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Modelo de Crane.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3 Modelo Crane Global .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4 Considerações finais .....</b>	<b>47</b>
<b>5 RESULTADO DOS MODELOS DE ATENUAÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Modelo CCIR.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 Modelo Crane Global .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3 Comparação entre as atenuações calculadas pelos modelos CCIR e Crane.....</b>	<b>56</b>
<b>5.4 Considerações finais .....</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações preliminares

Atualmente, no mercado de telecomunicações existem muitas tecnologias para os meios de comunicações, dentre eles fibras óticas, meios terrestres, satélites, nas quais depende da sua aplicação.

Contudo, os meios físicos possuem baixa confiabilidade e disponibilidade. Para estes problemas, a comunicação via satélite se torna mais atrativo, com sua alta confiabilidade e disponibilidade, porém, seu custo de estrutura é elevado em comparação aos meios físicos.

A comunicação via satélite é feita através de ondas de rádio emitidas por satélites artificiais que orbitam o planeta Terra, onde sua função é repetir os sinais recebidos da Terra que são identificados, deslocados em frequência, amplificados e retransmitidos de volta à Terra. Como a comunicação via satélite não possui barreiras, basta a região abranger pelo satélite que a comunicação pode ser estabelecida, podendo ser transmitidos voz, dados, Tv e etc.

No momento que consideramos uma comunicação no espaço livre, estamos sujeitos a considerar em que a onda se propaga como se não tivesse nenhuma interferência atmosférica.

A troposfera representa a camada mais próxima da superfície terrestre, até aproximadamente 10 Km de altura. Nela precisa se considerar a influência da chuva, umidade do ar na trajetória do raio da onda eletromagnética e nas perdas do sinal.

A presença hidrometeoros, causa absorção e espalhamento da energia da onda, resultando em uma atenuação que degrada a confiabilidade e o desempenho do enlace. O impacto em um enlace de comunicação é definido em termos de variações nos parâmetros do sinal, ou seja, uma redução na amplitude provocado pela chuva, por exemplo, é o efeito da absorção e espalhamento da onda.

A chuva é um dos principais causadores de atenuação do sinal de comunicação em altas frequências.

### 1.1 Objetivo

A proposta principal desse trabalho é analisar a atenuação do enlace para comunicação via satélite, provocado devido a chuvas.

Nesse estudo será aplicado na cidade de Uberlândia, os períodos com maiores precipitações durante o período de 1981 a 2015 anos. Para isso serão utilizados dados e medidas

De precipitação de chuva disponibilizada pelo departamento de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Portanto, para o cálculo dos dados e medidas referente ao período, assim como cálculo estatístico e análise probabilística da precipitação, será realizada a comparação entre o modelo CCIR e o modelo Crane Global com valores adquiridos e o valor teórico.

Este estudo é de grande importância para a análise do enlace via satélite principalmente as bandas que utilizam em altas frequências.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Na introdução desse trabalho, no *capítulo 1*, é apresentado a importância da comunicação via satélite, e a influência da chuva devido altos índices de precipitações. Apresenta também o objetivo principal do trabalho, que trata dos dados obtidos pelos Institutos.

O capítulo 2, traz uma fundamentação teórica sobre a propagação em sistemas via satélite, e compreensão do seu funcionamento, é apresentado o conceito da atenuação devido à chuva nas comunicações via satélite e sua influência nesses enlaces.

O *capítulo 3*, é dedicado a análise dos dados e de como serão abordados. São apresentados os dados obtidos pelo departamento de Geografia e pelo INMET.

O *capítulo 4*, apresenta os detalhes dos modelos matemáticos utilizados e cálculos feitos para os valores de precipitações.

O *capítulo 5*, apresenta os resultados obtidos e a análise probabilística da precipitação da comparação dos períodos.

O *capítulo 6*, são apresentadas as conclusões a partir dos dados obtidos e as contribuições desse trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistema via satélites

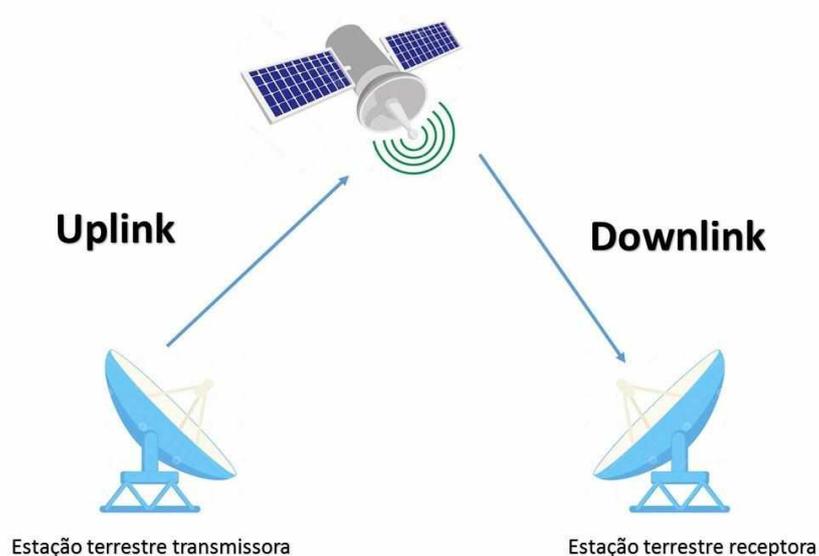
#### 2.1.1 Satélite

O satélite, do ponto de vista de transmissão, é uma estação repetidora dos sinais recebidos da Terra que são detectados, deslocados em frequência, amplificados e retransmitidos de volta à Terra. Um satélite típico é composto de uma parte comum (“bus”) onde se encontram as baterias, painéis solares, circuitos de telemetria e a parte de propulsão. Além do “bus” temos a carga útil (“payload”) composta essencialmente dos circuitos repetidores, denominados “transponders”.

Sua área de cobertura é limitada da Terra em cada momento. A emissão do satélite tem o formato de um cone, portanto, quanto mais afastado estiver da Terra, maior será sua área de cobertura. Altas disponibilidade e qualidade são as principais características da transmissão via satélite.

Dependendo das características do sistema de comunicação, o enlace pode ser classificado em Uplink (referente ao enlace de subida) e o Downlink (referente ao enlace de descida). A frequência com o qual o sinal é enviado para o espaço é chamada de frequência Uplink. Da mesma forma, a frequência com o qual o sinal é enviado é chamado de frequência Downlink, conforme a figura 1.

Figura 1- Esquemática transmissão em via satélite.



Fonte: Ippolito, 2008.

A ITU alocou certas bandas de frequência para usuários de satélites. As principais estão listadas, na tabela 1 a seguir. A banda C foi a primeira a ser designada para tráfego comercial de satélite. Duas faixas de frequências são atribuídas nessa banda, a inferior para tráfego downlink (do satélite) e a superior para tráfego uplink (para o satélite). Para permitir que o tráfego ocorra em ambos os sentidos ao mesmo tempo, são necessários dois canais para cada sentido.

Tabela 1 – Frequências para diversas banda

<b>Banda</b>	<b>Downlink</b>	<b>Uplink</b>	<b>Largura de banda</b>
L	1,5 GHz	1,6 GHz	15 MHz
S	1,9 GHz	2,2 GHz	70 MHz
C	4,0 GHz	6,0 GHz	500 MHz
Ku	11 GHz	. 14 GHz	500 MHz
Ka	20 GHz	30 GHz	3.500 MHz

Fonte: Baschta, 2019.

A próxima banda mais alta disponível para concessionárias de telecomunicações comerciais é a banda Ku. Entretanto, existe um problema: a chuva. Felizmente, em geral as tempestades fortes costumam ser localizadas; assim, o uso de várias estações terrestres separadas por uma grande distância, em lugar de apenas uma, contorna o problema, mas ao preço de antenas, cabos e equipamentos eletrônicos extras para permitir a comutação rápida entre estações. Na banda Ka também foi alocada largura de banda para o tráfego de satélite comercial, mas o equipamento necessário para usá-la ainda continua caro. Internacionalmente, a banda mais popular é a banda Ku, pois permite cursar tráfego com antenas menores que as de banda C, devido ao fato das suas frequências serem mais altas. [2]

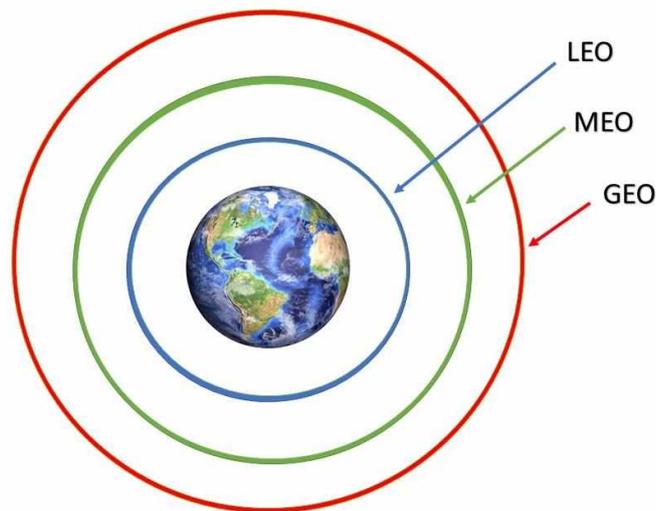
Entretanto, devido ao mesmo fato, a transmissão em banda Ku é mais suscetível a interrupções causadas pela chuva. Dessa forma a banda C é mais popular em países tropicais [2].

Os satélites de comunicação são na sua grande maioria do tipo geoestacionário (GEO), na qual são denominados assim por serem colocados em uma órbita sobre o equador de tal forma que o satélite tenha um período de rotação igual ao do nosso planeta, ou seja, 24 horas. Além disso, existe outros satélites nas quais são mais utilizados, que é o caso do satélite MEO e o LEO.

Os satélites MEO (Órbita terrestre média), deslocam lentamente em longitude, e não estacionário em relação à Terra. Pelo fato de estarem em órbita mais baixas que os GEOs, eles têm uma área de cobertura menor e exigem transmissores menos potentes para alcançá-los.

Já os satélites LEO (Órbita terrestre baixa), possui uma altitude menor e são não estacionários em relação à Terra. Por estarem próximos da Terra, as estações terrestres não precisam de muita potência e o retardo de ida e volta é apenas alguns milissegundos.

Figura 2 – Principais tipos de órbita.



Fonte: O Autor.

### 2.1.2 Efeitos da chuva

Em enlace via satélite a chuva é um importante efeito atmosférico a ser considerado. À medida em que a frequência aumenta, o comprimento de onda do sinal propagado aproxima-se do tamanho das gotas de chuva, produzindo um aumento na atenuação do sinal pela presença da chuva. As gotas de chuva apresentam-se como um meio dielétrico imperfeito para o campo elétrico incidente, provocando a absorção e espalhamento da energia que se propaga no meio [3].

A absorção é uma redução da amplitude do vetor campo elétrico de uma onda causado por uma conversão irreversível da energia da onda no caminho de propagação, ou seja, quando a gota alcança a temperatura do meio, a energia será re-radiada, ocasionada pela dissipação térmica.

O espalhamento é o processo no qual a energia de uma onda é dispersa em direção devido a uma interação com um meio não homogêneo, isto é, as modificações sofridas pela onda para satisfazer às condições de contorno em cada gota de chuva. Neste caso, não há perda de energia e sua direção pode ser qualquer uma.

Portanto, a perda de potência pode ser tanto pela energia espalhada ou pela energia transmitida que sai, Figura 3.

Figura 3 - Atenuação por absorção e espalhamento.



Fonte: O Autor.

### 2.1.3 Tipos de chuva

#### 2.1.3.1 Chuva frontal

Quando duas massas de ar, um quente e a outra fria, se chocam. Como a massa de ar fria é mais densa, isso faz com que a massa de ar quente que é mais leve, subir, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Chuva Frontal.

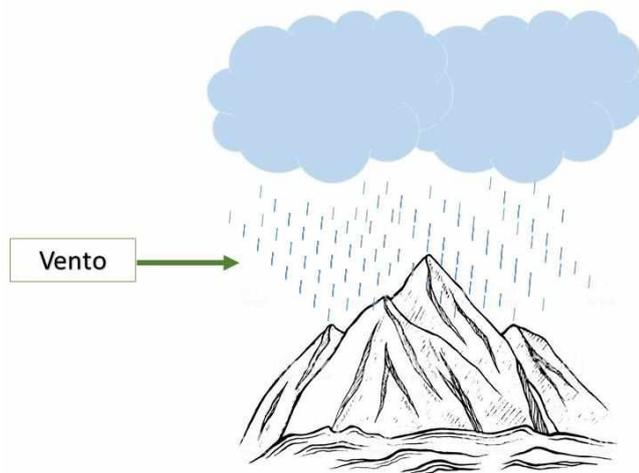


Fonte: Alencar, 2008.

### 2.1.3.2 Chuva orográfica

Ocorre em regiões em que há um grande obstáculo do relevo, como por exemplo uma montanha, Figura 5. A massa de ar úmido vinda do oceano, ao encontrar o alto relevo, é forçado a subir grandes altitudes. Com isso, faz com que a nuvem se resfria, ocorrendo o processo de condensação, seguido de precipitação. Esse tipo de chuva também é conhecido como chuva de relevo.

Figura 5 - Chuva Orográfica



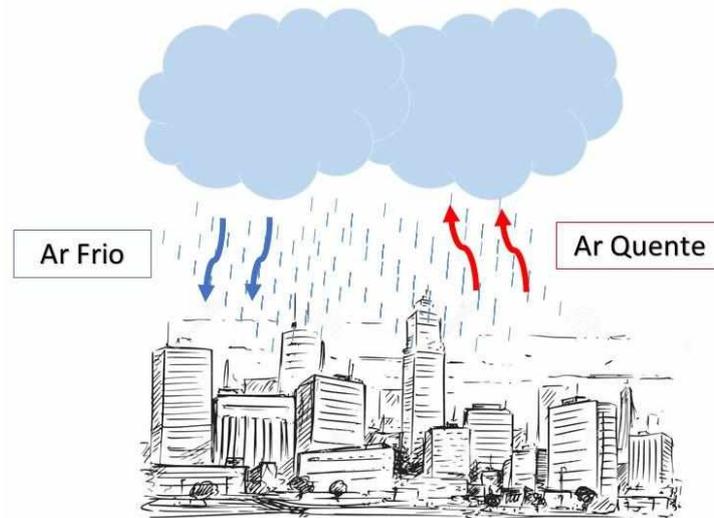
Fonte: Alencar, 2008.

### 2.1.3.3 Chuva convectiva

Ocorrida em regiões de clima tropicais, essa chuva de abrangência local e ocorre quando há movimentação do ar, ou seja, o ar frio desce, e o ar quente sobe. Ao se elevar-se, o ar quente traz a umidade, ocorrendo o processo de condensação, seguido de precipitação.

Esse tipo de chuva também é conhecido como chuva de verão ou de convecção, conforme a figura 6.

Figura 6 - Chuva Convectiva.



Fonte: Alencar, 2008.

#### 2.1.4 Precipitação

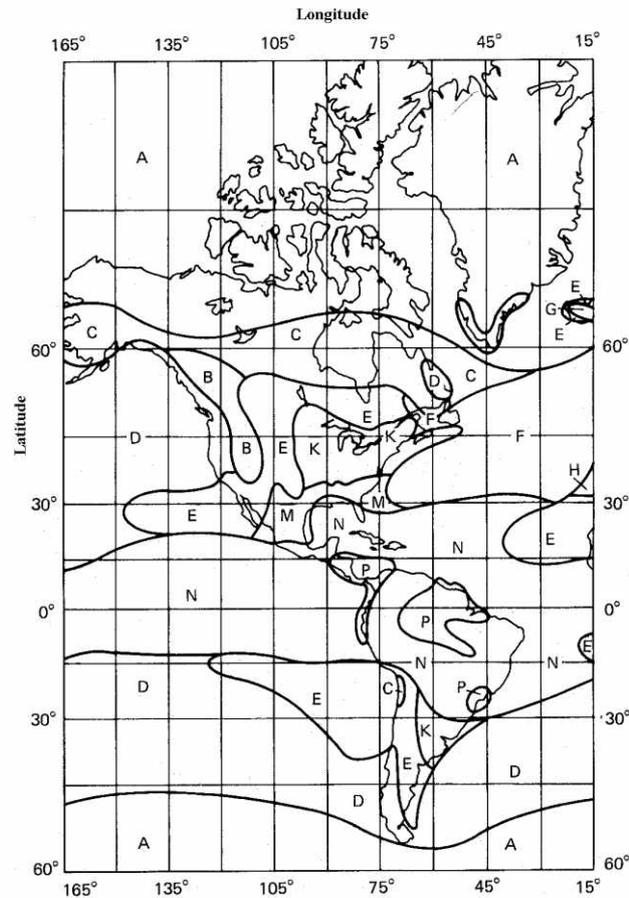
Na meteorologia, a precipitação é qualquer produto da condensação do vapor atmosférico que cai sob a gravidade. A precipitação pode ocorrer de várias formas, tais como: chuviscos, chuva, granizo, neve, granizo.

A precipitação é decorrente, quando uma parte da atmosfera fica saturada com vapor de água, de modo que a água condensa, ou seja, aumenta a sua densidade, e precipita.

A intensidade de precipitação é medida através da taxa de queda da chuva  $R$  (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 (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].

A Figura 7 e a Tabela 2, abaixo mostram as taxas de chuva (mm/h) presente nas diversas regiões climáticas do globo:

Figura 7 – Regiões Climáticas



Fonte: Alencar, 2008.

Tabela 2 – Taxa de Chuva.

Porcentagem do 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

Fonte: Alencar, 2008.

### 2.1.5 Distribuição de Gumbel

Na estatística das probabilidades, existem essencialmente três tipos de distribuições de valor extremo da Fisher Tippett. O mais comum é a distribuição do tipo I, ou mais conhecida como distribuição de Gumbel, que compreende uma distribuição do número máximo ou mínimo de amostras de ados normalmente distribuídos. Uma função de distribuição Gumbel é definida como:

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}} \quad (1)$$

Onde,

$F(x)$  = é a função de densidade de probabilidade da distribuição de Gumbel;

$x$  = é uma variável aleatória associada aos valores de precipitação máxima;

$e$  = é a base dos logaritmos neperianos

$\mu$  e  $\alpha$  = parâmetros da distribuição estimados com base na média e no desvio padrão, onde podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s \quad (2)$$

Onde,

$s$  = é o desvio padrão

$\pi$  = é uma constante (pi) onde vale 3.14159265359

$$\mu = \bar{x} - 0,5772 * \alpha \quad (3)$$

Onde,

$\bar{x}$  = é a média dos valores da amostra dos valores da precipitação;

$\alpha$  = é a constante encontrada pela equação 2.

A média pode ser calculada pela equação abaixo:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (4)$$

Onde,

$\bar{x}$  = é a média amostral;

$x_1, \dots, x_n$  = o valor de cada amostra;

$n$  = o número total de elementos da amostra de dados.

E o desvio padrão pode ser calculada pela equação 5.

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

Onde,

$s$  = é o desvio padrão;

$\sum_{i=1}^n$  = é o somatório dos valores da amostra;

$x_i$  = é o valor máximo da amostra;

$\bar{x}$  = é a média amostral.

Com os resultados obtidos através das equações 1, 2, 3 4 e 5 , é possível efetuar cálculo das lâminas de precipitação máxima de 24 horas para distintas frequências, probabilidade de ocorrência, dados não desagregados, para os períodos de retorno de 2;5;10;25;50;75;100 e 500 anos, conforme 3.

Tabela 3: Período de retorno

<b>Período de Retorno</b>	<b>Variável reduzida</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Probabilidade (Gumbel)</b>	<b>Correção intervalo (*1.13)</b>
<b>Anos</b>	<b>YT</b>	<b>XT'(mm)</b>	<b>F(xT)</b>	<b>XT (mm)</b>
<b>2</b>	0.3665	79.5218	0.5000	89.8597
<b>5</b>	1.4999	98.9415	0.8000	111.8039
<b>10</b>	2.2504	111.7991	0.9000	126.3329
<b>25</b>	3.1985	128.0446	0.9600	144.6904
<b>50</b>	3.9019	140.0965	0.9800	158.3090
<b>75</b>	4.3108	147.1015	0.9867	166.2246
<b>100</b>	4.6001	152.0593	0.9900	171.8270
<b>500</b>	6.2136	179.7037	0.9980	203.0652

Fonte: Petrucci, 2018.

O YT é a variável reduzida, onde pode ser obtida pela equação 6.

$$YT = -\ln\left(\ln\left(\frac{y}{y-1}\right)\right) \quad (6)$$

Onde,

$\ln$  = é o logaritmo natural

$y$  = é o valor que corresponde ao período de retorno.

O período de retorno corresponde o intervalo estimado entre ocorrência de igual magnitude de um fenômeno natural, no caso a chuva.

A precipitação (mm), representada por  $XT'$  pode ser calculada como:

$$XT' = \mu + (\alpha * YT) \quad (7)$$

Onde,

$\mu$  = é a variável encontrada na equação 3.

$\alpha$  = é a variável encontrada na equação 2.

$YT$  = é a variável encontrada na equação 6.

Sabe-se que o uso de intervalos de tempo fixos para medir as quantidades de chuva pode levar a uma subestimação das quantidades máximas verdadeiras de precipitação durante o período considerado. Vários estudos recomendam um ajuste de quantidades medidas usando intervalos fixos. Com base na probabilidade na teoria, Weiss (1964), determinou um valor teórico de 1.13 (correção intervalo) para esse fator, sendo o ajuste menor caso intervalos de tempo fixos disponíveis são mais curtos que o tempo considerado.

Com isso, é dado pela seguinte equação:

$$XT = XT' * 1.13 \quad (8)$$

Onde,

$XT$  = é o valor real de precipitação corrigido.

$XT'$  = é o valor teórico de precipitação.

Para determinar as concentrações de chuvas em intervalos de tempo horários, tendo se apenas as concentrações diárias, adotou se o método de desagregação de chuvas, Campos (1978), onde visando avaliar o comportamento de precipitações, e verificou que, durante o período de um dia (24 horas) a intensidade da precipitação varia em função do tempo de ocorrência, sendo que esta é mais concentrada em seus momentos iniciais [16].

Assim, a tabela 4 mostra os valores obtidos:

Tabela 4: Coeficiente de precipitação que representam a desagregação

<b>Relação entre horas e coeficiente de precipitação</b>										
<b>Horas</b>	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
<b>Coeficiente (%)</b>	0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Fonte: Petrucci, 2018.

A máxima de precipitação em 24 horas (mm), são mostrados na tabela 5 com seus dados desagregados em eventos horários e com seus devidos períodos de retornos (anos).

Tabela 5: Precipitação máxima (mm) para diferentes tempos de duração (horas).

Duração (h)	Coeficiente (%)	Período de Retorno (Anos)							
		2	5	10	25	50	75	100	500
24	100%	89.86	111.80	126.33	144.69	158.31	166.22	171.83	203.07
18	91%	81.77	101.74	114.96	131.67	144.06	151.26	156.36	184.79
12	80%	71.89	89.44	101.07	115.75	126.65	132.98	137.46	162.45
8	68%	61.10	76.03	85.91	98.39	107.65	113.03	116.84	138.08
6	61%	54.81	68.20	77.06	88.26	96.57	101.40	104.81	123.87
5	57%	51.22	63.73	72.01	82.47	90.24	94.75	97.94	115.75
4	52%	46.73	58.14	65.69	75.24	82.32	86.44	89.35	105.59
3	46%	41.34	51.43	58.11	66.56	72.82	76.46	79.04	93.41
2	39%	35.05	43.60	49.27	56.43	61.74	64.83	67.01	79.20
1	30%	26.96	33.54	37.90	43.41	47.49	49.87	51.55	60.92

Fonte: Petrucci, 2018.

A intensidade pluviométrica é a quantidade de chuva por unidade de tempo. Com embasamento na tabela 6, calcula se a intensidade equivalente para cada caso, conforme a equação 9.

$$I = \frac{P \text{ (mm)}}{t \text{ (duração em horas)}} \quad (9)$$

Onde,

$I$  = é a intensidade

$P$  = é a precipitação em mm

$t$  = duração em horas.

Tabela 6: Intensidade de chuva (mm/h), duração (minutos) e período de retorno (anos).

Tempo de duração		Período de Retorno (Anos)							
Horas	Minutos	2	5	10	25	50	75	100	500
24	1440	3.74	4.66	5.26	6.03	6.60	6.93	7.16	8.46
18	1080	4.54	5.65	6.39	7.31	8.00	8.40	8.69	10.27
12	720	5.99	7.45	8.42	9.65	10.55	11.08	11.46	13.54
8	480	7.64	9.50	10.74	12.30	13.46	14.13	14.61	17.26
6	360	9.14	11.37	12.84	14.71	16.09	16.90	17.47	20.64
5	300	10.24	12.75	14.40	16.49	18.05	18.95	19.59	23.15
4	240	11.68	14.53	16.42	18.81	20.58	21.61	22.34	26.40
3	180	13.78	17.14	19.37	22.19	24.27	25.49	26.35	31.14
2	120	17.52	21.80	24.63	28.21	30.87	32.41	33.51	39.60
1	60	26.96	33.54	37.90	43.41	47.49	49.87	51.55	60.92

Fonte: Petrucci, 2018.

Sendo assim, é perceptível a intensidade é mais forte para período mais longos e também para menores tempos de duração. Para a representação das curvas IDF, é expressada na equação 10.

$$I = \frac{a * T^b}{t^c} \quad (10)$$

Onde,

$I$  = é a intensidade (mm/h);

$T$  = é o período de retorno (anos);

$t$  = é a duração da chuva (horas);

$a$  = término da constante de regressão;

$b$  = Coeficiente de regressão;

$c$  = média dos valores de coeficientes de regressão.

Substituindo os valores das variáveis " $a$ ", " $b$ " e " $c$ " encontrados na equação 10, resulta em:

$$I = \frac{330,4083 * T^{0,1452}}{t^{0,6164}} \quad (11)$$

Onde,

$I$  = é a intensidade da chuva (mm);

330,4083 = é a constante de regressão para todos os períodos de retorno;

$T$  = é o período de retorno (anos);

0,1452 = é o coeficiente de regressão de todos os períodos de retorno;

$t$  = é tempo de duração da precipitação (minutos);

0,6164 = é o coeficiente de regressão aplicada à cada período de retorno.

Com isso, inserindo os valores de " $T$ " e " $t$ ", é possível calcular os distintos tempos de duração, bem como seus períodos de retorno.

### 2.1.6 Atenuação devido à chuva

A atenuação por chuvas é influenciada por vários fatores como: frequência de operação do enlace, taxa pluviométrica da localidade onde está instalada a estação, polarização eletromagnética, posição geográfica da estação terrena e posição geográfica do satélite.

Para comunicações via satélite, o efeito da precipitação, ou seja, libertação de água proveniente da atmosfera sobre a superfície da Terra, em forma de chuvisco, chuva, granizo, saraiva ou neve [7] é o principal responsável pela atenuação do sinal de frequência operando acima de 10 GHz. Como citado, os parâmetros que afetam a forma com que os mecanismos de

atenuação ocorrem, são através da absorção e espalhamento, degradando o desempenho do enlace.

Um fator importante a ser considerado na estimativa da atenuação por chuvas é o tamanho das gotas, cujo seu diâmetro varia, geralmente, entre 0,01 e 6 mm. Para diâmetros menores a 0,01 mm as gotas evaporam-se com rapidez. Para diâmetro acima de 6 mm, a tensão superficial não é suficiente para manter a coesão e a gota se fraciona em gotas menores. De acordo com observações experimentais, mostram que a distribuição do tamanho das gotas de chuva varia, basicamente, com a taxa de precipitação [8 ,9].

Dependendo do tamanho da gota, pode sofrer uma deformação durante a sua queda, mudando o seu formato inicial de um esferoide para o de um esferoide oblato, o qual se assemelha a forma de um guarda chuva. Esse novo formato não-esférico da gota altera a polarização da onda, ocorrendo um efeito de transferência da energia de uma polarização para outra, levando também à atenuação do sinal recebido [10].

Portanto, o desenvolvimento para o cálculo de atenuação devido à chuva se baseia em três princípios, descrevendo a natureza das ondas propagando em uma precipitação.

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

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

As contribuições de cada gota são somadas e são independentes das outras gotas. [6]

### **2.1.7 Considerações finais**

Nesse presente capítulo foi apresentado a fundamentação teórica sobre o efeito da chuva na comunicação via satélite. Viu-se que a atenuação por chuva é um dos principais fatores que podem degradar a confiabilidade e desempenho do enlace de comunicação.

Um fator para determinação é o conhecimento da climatologia de precipitação da região em que o enlace está implantado.

### 3 MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO DA CHUVA

#### 3.1 Medidas do INMET

A Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Uberlândia – MG (Código da Organização Meteorológica Mundial – OMM: 86776), está localizada na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Santa Mônica, de acordo com a figura 8, nas coordenadas [11]:

Latitude: -18,917072°

Longitude: -48,255657°

Altitude: 875 metros

A referida estação foi aberta 14/12/2002. Desde então, o Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos (LCRH) do Instituto de Geografia da UFU possui a guarda operacional da mesma, sendo responsável pelo local de instalação, seu cercamento, além de atividades de manutenção secundárias [11].

Figura 8- Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática do INMET localizada no município de Uberlândia – MG



Fonte: Rafael César Silva.

O pluviógrafo é um instrumento operado afim de coletar e registrar a intensidade da precipitação, figura 9. Através dos registradores que possuem um coletor, a precipitação é aparada e transformada em unidade sensível, o milímetro (mm). O equipamento traça curvas baseadas na relação Chuva x Tempo, gerando um diagrama denominado como Pluviograma. Já o Pluviômetro mede a quantidade de precipitação pluvial ocorrida, em unidade de milímetros (mm), figura 10. Consiste em um tubo cilíndrico de metal, com uma abertura em sua base superior e um formato afunilado, permitindo que a água entre e seja armazenada em seu interior [12].

Figura 9 - Pluviógrafo



Fonte: Letícia de Paula e Silva Andrade.

Figura 10 - Pluviômetro



Fonte: Letícia de Paula e Silva Andrade

### 3.1.1 Dados e medidas

Foi obtido os dados de precipitação através [16], que cobrem o período de 1981 a 2015. Já os restantes dos dados foram obtidos através dos INMET.

Os dados das chuvas fornecido pelo INMET, mostrou as taxas de chuvas, em milímetros (cada 1 milímetro equivale ao volume de 1 litro (L) de água de chuva que se acumulou sobre uma superfície de área igual a 1 metro quadrado), de cada mês ocorrida durante 34 anos. Como a cidade de Uberlândia possui um clima tropical, há muito mais pluviosidade no verão que no inverno.

As taxas de distribuições máximas de chuva ocorrida (intervalo de 24 horas) na cidade de Uberlândia, conforme a tabela 3, referem-se à máxima de chuva anual, em milímetros, ocorridas no período de 1981 a 2015.

Tabela 7 – Precipitação de chuva máxima anual.

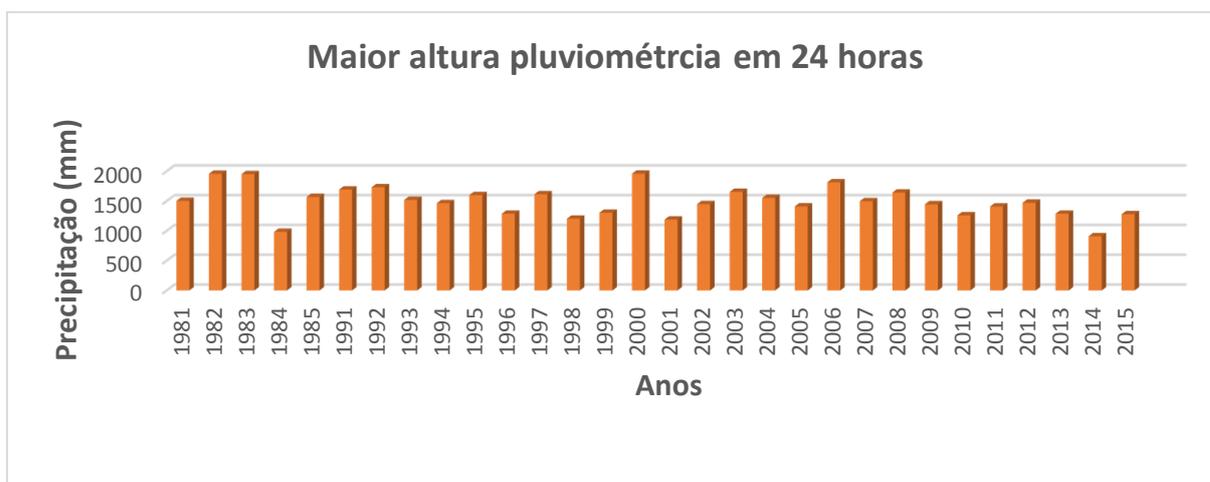
<b>Mês</b>	<b>Ano</b>	<b>Precipitação Máxima (mm)</b>
<b>12</b>	1981	79,4
<b>01</b>	1982	94,4
<b>01</b>	1983	126,8
<b>01</b>	1984	77,2
<b>01</b>	1985	74,4
<b>03</b>	1990	52,3
<b>04</b>	1991	69,0
<b>02</b>	1992	83,6
<b>02</b>	1993	66,4
<b>03</b>	1994	76,4
<b>02</b>	1995	69,0
<b>12</b>	1996	48,0
<b>12</b>	1997	100,7
<b>10</b>	1998	68,1
<b>11</b>	1999	114,6
<b>12</b>	2000	98,2
<b>12</b>	2001	63,2
<b>01</b>	2002	147,0
<b>11</b>	2003	92,6
<b>12</b>	2004	99,4
<b>01</b>	2005	54,8
<b>12</b>	2006	83,9
<b>12</b>	2007	115,8
<b>12</b>	2008	81,0
<b>11</b>	2009	74,0
<b>11</b>	2010	71,8
<b>04</b>	2011	56,8
<b>12</b>	2012	89,2
<b>05/10</b>	2013	82,0
<b>04</b>	2014	72,3
<b>04</b>	2015	64,0

Fonte: Petrucci, 2018.

De acordo com a tabela 7, a maior volume precipitado foi 2002, atingindo a altura de 147,0 mm e, ao ano menos registro de precipitação foi 1996, com 48,0 mm. O segundo ano com menor precipitação total foi em 1990 com 52,3 mm. A diferença entre o ano mais com maior volume de precipitação para o ano com menor foi de 99,0 mm.

Todas as ocorrências de precipitação máxima estão concentradas no período de meados do mês de outubro até o mês de abril. No gráfico 1, revela o comportamento da precipitação máxima em 24 horas no período de 1981 a 2015.

Gráfico 1 – Precipitação anual de Uberlândia -MG de 1981 a 2015.



Fonte: O Autor.

A precipitação máxima alturas pluviométricas de 24 horas é ocorrida nos anos 1993 (126,8 mm), 1997 (100,7mm), 1999 (114,6 mm), 2002 (147,0 mm) e 2007 (115,8mm), ou seja, as alturas acima dos 100,0 mm diários.

Os anos que de 1990 (52,3 mm), 1996 (48,0 mm), 2005 (54,8 mm) e 2011 (56,8 mm), revelaram ter os menores valores de máximas alturas pluviométricas, ou seja, todos esses anos possuem precipitação abaixo dos 60,0 mm diários.

A precipitação anual, no período de 1981 a 2015, na cidade de Uberlândia estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Precipitação anual em Uberlândia, no período de 1981 a 2015.

<b>Ano</b>	<b>Precipitação Anual (mm)</b>
1981	1503.8
1982	1957.7
1983	1952
1984	983.1
1985	1569.1
1991	1693
1992	1731.4
1993	1519
1994	1464.3
1995	1599.8
1996	1287.4
1997	1614.3
1998	1203.8
1999	1303.9
2000	1959.3
2001	1189.7
2002	1449.1
2003	1654.2
2004	1553.1
2005	1409.7
2006	1814.9
2007	1497.9
2008	1643.1
2009	1445.6
2010	1260.5
2011	1407.7
2012	1472
2013	1286.8
2014	909.5
2015	1278.5

Fonte: Petrucci, 2018.

Conforme a tabela 8, o ano que possui a maior precipitação anual foi em 2000 com 1959,3 mm e, o ano que atingiu o menor índice de precipitação foi 2014 com 909,5 mm. O segundo ano com menor precipitação anual foi em 1984 com 983,1 mm. A diferença entre o ano com maior precipitação e o menor foi de 1049,8 mm. No gráfico 2, revela o comportamento da precipitação total anual de 1981 a 2015.

Gráfico 2 – Precipitação total anual.



Fonte: O Autor.

O gráfico 2 demonstra que nos anos 1982,1983,2000 e 2006 apresentam precipitação acima dos 1800,0 mm, com os maiores volumes pluviométricos, respectivamente, 1957.7 mm, 1952.0 mm, 1959.3 mm e, 1814.9 mm. Os anos que ficaram com baixas alturas pluviométricas, ou seja, abaixo dos 1000.0 mm, foi em 1984 com 983.1 mm e o ano de 2014 com 909.5 mm.

Para abranger os conhecimentos, foi realizado uma análise dos últimos 5 anos, no qual envolve o período de 2014 a 2018. As taxas de distribuições médias de chuva na cidade de Uberlândia, conforme a tabela 9, referem-se à média de chuva anual, em milímetros, ocorridas nesse período.

Tabela 9 – Precipitação de chuva anual

Ano	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Precipitação (mm)</b>	1218.6	1539.2	1699.6	1357.4	1618

Fonte: O Autor.

De acordo com a tabela 9, o ano com maior volume precipitado foi 2016, atingindo a altura de 1699.6 mm e, ao ano menos registro de precipitação foi 2014, com 1218.6 mm. O segundo ano com menor precipitação total foi em 2017 com 1357.4 mm. A diferença entre o ano mais com maior volume de precipitação para o ano com menos foi de 481 mm. O gráfico 3, revela o comportamento da precipitação total anual de 2014 a 2018.

Gráfico 3 – Precipitação total anual de Uberlândia -MG de 2014 -2018.



Fonte: O Autor.

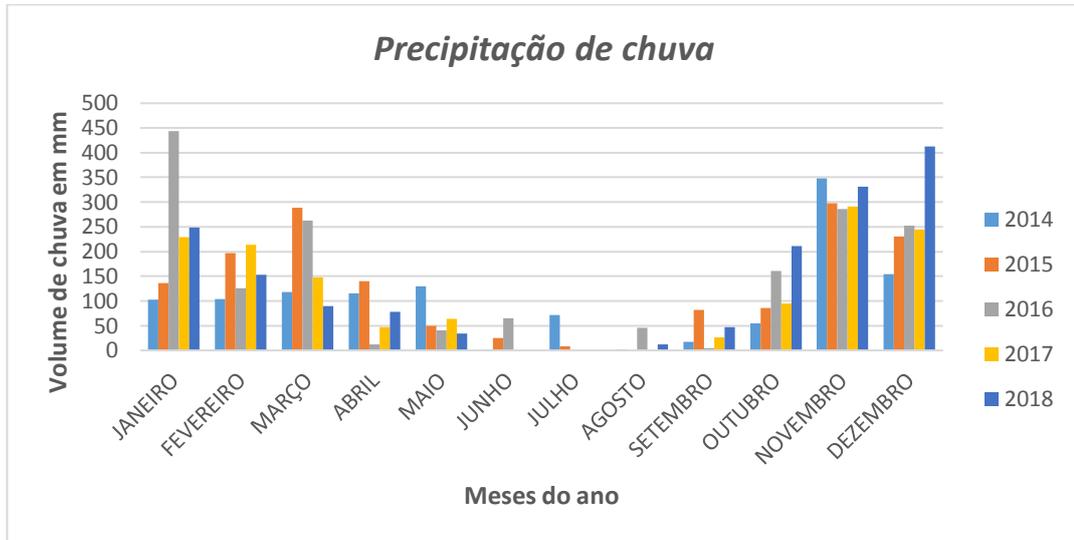
A precipitação média anual é de 1486,56 mm, sendo julho o mês mais seco, quando ocorrem 16,08 mm, e ao longo dos anos a precipitação de chuva não passou dos 0 mm. Em novembro, o mês mais chuvoso, a média fica em 310,72 mm. Nos últimos anos, entretanto, os dias quentes e secos durante o inverno têm sido cada vez mais frequentes, conforme o gráfico 4 e a tabela 10.

Tabela 10 – Precipitação de chuva em cada mês durante os cinco anos.

Meses do ano	Precipitação (mm)				
	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Janeiro</b>	102,8	135,6	444	228,6	248,6
<b>Fevereiro</b>	103,8	197,4	125,6	213,8	153,4
<b>Março</b>	118	288	263	147,6	89,4
<b>Abril</b>	115	140,6	12,4	47	78
<b>Mai</b>	129,4	49	40,6	63,8	33,8
<b>Junho</b>	0,4	25,4	64,8	0	0
<b>Julho</b>	72,2	8,2	0	0	0
<b>Agosto</b>	2	0	45,2	0	12,4
<b>Setembro</b>	17,4	81,4	4,8	26	47,2
<b>Outubro</b>	55	86	160,6	95,4	211,6
<b>Novembro</b>	347,8	297,8	286,6	290,6	330,8
<b>Dezembro</b>	154,8	229,8	252	244,6	412,8
<b>TOTAL</b>	1218,6	1539,2	1699,6	1357,4	1618

Fonte: O Autor.

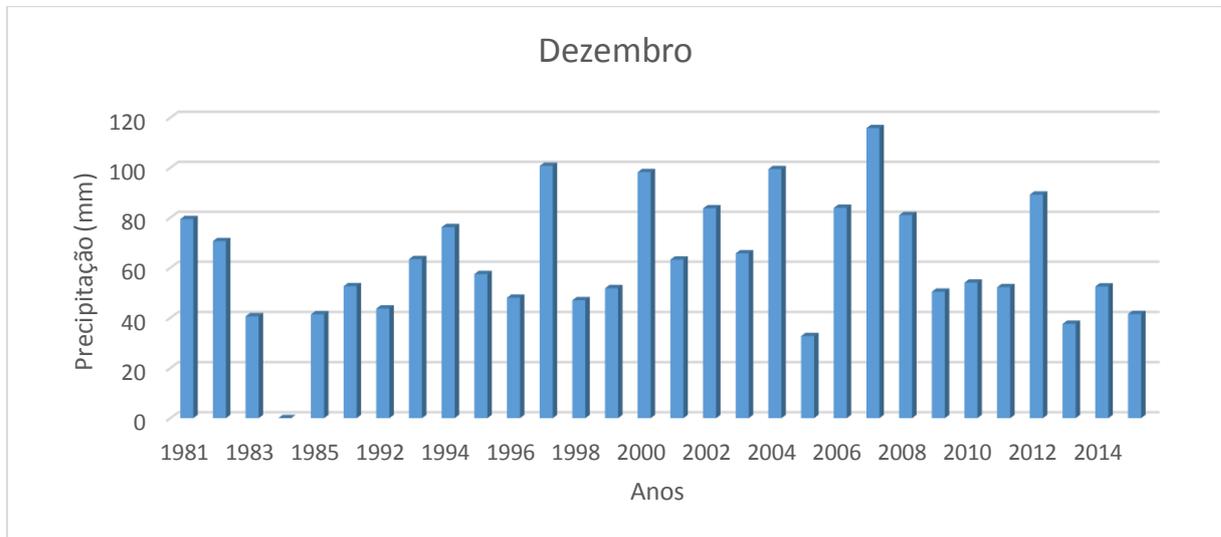
Gráfico 4- Volume de chuva x meses do ano durante 5 anos.



Fonte: O Autor.

Podemos observar que o período que ocorre maior índice de precipitação são os meses de novembro, dezembro e janeiro. Conforme o gráfico 5, abaixo, podemos observar alto índice de precipitação no mês de dezembro.

Gráfico 5 – Precipitação durante anos no mês de dezembro.



Fonte: O Autor.

### 3.1.2 Análise probabilística da precipitação

As principais características de um evento chuvoso são: a quantidade, a duração, a intensidade e a frequência dessas chuvas. As chuvas intensas são caracterizadas pelo elevado volume pluviométrico precipitado em determinado espaço por uma curta duração [15], e suas relações podem ser obtidas através de cálculo IDF (intensidade-duração-frequência).

O gráfico IDF expressa a máxima intensidade de precipitação registrada em diversos intervalos de tempo. Constitui importante ferramenta a ser utilizada como subsidio à resolução de situações que necessitem de dados de precipitação em intervalos curtos. De modo geral, representa de forma conjunta, várias curvas Intensidade-Duração para diversos períodos de retorno, resultando assim, em uma família de curvas denominadas Intensidade-Duração-Frequência, curvas IDF [16].

Para avaliação do ajuste de dados de chuvas, as distribuições estatísticas de extremos utilizadas podem ser a do Tipo I ou de Gumbel, a distribuição Tipo II e a distribuição Log-Pearson III. A distribuição de Gumbel é mais consagrada e é que mais adequada para ajuste de dados de valores extremos [16].

Para a realização desse trabalho serão utilizados dados máximos de 24 horas de uma série histórica de 35 anos, que abrange o período de 1981 a 2015. Os resumos dos maiores valores de precipitação no período de 24 horas mensais e a máxima anual, são apresentadas na tabela 5 abaixo.

Tabela 11 – Precipitação máxima de cada mês e ano.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÁXIMA ANUAL
1981	49.5	24.2	37	28.2	15.1	51.4	0	0.1	0.6	39.8	63.6	79.4	79.4
1982	94.4	52.7	50.2	29.5	40.6	40	19	30	17.6	46.6	0	70.6	94.4
1983	126.8	44.6	69.3	21	14.2	2.8	43.3	1.2	24	62.4	52.4	40.6	126.8
1984	77.2	17	54.8	25.6	19.4	0	0	18.6	12	20.2	47.8	-	77.2
1985	74.4	35.8	44	54.6	18.9	0	0	0	-	16	28	41.4	74.4
1991	60.4	37.6	64.8	69	-	0	0	0	-	21.6	20	52.6	69
1992	54	83.6	33.3	32	12.8	0	0	4.8	19.6	39	48	43.7	83.6
1993	35.4	66.4	29.8	35.4	23	17.2	0	15	-	56.4	38.4	63.4	66.4
1994	66.8	24.8	76.4	4	16.8	4	9.4	0	7.4	12.8	56.2	76.2	76.4
1995	56.6	69	53.4	21.6	60.8	2.6	1.6	0	4.2	21.9	37	57.4	69
1996	38	25.8	20	17.8	32.5	8.4	6.8	6.8	45.8	19.5	45.6	48	48
1997	46	46.8	73	34.7	9.2	52.5	0	0	7.8	54.7	54.5	100.7	100.7
1998	46.5	31.5	18	27.3	40	33.3	0	36.5	1.6	68.1	29	47	68.1
1999	55	44	41.8	35.2	9.2	8.8	0	0	19.6	26.2	114.6	51.8	114.6
2000	84.7	40.6	90.8	47.2	0	0	8.4	5.8	45.6	10.8	56.9	98.2	98.2
2001	59.7	40.2	52	12	18.4	1.3	0	11.6	22.8	44	25.8	63.2	63.2
2002	147	79.8	19.4	28.5	16.5	0	1.3	0.1	16.8	17	51.8	83.7	147
2003	73.6	22	60.5	31.2	24.2	0	1.2	1.9	22.6	45.4	92.6	65.7	92.6
2004	77.7	46	69.7	36.2	5	14	19	0	2	66.6	42.2	99.4	99.4
2005	54.8	33.2	51.4	7.3	33.4	19	0	14	20.3	25	27.4	32.7	54.8
2006	59.6	37.4	51	27.8	3.8	1.5	0	7.9	77.6	82.4	62.5	83.9	83.9
2007	83.7	70.2	20.2	-	10.6	23.2	17.4	0	17.8	43	65.2	115.8	115.8
2008	48.9	33	45.5	59.5	23.9	7.1	0	0.5	11.9	38	10.3	81	81
2009	51.3	42.8	31.9	24.5	46.5	9.3	8.5	9.1	27.2	21.6	74	50.4	74
2010	42.2	37.1	31.4	65.4	7.5	5.3	1.6	0	24.4	34.4	71.8	54	71.8
2011	51	37.5	51.6	56.8	1.8	16.6	0	0	0.1	33.4	27.8	52.2	56.8
2012	57.6	50.6	37	44.4	13	11.6	14.8	0	12.2	38.3	38.9	89.2	89.2
2013	45.4	0.2	35	35	82	0	0.3	7.2	29.4	82	23.5	37.6	82
2014	22.3	25	21.4	14.3	3.8	20	56	0.5	11.5	1.3	72.3	52.5	72.3
2015	64	50.3	43.3	27.5	27.4	13.8	4	0	33.3	33.7	54.5	41.5	64
Máx.	147	83.6	90.8	69	82	52.5	56	36.5	77.6	82.4	114.6	115.8	147

Fonte: PETRUCCI, 2018.

De acordo com a tabela 11, as máximas variam entre 48,0 mm a 147,0 mm. As máximas sucedidas foram nos anos de 2002 e 1983 com respectivamente 147,0 mm e 126,8 mm, ocorridas no mês de janeiro. No ano de 2007, ocorreu a máxima concentração em dezembro, com 115,8 mm, e em dezembro de 1997 ocorreu a máxima de 100,7 mm. Portanto, nos meses de novembro, dezembro e janeiro ocorre a maior concentração de máxima precipitação.

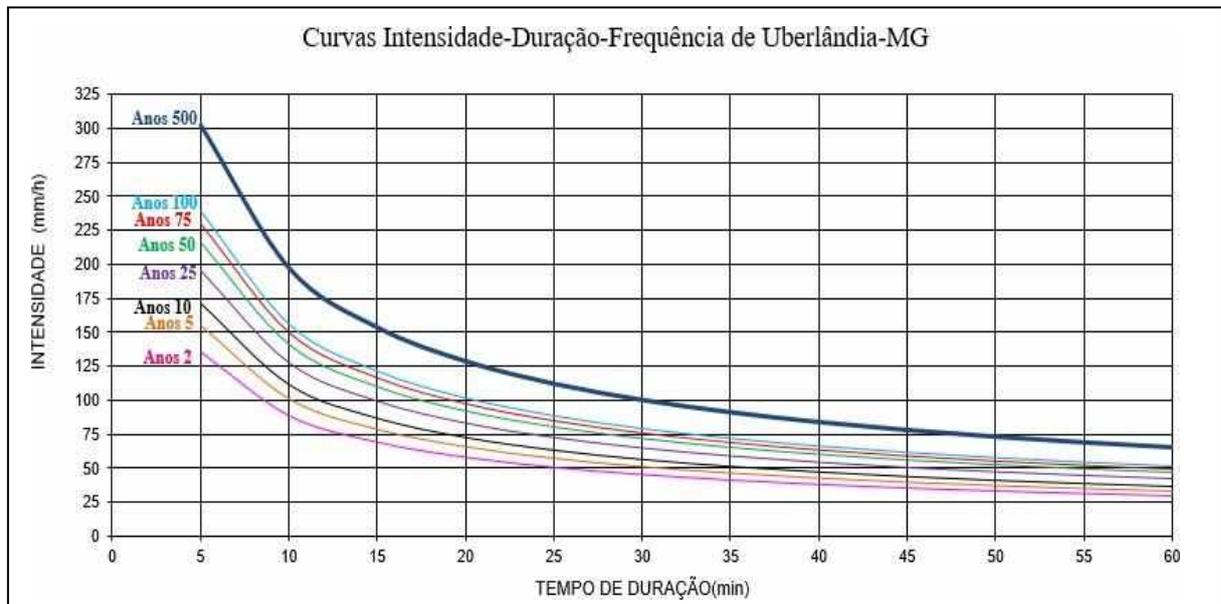
Nesse trabalho, onde constituem nas precipitações máximas de 24 horas, utilizou o modelo de distribuição tipo I de Fisher-Tippet, também conhecida por distribuição de Gumbel, cujo os resultados estão na tabela 12, e sua representação no gráfico 6, abaixo.

Tabela 12 – Tabela de IDF para as chuvas intensas de Uberlândia.

Intensidade – Duração – Frequência (IDF)						
Frequência (anos)	Duração em minutos					
	5	10	15	20	25	30
2	135.4979	88.3857	68.8402	57.6542	50.2455	44.9046
5	154.7831	100.9655	78.6381	65.8601	57.3969	51.2958
10	171.1752	111.6581	86.9661	72.8349	63.4754	56.7282
25	195.5383	127.5502	99.3438	83.2014	72.5097	64.8023
50	216.2464	141.0582	109.8647	92.0127	80.1888	71.6650
75	229.3622	149.6136	116.5282	97.5934	85.0524	76.0117
100	239.1477	155.9967	121.4997	101.7571	88.6810	79.2546
500	302.1164	197.0714	153.4912	128.5502	112.0312	100.1227
Frequência (anos)	Duração em minutos					
	35	40	45	50	55	60
2	40.8344	37.6080	34.9745	32.7753	30.9053	29.2914
5	46.6463	42.9607	39.9523	37.4402	35.3040	33.4604
10	51.5863	47.5104	44.1834	41.4052	39.0428	37.0040
25	58.9285	54.2725	50.4719	47.2983	44.5997	42.2707
50	65.1692	60.0201	55.8171	52.3074	49.3229	46.7473
75	69.1218	63.6605	59.2025	55.4799	52.3145	49.5826
100	72.0708	66.3765	61.7283	57.8469	54.5464	51.6980
500	91.0474	83.8537	77.9817	73.0783	68.9087	65.3103

Fonte: PETRUCCI, 2018.

Gráfico 6 – Curvas de IDF das chuvas intensas de Uberlândia.



Fonte: PETRUCCI, 2018.

Conforme podemos observar, no gráfico 6 a intensidade possui uma relação direta com o aumento apresentando um aumento entre período de retorno, onde o período de retorno corresponde o intervalo estimado entre ocorrências de igual magnitude de um fenômeno natural (como chuvas, ventos intensos, granizos) e, inversa em função do aumento da duração.

É possível verificar que em todos os períodos de retorno a intensidade são mais fortes nos primeiros 10 minutos, e após os 20 minutos são mais suavizadas.

### 3.1.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os dados obtido pelo INMET da precipitação de chuva, em ano, durante o período de 1981 a 2015. Conhecer o padrão de precipitações de uma região é importante para se conhecer a disponibilidade hídrica do local, e qual sua interferência nos enlaces de comunicações via satélite, a partir de um determinado período de observação.

Com base nos resultados, através dos métodos estatísticos nas variáveis de precipitação, tornou se possível conhecer o panorama do clima na cidade de Uberlândia.

A chuva é a causa mais importante dos processos hidrológicos de interesse da engenharia e é caracterizada por uma grande aleatoriedade espacial e temporal.

## 4 MODELO DE CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA

### 4.1 Modelo do CCIR

O modelo CCIR é resultado de pesquisa, na qual sucedeu em formações específicas para regiões climáticas, onde consiste em três métodos, definidos como:

1. Método I = para clima marítimo;
2. Método II = para clima continental e/ou porcentagem que 0,01%;
3. Método I' = clima tropical.

Onde os parâmetros de entrada são dados por:

$f$ : frequência (GHz)

$\theta$ : ângulo de elevação (graus)

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

$\phi$ : latitude da estação terrena (graus)

Conforme a região na qual estamos trabalhando, utilizaremos o método I'. Esse método está disponível em "Radiowave Propagation in Satellite Communications"[13].

Método I'

#### Passo 1

Altura da camada de chuva  $h_R$

$$h_R = 5,1 - 2,15 \log[1 + 10^{(|\phi| - 27)/25}] \quad (12)$$

Modifica-se o  $h_R$  aplicando o coeficiente  $\rho$  que ajusta a altura da camada de chuva em função da latitude [13].

$$h'_R = \rho h_R \quad (13)$$

Onde,

$$\rho = \begin{cases} 0,6 & , |\phi| < 20 \\ 0,6 + 0,02(\phi - 20) & , 20 \leq |\phi| \leq 40 \\ 1,0 & , |\phi| > 40 \end{cases} \quad (14)$$



**Passo 2**Comprimento do trecho  $L_S$ 

$$L_S = \frac{2(h_R - G)}{\left[ \text{sen}^2 \theta + \left( h_R - \frac{G}{4250} \right)^{1/2} + \text{sen} \theta \right]} \quad (15)$$

O raio efetivo da Terra foi usado como 8500 km.

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

$$L_S = \frac{h_R - G}{\text{sen} \theta} \quad (16)$$

**Passo 3**

Projeção horizontal do trecho

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (17)$$

**Passo 4**

Fator de redução,

$$r_p = \frac{90}{90 + 4L_G} \quad (18)$$

**Passo 5**

Obter a taxa  $R_p$  excedida em 0,01% para a localidade de interesse.

Assim, obtém o tempo em minutos de 0,01% do ano na qual é expressada a equação abaixo:

$$T - \text{min} = \frac{24.60 \left( (365.3) + \frac{366}{4} \right) \cdot 0.01}{100} = 53 \text{ minutos}$$



**Passo 6**

Obter a atenuação específica  $\gamma$

$$\gamma = a R^b \text{ (dB/km)} \quad (19)$$

Os coeficientes a e b considerando a teoria de Mie [14], podem ser feitos e os resultados são apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Coeficientes de atenuação levando em conta a polarização da onda.

Freqüência (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, temos os seguintes coeficientes

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2} \quad (20)$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2a_c} \quad (21)$$

Agora, quando a polarização é linear (não é vertical e nem horizontal), usa-se os coeficientes

$$a_\delta = \frac{1}{2} [a_h + a_v + (a_h - a_v) \cos^2 \theta \cos(2\delta)] \quad (22)$$

e

$$b_\delta = \frac{1}{2a_\delta} [a_h b_h + a_v b_v + (a_h b_h - a_v b_v) \cos^2 \theta \cos(2\delta)] \quad (23)$$

Onde  $\theta$  é ângulo de elevação e  $\delta$  o ângulo de inclinação do campo com respeito à horizontal.



**Passo 7**

Atenuação excedida em 0,01% do tempo,

$$A_{0,01} = \gamma L_s r_p \quad (24)$$



**Passo 8**

A atenuação  $A_p$ , para outras porcentagens são dadas:

$$A_p = \begin{cases} A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01}\right)^{-0,33} & 0,001 \leq p \leq 0,01 \\ A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01}\right)^{-0,41} & 0,01 < p \leq 0,1 \\ A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01}\right)^{-0,5} & 0,1 < p \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

#### 4.2 Modelo de Crane

O modelo de atenuação de Crane Global é baseado inteiramente e, observações geofísicas da taxa de chuva, estrutura da chuva e variação da temperatura atmosférica.

Onde os parâmetros de entrada são dados por:

f: frequência (GHz)

$\theta$ : ângulo de elevação (graus)

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

$\phi$ : latitude da estação terrena (graus)

Esse método está disponível em (referencia). A figura 11 e na tabela 14, mostra as regiões usado no modelo do Crane Global. Considerando que para os cálculos utiliza o percentual em valor absoluto da distribuição da taxa de chuva de 0,01% de um ano, tem que se utilizar o valor de 67 mm/h (região G)

Conforme a figura mostra, tem se :

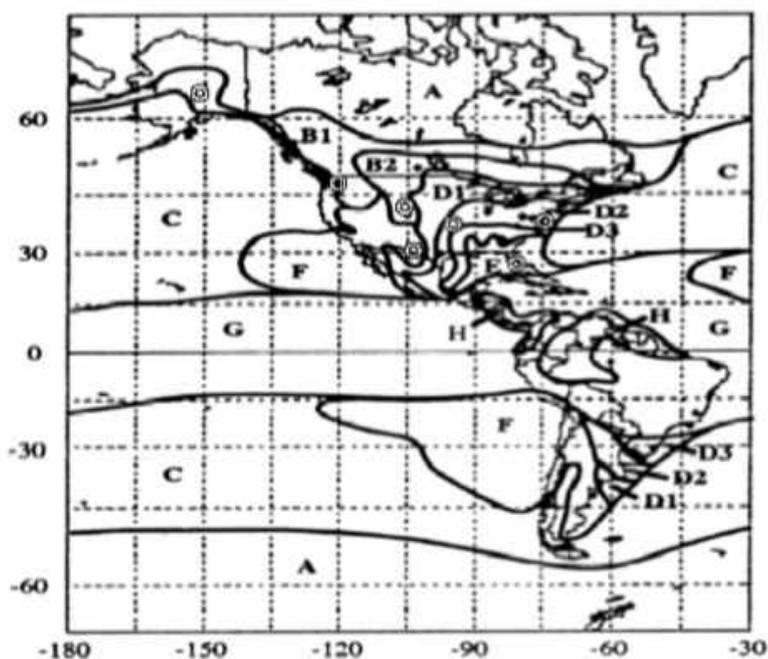
Clima Polar : (A) seco, (B) moderado.

Clima Temperado : (C) marítimo, (D) continental.

Clima Sub Tropical : (E) úmido, (F) árido.

Clima Tropical : (G) moderado, (H) úmido.

Figura 11 – Regiões das Américas.



Fonte: ALENCAR, 2008.

Tabela 14 – Taxas de chuva conforme o método Crane.

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

Fonte: ALENCAR, 2008.

#### 4.3 Modelo Crane Global

##### Passo 1

Obter a taxa  $R_p$  excedida em 0,01% para a localidade de interesse.



##### Passo 2

Altura isotérmica  $\theta^{\circ}$ ,  $H_{(p)}$ , com função da latitude, conforme a tabela 15 abaixo.

Tabela 15 – Altura isotérmica 0° (km) como função da latitude e probabilidade de ocorrência.

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

Fonte: ALENCAR, 2008.



### Passo 3

Comprimento do percurso projetado  $D$  para cada  $p$  percentual do ano, conforme as equações a seguir:

Para  $\theta \geq 10^\circ$

$$D = \frac{H_{(p)} - G}{\tan \theta} \quad (26)$$

Para  $\theta < 10^\circ$

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

Onde,

$H_{(p)}$  = valores das alturas isotérmicas

$G$  = é a altura da estação terrena em relação ao nível do mar

$\theta$  = ângulo de elevação

$R$  = raio efetivo da Terra (8500 km)



### Passo 4

Determinar os coeficientes  $a$  e  $b$  da atenuação e a polarização desejada



**Passo 5**

Constantes empíricas da  $R_p$  para cada  $p$  desejado.

$$d = 3,8 - 0,6 \ln R_p \quad (27)$$

$$x = 2,3 R_p^{-0,17} \quad (28)$$

$$y = 0,026 - 0,03 \ln R_p \quad (29)$$

$$U = \frac{\ln(xe^{yd})}{d} \quad (30)$$

**Passo 6**

Atenuação para cada probabilidade de ocorrência  $p$  em percurso inclinado

Se  $0 < D \leq d$

$$A_{(p)} = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left[ \frac{e^{Ubd} - 1}{Ub} \right] \quad (31)$$

Se  $d < D \leq 22,5$

$$A_{(p)} = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left[ \frac{e^{Ubd} - 1}{Ub} - \frac{x^b e^{ybd}}{yb} + \frac{x^b e^{ybd}}{yb} \right] \quad (32)$$

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

$$p' = p \left| \frac{22,5}{D} \right| \quad (33)$$

No lugar  $R_p$

**Passo 7**

Estimar os limites superior e inferior no método da atenuação para trecho inclinado

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

#### 4.4 Considerações finais

Existem vários modelos para cálculo da atenuação por chuva e para isto, a estatística de taxa de chuva (mm/h) é um dos principais parâmetros utilizados. As estatísticas de taxas de chuva são obtidas através das medições de longo prazo.

O modelo 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. Já no modelo Crane, para enlace via satélite, utiliza a altura isotérmica  $0^\circ$  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) [4].

## 5 RESULTADO DOS MODELOS DE ATENUAÇÃO

Como visto nos capítulos anteriores, os valores 0,01 ; 0,05 e 0,1 referem se a porcentagem de tempo anual  $p$  em que atenuação é excedida. Isso trata se da confiabilidade do enlace. Esta é dada pelo tempo que é disponível menos o tempo em que a atenuação excede um valor passando a prejudicar o sinal. 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 [4].

### 5.1 Modelo CCIR

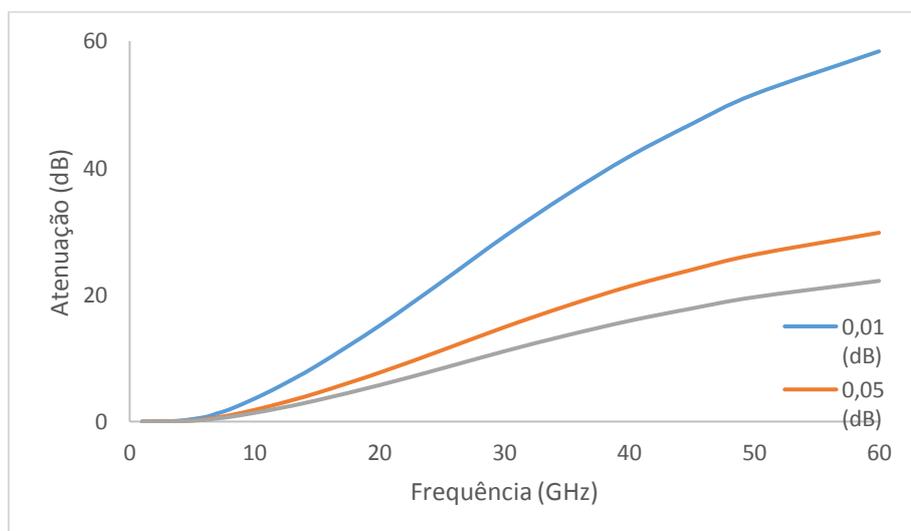
Para o modelo CCIR , foi feito para três porcentagens (0,01 ; 0,05 ; 0,1) de tempo, na qual foi utilizado dados medidos no local, onde  $R_p = 26,11 \text{ mm/h}$  no período de 1981 a 2015, conforme a tabela 16 e gráfico 7.

Tabela 16: Atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva na cidade de Uberlândia[16].

Frequência (GHz)	Atenuação em dB		
	P=0,01	P=0,05	P=0,10
1	0.0042	0.0022	0.0016
2	0.0199	0.0101	0.0076
4	0.1405	0.0717	0.0534
6	0.6964	0.3552	0.2646
7	1.2954	0.6606	0.4922
8	1.9222	0.9803	0.7304
10	3.6208	1.8466	1.3759
12	5.5596	2.8354	2.1127
15	8.8368	4.5068	3.3580
20	15.1128	7.7075	5.7429
25	22.0439	11.2424	8.3767
30	29.1767	14.8801	11.0871
35	35.7803	18.2479	13.5965
40	41.7911	21.3135	15.8806
45	46.9281	23.9333	17.8327
50	51.6026	26.3173	19.6090
60	58.3897	29.7787	22.1881

Fonte: O Autor.

Gráfico 7: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.



Fonte: O Autor.

Para o valor da taxa excedida, conforme a figura 7, foi utilizado a taxa de  $R_p = 95 \text{ mm/h}$  (região N), de acordo tabela 17.

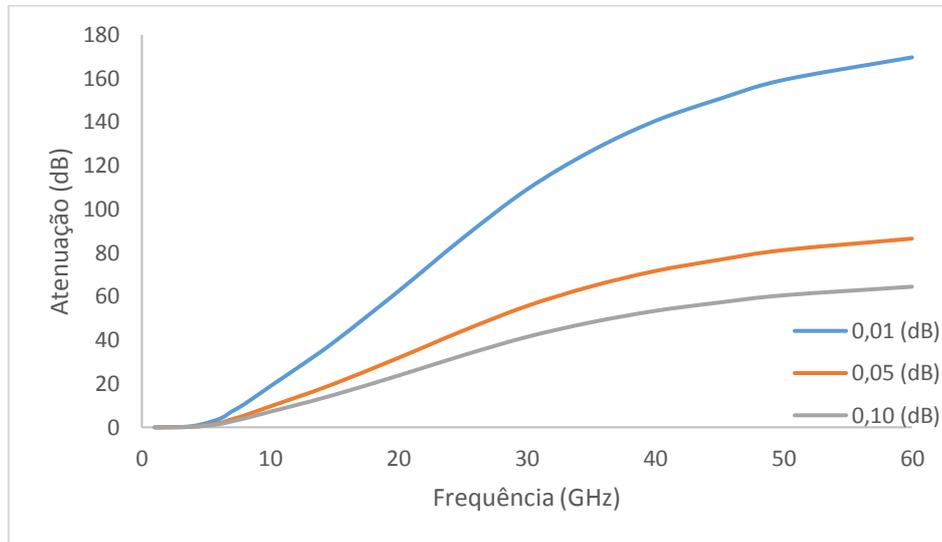
Tabela 17- Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva [16].

Frequência (GHz)	Atenuação em dB		
	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,10
1	0.0137	0.0052	0.0070
2	0.0690	0.0262	0.3049
4	0.5978	0.2272	0.3049
6	3.7717	1.4332	1.9236
7	7.2365	2.7499	3.6906
8	10.6691	4.0543	5.4413
10	18.8162	7.1501	9.5962
12	26.7721	10.1734	13.6537
15	39.2277	14.9065	20.0061
20	62.4874	23.7452	31.8686
25	86.7802	32.9765	44.2579
30	109.0766	41.4491	55.6291
35	126.7014	48.1465	64.6177
40	140.5351	21.3135	15.8806
45	150.6402	23.9333	17.8327
50	159.3499	26.3173	19.6090
60	169.6889	29.7787	22.1881

Fonte: O Autor

Gerando assim, o gráfico 8 abaixo.

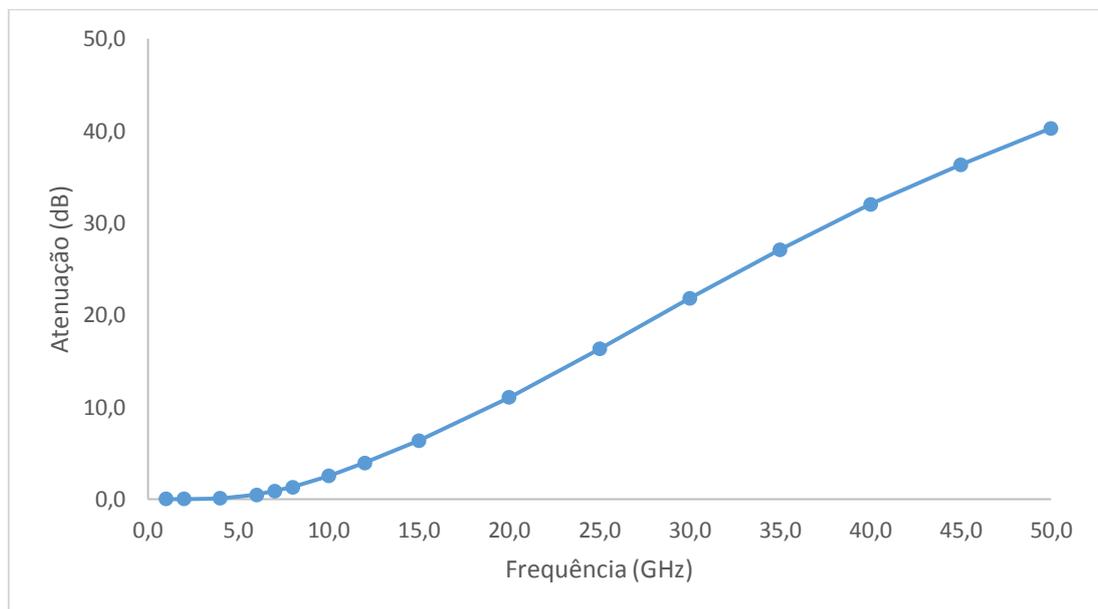
Gráfico 8: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.



Fonte: O Autor

Para a maior compreensão da precipitação, foi realizado o cálculo para os últimos 5 anos, 2014 a 2018, na qual obteve o gráfico 9.

Gráfico 9: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.

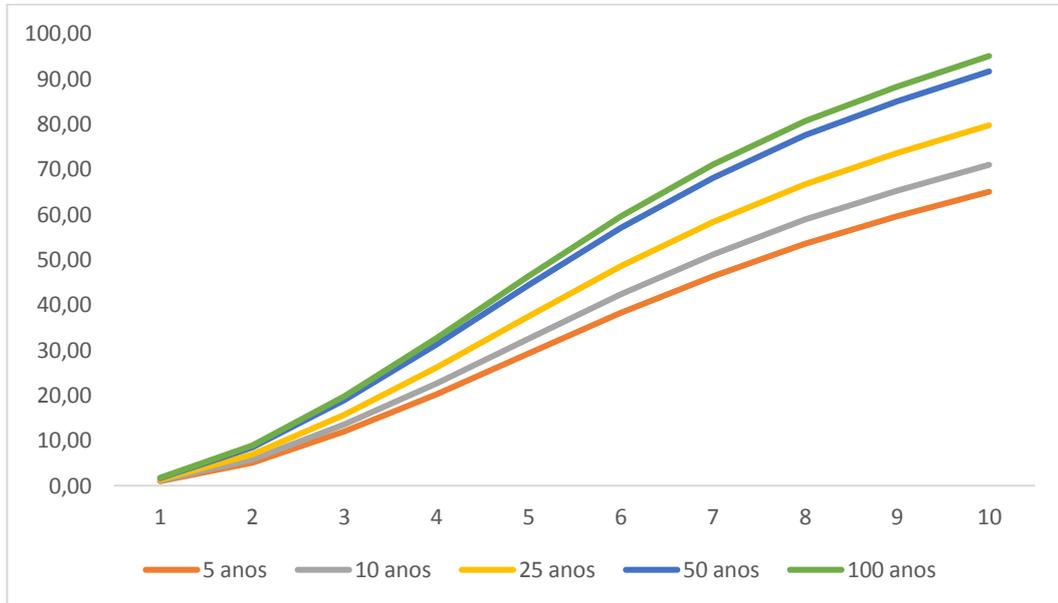


Fonte: O Autor.

Podemos observar que há uma diferença bem grande entre o modelo teórico e o modelo prático, por exemplo, na probabilidade de 0,01% do tempo, a diferença é de 111,2029 dB, na frequência de 60 GHz. Além disso, podemos observar que em uma dada frequência e variando somente as probabilidades de ocorrência, nota-se que as atenuações diminuem à medida que as probabilidades aumentam.

De acordo com o gráfico 10, podemos observar o intervalo de tempo para que uma dada chuva de intensidade e duração, ou seja, para vários períodos de retorno ou tempo de recorrência

Gráfico 10: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal variando o período de retorno



Fonte: O Autor.

## 5.2 Modelo Crane Global

Para o modelo Crane Global, foi feito apenas para a porcentagem 0,01% de tempo, na qual foi utilizado dados medidos no local, onde  $R_p = 26,11 \text{ mm/h}$ .

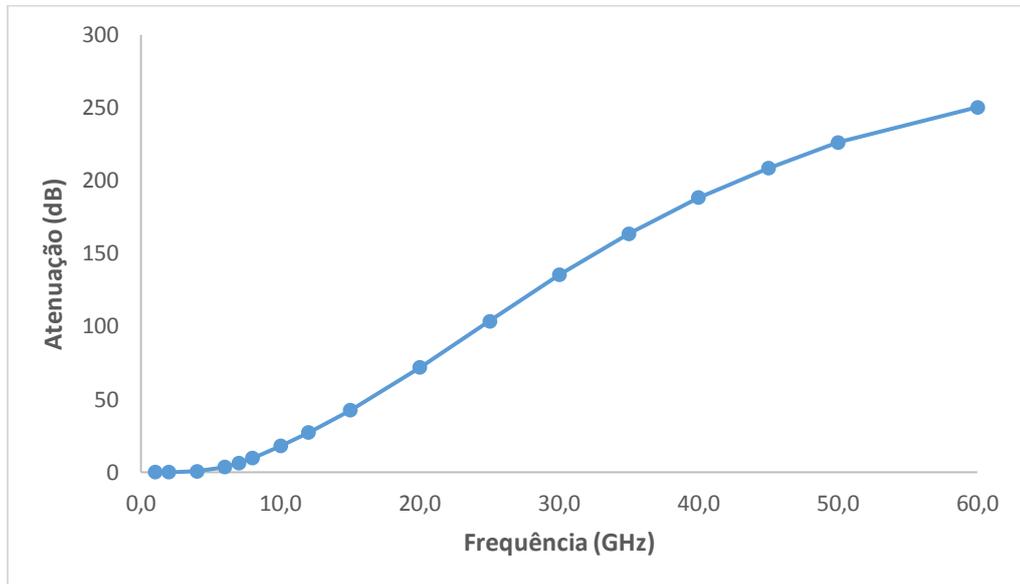
Tabela 18- Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva na cidade de Uberlândia. [16]

Frequência (GHz)	Atenuação em dB
	p = 0,01
1	0.0188632
2	0.09043644
4	0.67151482
6	3.46244535
7	6.46625283
8	9.58733715
10	17.8834471
12	27.1717059
15	42.5818337
20	71.788507
25	103.584463
30	135.401105
35	163.69049
40	188.356657
45	208.435427
50	226.246231
60	250.369355

Fonte: O Autor

Gerando assim, o gráfico 11 abaixo.

Gráfico 11: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.



Fonte: O Autor.

Para o valor da taxa excedida, conforme a figura 11, foi utilizado a taxa de  $R_p = 67 \text{ mm/h}$  (região G), obteve se a tabela 19.

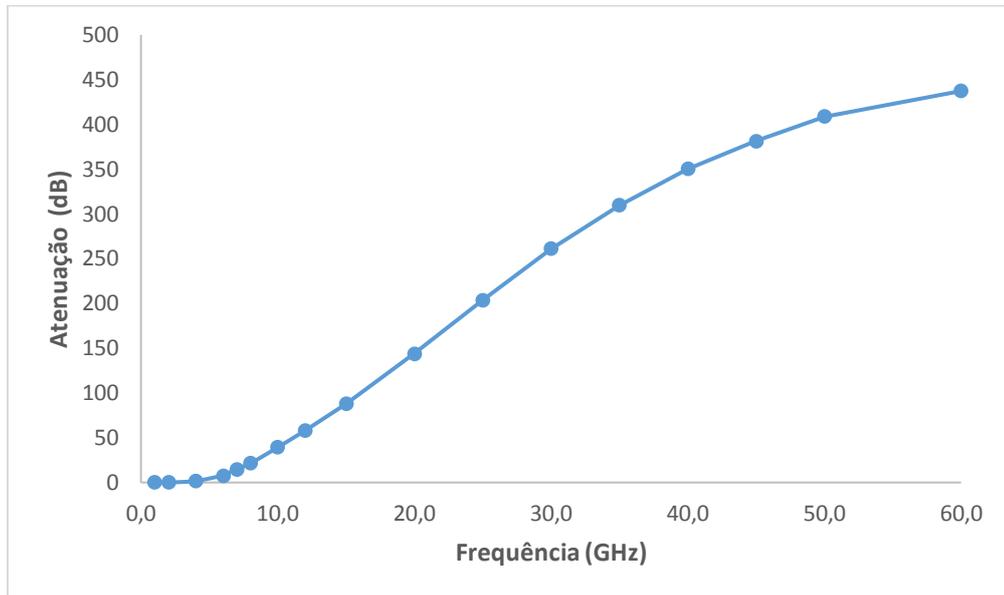
Tabela 19- Tabela das atenuações em função das probabilidades para taxa de chuva na cidade de Uberlândia [16].

Frequência (GHz)	Atenuação em dB	Frequência (GHz)	Atenuação em dB
	p = 0,01		p = 0,01
1	0.034654145	20	143.8461442
2	0.177122431	25	203.7393876
4	1.361062565	30	261.2834921
6	7.732570202	35	309.7716164
7	14.62957672	40	350.1218705
8	21.63179912	45	381.4139289
10	39.29696384	50	408.783483
12	57.81463794	60	437.2862185
15	87.69439732	-	-

Fonte: O Autor.

Gerando assim, o gráfico 12 abaixo.

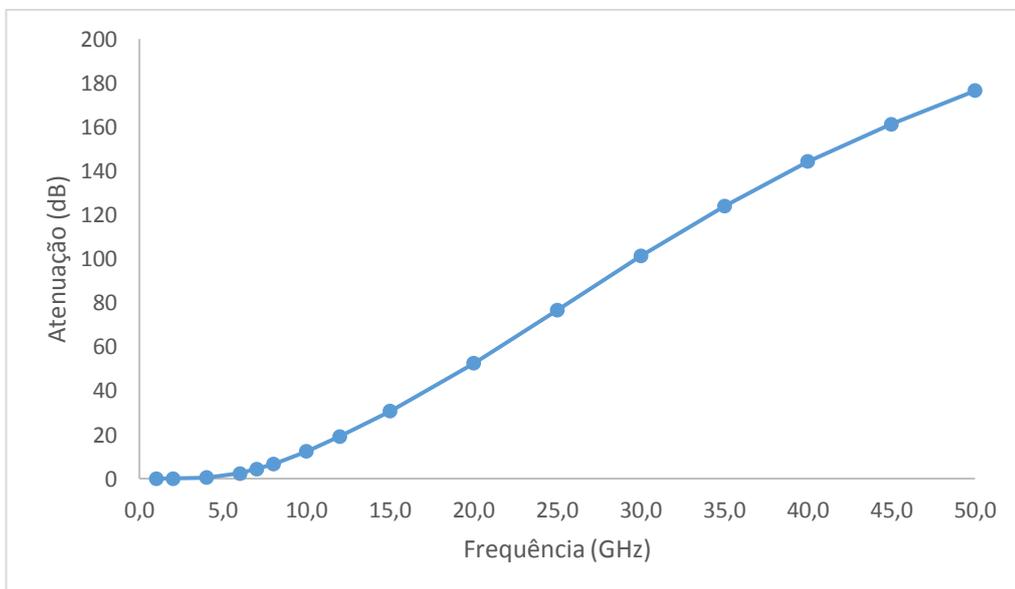
Gráfico 12: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.



Fonte: O Autor

Conforme foi feito no modelo CCIR, para a devida compreensão da precipitação, foi realizado o cálculo para os últimos 5 anos, 2014 a 2018, na qual obteve o gráfico 13.

Gráfico 13: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal.



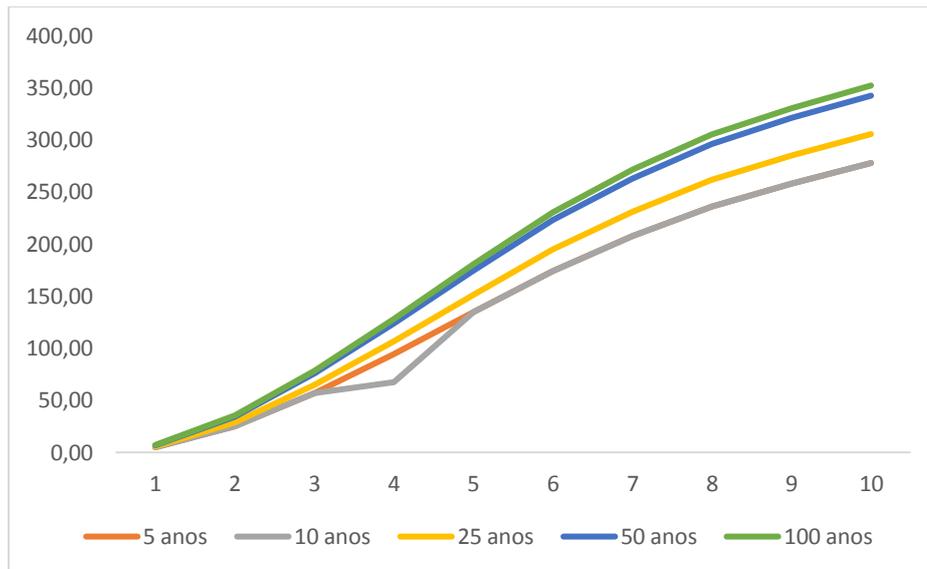
Fonte: O Autor

No modelo Crane Global, foi feito apenas para o valor de probabilidade de ocorrência 0,01%, devido à confiabilidade. Da mesma forma que o modelo CCIR mostrou, houve uma diferença grande entre o modelo teórico e modelo prático, na qual obteve uma diferença de

186.9169 dB, na frequência de 60 GHz. Também demonstra que quanto maior for frequência, maior será sua atenuação.

De acordo com o gráfico 14, podemos observar o intervalo de tempo para que uma dada chuva de intensidade e duração, ou seja, para vários períodos de retorno ou tempo de recorrência.

Gráfico 14: Relação entre atenuação em dB e a frequência em GHz devido a polarização horizontal variando o período de retorno.



Fonte: O Autor

### 5.3 Comparação entre as atenuações calculadas pelos modelos CCIR e Crane

A tabela 20 mostra a comparação entre o modelo CCIR e Crane Global, na probabilidade de 0,01% na cidade de Uberlândia.

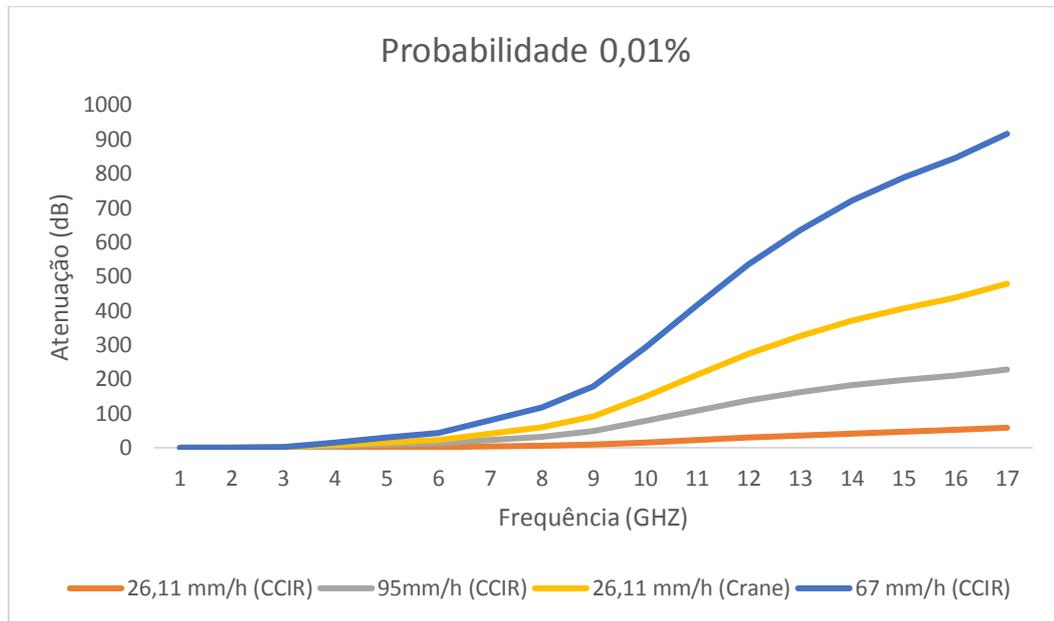
Tabela 20 – Comparações entre as atenuações pelos modelos CCIR e Crane na cidade de Uberlândia[16].

Frequência (GHz)	Probabilidade 0,01%			
	CCIR		Crane	
	Chuva Regional 26,11 mm/h	Chuva Modelo 95 mm/h	Chuva Regional 26,11 mm/h	Chuva Modelo 67 mm/h
1	0.0042	0.0137	0.0188	0.03465
2	0.0199	0.0690	0.0904	0.1771
4	0.1405	0.5978	0.6715	1.3610
6	0.6964	3.7717	3.4624	7.7325
7	1.2954	7.2365	6.4662	14.6295
8	1.9222	10.6691	9.5873	21.6317
10	3.6208	18.8162	17.8833	39.2969
12	5.5596	26.7721	27.1717	57.8146
15	8.8368	39.2277	42.5818	87.6943
20	15.1128	62.4874	71.7885	143.8461
25	22.0439	86.7802	103.5844	203.7393
30	29.1767	109.0766	135.4011	261.2834
35	35.7803	126.7014	163.6904	309.7716
40	41.7911	140.5351	188.3566	350.1218
45	46.9281	150.6402	208.4354	381.4139
50	51.6026	159.3499	226.2462	408.7834
60	58.3897	169.6889	250.3693	437.2862

Fonte : O Autor

Gerando assim, o gráfico 15 abaixo.

Gráfico 15: Comparação da atenuação em relação a frequência entre modelo CCIR (teórico e medido) com modelo Crane Global (teórico e medido).



Fonte: O Autor

A tabela acima faz uma comparação entre as atenuações para cada modelo, considerando a intensidade de chuva na cidade de Uberlândia, que servem de amostra para todo o corredor geográfico abordado, e aquelas intensidades sugeridas quando não são disponíveis dados do local próprio.

#### 5.4 Considerações finais

Nesse capítulo apresentou os resultados obtidos através dos cálculos de atenuação devido à chuva, pelos modelos CCIR e Crane, onde mostrou seu comportamento para a mesma frequência são diferentes. A comparação entre os dois modelos foi estabelecida a probabilidade de 0,01% do tempo, ou seja, 53 minutos do ano [4]. Assim, pode se observar que os resultados apontam para uma estimativa das intensidades de chuvas sugeridas, o que resultam em atenuações maiores.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

Como a comunicação via satélite não possui barreiras, basta a região abranger pelo satélite que a comunicação pode ser estabelecida, podendo ser transmitidos voz, dados, Tv e etc. No momento que consideramos uma comunicação no espaço livre, estamos sujeitos a considerar em que a onda se propaga como se não tivesse nenhuma interferência atmosférica.

Portanto, na maior parte da faixa de frequências, os efeitos mais significativos são a atenuação do sinal, causada pela atmosfera, e a atenuação causada pelas chuvas.

Dentro do conceito de chuva intensa, deve ser lembrado que quanto mais curta a duração de uma precipitação, maior a chance de que ela tenha sido muito intensa, e que quanto mais frequente uma chuva maior é a probabilidade de sua ocorrência. A precipitação ao longo do tempo e do espaço pode ser caracterizada como variável associada aos processos meteorológicos e/ou hidrológicos, que devido ao fato de apresentarem um caráter aleatório torna-se necessária a utilização de métodos estatísticos para análise e quantificação da sua variabilidade. Assim, na análise de uma chuva intensa, deve ser considerada a inter-relação entre essas variáveis: Intensidade – Duração – Frequência. Esse processo é possível através da utilização das chamadas curvas IDF.

Visto que o tipo e o comportamento das chuvas apresentam grande variação dependendo da região e horário e seu comportamento, deve, portanto, se utilizar dados de taxa de precipitação medidos localmente. Caso não se possua esta informação é necessário utilizar valores obtidos em regiões climaticamente semelhantes.

Na cidade de Uberlândia podemos observar, os meses com maior precipitação de chuva foi em novembro, dezembro e janeiro. A média de precipitação nos últimos 5 anos é de 310,72 mm em novembro, 258,88 mm em dezembro, 231,92 em janeiro. A média de precipitação anual é de 1478,14 mm, no período de 1981 a 2015.

Esse trabalho tem como propósito, a observação da intensidade da chuva (mm/h) para excedente de 0,01% do tempo (53 minutos), que é aplicado nos cálculos de projetos de enlace de via satélite. Assim, com a intensidade de chuvas a curto prazo relacionadas, pode-se obter um mapa de taxa de chuva em mm/h, para cada microrregião, mesmo ciente de que pela aleatoriedade, pode chover forte por curto espaço de tempo e deixar de fazê-lo por um longo período.

Os modelos utilizados aconselham, a utilizar quando não se tem histórico de dados da região, de 95 mm/h para o modelo CCIR e 67 mm/h para o modelo Crane Global. Através disso, pode-se fazer uma comparação através dos cálculos, onde existem diferença entre os dados obtidos no local desejado com os dados recomendados pelos modelos. A função acumulada

anual comparada com o desvio entre a previsão das medidas coloca os modelos na mesma ordem de precisão.

Assim, podemos concluir que quanto maior a frequência, maior é a atenuação considerando a mesma taxa de chuva na qual já é esperado, pois a atenuação é diretamente proporcional à intensidade da chuva.

## REFERÊNCIAS

- [1] IPPOLITO, L.J. **Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance**. First. Washington, DC: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-72527-6.
- [2] Baschta Júnior, Roland. **Satélite de Comunicações**. Departamento de Eletrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba. Disponível em : [paginapessoal.utfpr.edu.br > amiziara > cap3apost](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amiziara/cap3apost)  
Acesso em: 10 de novembro de 2019.
- [3] ALLNUT, JEREMY. **Space to earth radio propagation**. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [4] ALENCAR DE ARRUDA, Benedito. **Estudo comparativo das técnicas para cálculo de atenuação devido à chuva**. Orientador: Gilberto Arantes Carrijo. 2008. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14396>. Acesso em: 1 de outubro de 2019.
- [5] Maral, G., Bousquet, **Satellite Communications System**, Baffin Lane : Wiley, 1993.
- [6] Apostila Atenuação, Gilberto Carrijo.
- [7] Disponível em : <http://web.rcts.pt/~pr1085/Humidade/Precipitacao.htm>  
Acesso em 08 de outubro de 2019.
- [8] ALLNUT, JEREMY. **Space to earth radio propagation**. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [9] PEREZ GARCÍA., N. A. **Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS**. Rio de Janeiro, Abril 2000. p. 223. Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [10] IPPOLITO, L.J. **Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance**. First. Washington, DC: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-72527-6.
- [11] MARTINS, A. F.; CARPENEDO, C. B. **Tutorial para download de dados da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática do INMET em Uberlândia - MG. Série: Notas Técnicas. Uberlândia: Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos – LCRH/ Instituto de Geografia/ Universidade Federal de Uberlândia. n.002, 9 p.** 2018. Disponível em: <https://lcrhufu.wixsite.com/lcrh>. Acesso em : 05 de novembro de 2019.

- [12] ANDRADE, L. P. S.; CARPENEDO, C. B. **Estação meteorológica da UFU: Caracterização dos instrumentos e seus procedimentos**. Série: Notas Técnicas. Uberlândia: Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos – LCRH/ Instituto de Geografia/ Universidade Federal de Uberlândia. n.001, 13 p. 2018. Disponível em: <https://lcrhufu.wixsite.com/lcrh>. Acesso em : 05 de novembro de 2019.
- [13] Ippolito, L. J., “**Radiowave Propagation in Satellite Communications.**”
- [14] CCIR, Report 721-1, “ **Attenuation by Hydrometeors in Particular Precipitation, and other Atmospheric Particles**”, in Volume V, Propagation Non-ionized Media, Recommendation and Reports of the CCIR, 1982, pp 167-181, International Telecommunications Union, Geneva, 1982.
- [15] CAMPOS, A. R., et al. **Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí**. Revista Ciência Agronômica, v. 45, n. 3, p. 488-498, jul/set de 2014.
- [16] PETRUCCI, Eduardo. **Características do clima de Uberlândia-MG: Análise da temperatura, precipitação e umidade relativa**. Orientador: Luiz Antônio de Oliveria. 2018. Dissertação (Mestrado Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20810>. Acesso em: 25 de novembro de 2019