

6

Características dinâmicas da taxa de precipitação na região Amazônica

6.1

Introdução

No projeto de sistemas de comunicações via satélite de alta confiabilidade utilizam-se, normalmente, margens de desvanecimento elevadas para compensar o efeito da atenuação por chuva. Nesta situação, a definição da margem é feita a partir da distribuição cumulativa anual da taxa de precipitação na área em estudo. Entretanto, o mesmo não acontece no caso dos enlaces de baixa disponibilidade como, por exemplo, nos sistemas de radiodifusão por satélite (DTH – *Direct To Home*) e nos sistemas VSAT (*Very Small Aperture Terminal*). Em tais sistemas, onde é aceitável uma indisponibilidade da ordem de 0,3 % do ano [14], a variabilidade temporal do desvanecimento tem um impacto importante no projeto dos sistemas. Conseqüentemente é necessário dispor de um conhecimento detalhado da dinâmica da chuva, onde variações diurnas e sazonais da duração do desvanecimento, assim como o intervalo entre eventos consecutivos, passam a ser de fundamental relevância. Este conhecimento possibilita implementar técnicas de melhoria que permitam garantir a operação satisfatória do enlace, mesmo em condições adversas de propagação.

Sob o ponto de vista dinâmico, relacionar a taxa de precipitação com a atenuação do sinal não é uma tarefa simples [65]. Dentre os diversos fatores que tornam esta conversão complexa, destaca-se a não homogeneidade lateral e vertical da célula de chuva e a possibilidade da existência de mais de uma célula de chuva ao longo do enlace analisado. Tentativas de se definir procedimentos capazes de relacionar, estatisticamente, os parâmetros dinâmicos da chuva com os correspondentes ao desvanecimento do sinal são encontradas na literatura técnica [37,66,67,68]. Entretanto, até o presente, nenhum destes trabalhos teve o reconhecimento de propor um modelo que conseguisse executar de forma precisa esta conversão [69]. Por outro lado, de acordo com Timothy [67], para ângulos de

elevação acima de 30^0 , os níveis de taxa de precipitação medida para uma dada probabilidade podem ser utilizados na obtenção de informações dinâmicas associadas à atenuação do sinal em enlaces satélite. Isso ocorre pela diminuição da probabilidade da ocorrência de mais de uma célula nos enlaces satélite com ângulo de elevação elevados e pela diminuição do trecho do enlace dentro da célula de chuva. Um estudo realizado por Lekkla e Prapinmongkolkarn [70] reforça esta conclusão de Timothy. É claro que a precisão deste tipo de procedimento dependerá diretamente da precisão do modelo de atenuação adotado para relacionar a taxa de precipitação com a atenuação do sinal em uma dada probabilidade.

No contexto global desta tese, este capítulo descreve aspectos básicos da dinâmica da taxa de precipitação na região Amazônica. Pela falta de dados específicos sobre a atenuação do sinal não há intenção de se desenvolver um modelo do tipo citado no parágrafo anterior. Pretende-se apenas comentar o comportamento dos parâmetros que servem de referência para a definição das técnicas de melhoria usuais, tais como, controle da potência de transmissão, controle da taxa de transmissão em função qualidade do enlace, códigos corretores de erro, etc.

6.2.**Comportamento estatístico da duração e do número de eventos de chuva**

Esta Seção apresenta informações relacionadas à duração e ao número de eventos correspondentes a um determinado nível de precipitação. São analisados os intervalos de tempo no qual determinada taxa de precipitação é excedida durante um ano de medição. O período de medição de cada sítio é o mesmo do que o apresentado na tabela 2 do capítulo 3. A soma total destes intervalos de tempo, duração total, o número de vezes que ocorre a ultrapassagem, número de eventos, e a duração média do desvanecimento são apresentados nas tabelas de 25 a 32 para os sítios analisados. A taxa de precipitação utilizada na análise foi integrada em 10 segundos ao invés de 1 minuto, de forma a se dar um caráter mais instantâneo para a mesma, aproximando-se mais do comportamento dinâmico apresentado pela atenuação do sinal [37].

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	274680	326,22	842
20	166050	182,07	912
30	116240	136,43	852
40	86130	118,47	727
50	63050	88,55	712
60	47990	83,03	578
70	34700	68,58	506
80	25360	70,64	359
90	20230	64,22	315
100	12740	46,16	276
110	9210	40,57	227
120	7630	43,11	177
130	4890	33,49	146
140	3140	29,90	105
150	1970	22,39	88

Tabela 25 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Belém.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	67310	271,41	248
20	34360	155,48	221
30	23240	121,68	191
40	16280	98,67	165
50	11660	82,11	142
60	8670	69,36	125
70	6090	62,78	97
80	4150	58,45	71
90	3230	59,81	54
100	2140	56,32	38
110	1590	54,83	29
120	1390	47,93	29
130	750	28,85	26
140	480	26,67	18
150	290	22,31	13

Tabela 26 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Boa Vista.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	175820	266,39	660
20	104420	108,66	961
30	73010	69,07	1057
40	54820	49,30	1112
50	39980	39,35	1016
60	29450	37,23	791
70	21410	34,93	613
80	15280	31,90	479
90	11640	31,72	367
100	7680	24,77	310
110	5340	21,98	243
120	4150	24,41	170
130	2910	20,35	143
140	2010	17,33	116
150	1400	17,07	82

Tabela 27 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Cruzeiro do Sul.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	182870	259,02	706
20	97430	152,23	640
30	61960	108,89	569
40	41660	92,58	450
50	28190	81,01	348
60	20580	64,92	317
70	13980	47,71	293
80	8550	47,50	180
90	6600	41,25	160
100	3630	34,25	106
110	2240	28,00	80
120	1640	29,29	56
130	730	27,04	27
140	380	27,14	14
150	210	16,15	13

Tabela 28 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Macapá.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	161730	405,34	399
20	95980	209,56	458
30	64620	160,35	403
40	46670	127,86	365
50	31740	104,41	304
60	21980	82,94	265
70	14180	60,86	233
80	8350	48,83	171
90	5350	37,15	144
100	2400	36,92	65
110	1510	26,49	57
120	1110	26,43	42
130	580	26,36	22
140	270	19,29	14
150	150	13,64	11

Tabela 29 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Manaus.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	240810	311,93	772
20	136070	177,64	766
30	89310	127,22	702
40	62360	103,07	605
50	42960	90,25	476
60	32080	78,63	408
70	22230	61,07	364
80	14920	49,57	301
90	10690	43,99	243
100	5830	33,90	172
110	3810	32,29	118
120	2980	32,39	92
130	1910	29,84	64
140	1300	26,53	49
150	870	24,86	35

Tabela 30 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Santarém.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	215220	288,89	745
20	123880	163,00	760
30	83230	108,23	769
40	58100	97,65	595
50	41620	89,70	464
60	32460	77,66	418
70	23940	61,86	387
80	16180	55,99	289
90	11980	47,35	253
100	6410	33,04	194
110	3780	27,79	136
120	2860	30,11	95
130	1700	27,87	61
140	1020	26,15	39
150	710	23,67	30

Tabela 31 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de São Gabriel da Cachoeira.

R₀ (mm/h)	Duração Total (s)	Média Dur. Evento (s)	Nr Eventos
10	251960	353,88	712
20	141620	206,14	687
30	92660	138,09	671
40	62060	116,22	534
50	41930	94,22	445
60	30430	82,24	370
70	19740	60,55	326
80	12030	62,66	192
90	9030	58,26	155
100	5310	55,31	96
110	3600	39,56	91
120	3000	38,46	78
130	1680	32,31	52
140	900	25,00	36
150	560	29,47	19

Tabela 32 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação R_0 para o sítio de Tabatinga.

A variação da duração do evento pode ser avaliada através de duas distribuições estatísticas: a distribuição cumulativa da duração do evento e a distribuição cumulativa do número de eventos. Este trabalho apenas analisará a primeira delas. As figuras 48 e 49 apresentam, como exemplo, para uma taxa de precipitação excedida de 50 mm/h, as distribuições cumulativas da duração do desvanecimento encontradas nos oito sítios. Na verdade, esta distribuição mostra a probabilidade da duração do evento, no qual a taxa de precipitação foi excedida, ser maior do que o valor encontrado na abscissa do gráfico. Não houve um critério técnico para escolha dos sítios agrupados em cada figura.

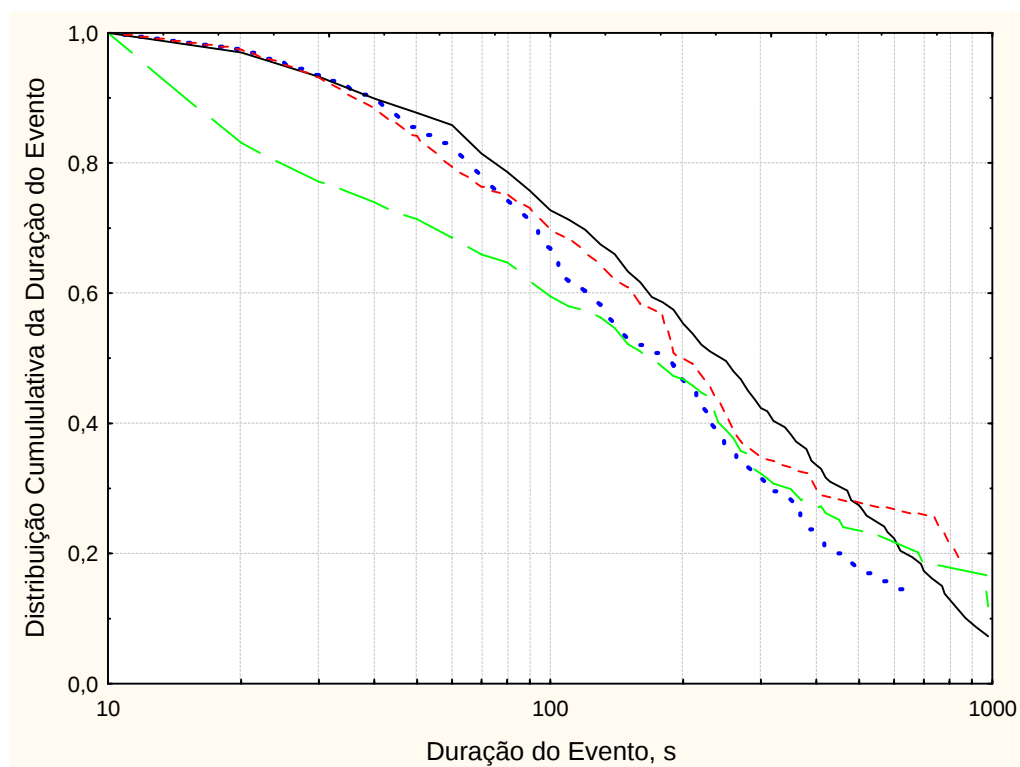


Figura 48 Distribuições cumulativas da duração de um evento relacionado à superação da taxa de 50mm/h pela chuva: Belém (- - -), Boa Vista (- - -), Cruzeiro do Sul ($\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$) e Macapá ($\frac{3}{4}$ $\frac{3}{4}$).

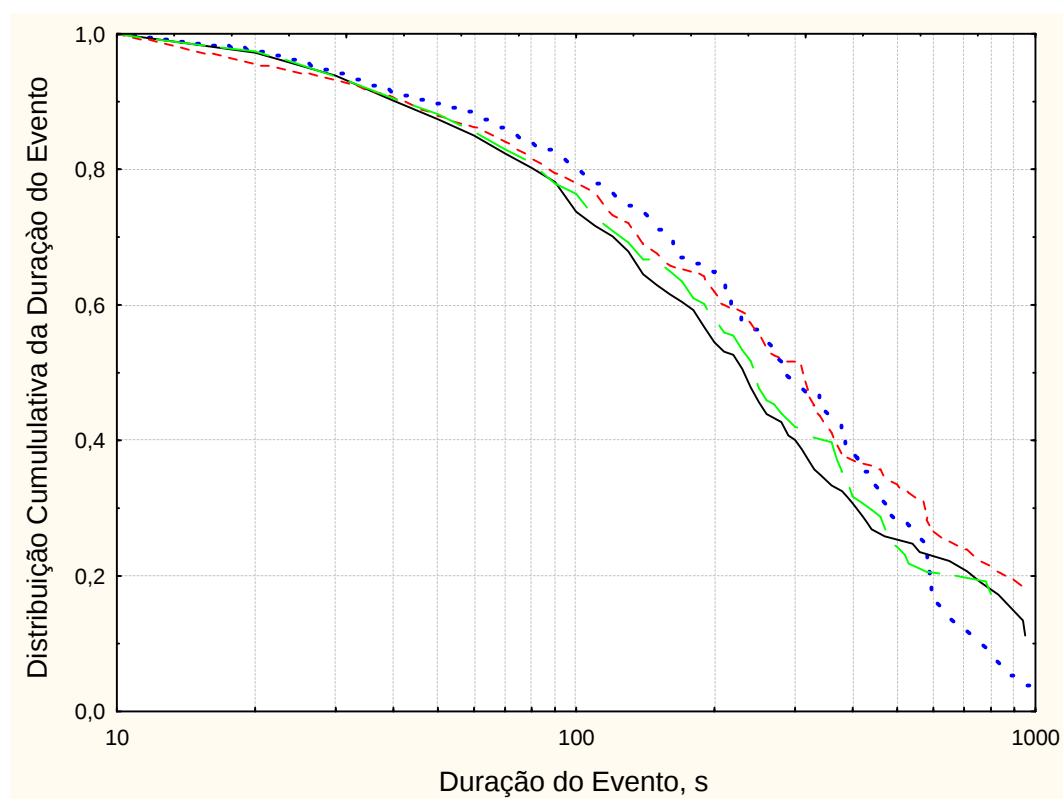


Figura 49 Distribuições cumulativas da duração de um evento relacionado à superação da taxa de 50mm/h pela chuva: Manaus (- - -), Santarém (- - -), São Gabriel da Cachoeira ($\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$) e Tabatinga ($\frac{3}{4}$ $\frac{3}{4}$).

Verifica-se que, com exceção de Cruzeiro do Sul, todos os demais sítios apresentaram curvas com o mesmo comportamento. A forma das curvas apresentadas também coincide com estudos realizados em outras regiões [8,72,73]. Não foi possível definir nenhum aspecto que associasse cada distribuição a um subtipo climático determinado. Na verdade ocorreu um “embaralhamento” das distribuições dos sítios, independentemente do subtipo climático correspondente. Por outro lado, pode-se verificar que, para níveis de probabilidade acima de 0,1 (10%), a variação entre a distribuição de cada sítio (exceto Cruzeiro do Sul) e a distribuição média dos 7 (sete) sítios restantes é menor do que 15%. Com base neste resultado conclui-se que dentro de uma região com as mesmas características climáticas, as variações do comportamento dinâmico não são significativas. Ressalte-se que nos trabalhos de Goldhirsh [69] e Coma [74] foram reportadas resultados equivalentes, em outras palavras, a estatística da duração dos eventos, dentro de uma mesma região climática, é relativamente invariante.

O sítio de Cruzeiro do Sul foi o único a apresentar um comportamento diferente. Esta característica, está relacionada a um maior número de eventos mais rápidos, principalmente com duração da ordem de 10 segundos. Caso estes eventos fossem retirados da análise, a forma da distribuição para Cruzeiro do Sul se equivaleria as demais. Repetindo a análise de variação das distribuições, porém considerando a integração de R em 1 min, não mais em 10 s, a distribuição para o sítio de Cruzeiro do Sul também entra na faixa de 15% em relação à distribuição média.

No que se refere ao comportamento dinâmico do desvanecimento do sinal, distribuições do tipo log-normal, Poisson, exponencial ou até mesmo combinações das mesmas têm sido utilizadas no modelamento das distribuições cumulativas de número e duração de eventos relacionados à atenuação provocada pela chuva [37,75,76]. Entretanto, apesar dos resultados satisfatórios, tais funções apresentam dificuldades quanto a sua manipulação matemática [8]. Por este motivo, procurou-se investigar alternativas para esta modelagem. Dentre as funções consideradas, a distribuição de Weibull com 2 parâmetros mostrou-se adequada, além de simplificar o equacionamento matemático. Cumpre assinalar que esta função tem sido empregada para modelar o desvanecimento em regiões tropicais e equatoriais [8,73,77].

Nesta linha de raciocínio, buscou-se verificar a modelagem do comportamento dinâmico da chuva através também da distribuição de Weibull. Foram feitos ajustes das distribuições apresentadas nas figuras 48 e 49 pelo método dos mínimos quadráticos. A tabela 33 apresenta os valores das correlações mínimas, máximas e médias encontradas em cada sítio para taxa de precipitação excedida variando de 10mm/h a 100mm/h. Os valores de correlação obtidos mostram-se satisfatórios para todos os sítios.

Local	Menor Correlação (%)	Maior Correlação (%)	Correlação Média (%)
Duração de Evento			
Belém	98,8	99,9	99,5
Boa Vista	92,2	99,2	96,1
Cruz. do Sul	96,6	99,8	98,8
Macapá	94,1	99,9	98,8
Manaus	97,3	99,9	99,3
Santarém	98,2	99,7	99,0
São G. Cach.	95,7	99,9	98,8
Tabatinga	96,3	99,9	98,7

Tabela 33 Correlações obtidas no ajuste das distribuições dinâmicas relacionadas à taxa de precipitação através de uma distribuição de Weibull.

A figura 50 apresenta uma comparação entre a distribuição de Belém medida e ajustada para a taxa excedida de 30 mm/h. Para as taxas de precipitação superiores a 100mm/h, a correlação torna-se um pouco pior, com o valor médio descendo para um patamar de 95%. Provavelmente, para taxas desta ordem, deve ser usado um tempo de integração inferior a 10s. Cumpre assinalar que o objetivo da análise desta questão foi apenas demonstrar que existe a possibilidade de ajustar as distribuições dinâmicas da taxa de precipitação através de uma distribuição de Weibull. Conforme comentado anteriormente, não há intenção de abordar o problema do relacionamento entre os comportamentos dinâmicos da chuva e do desvanecimento do sinal.

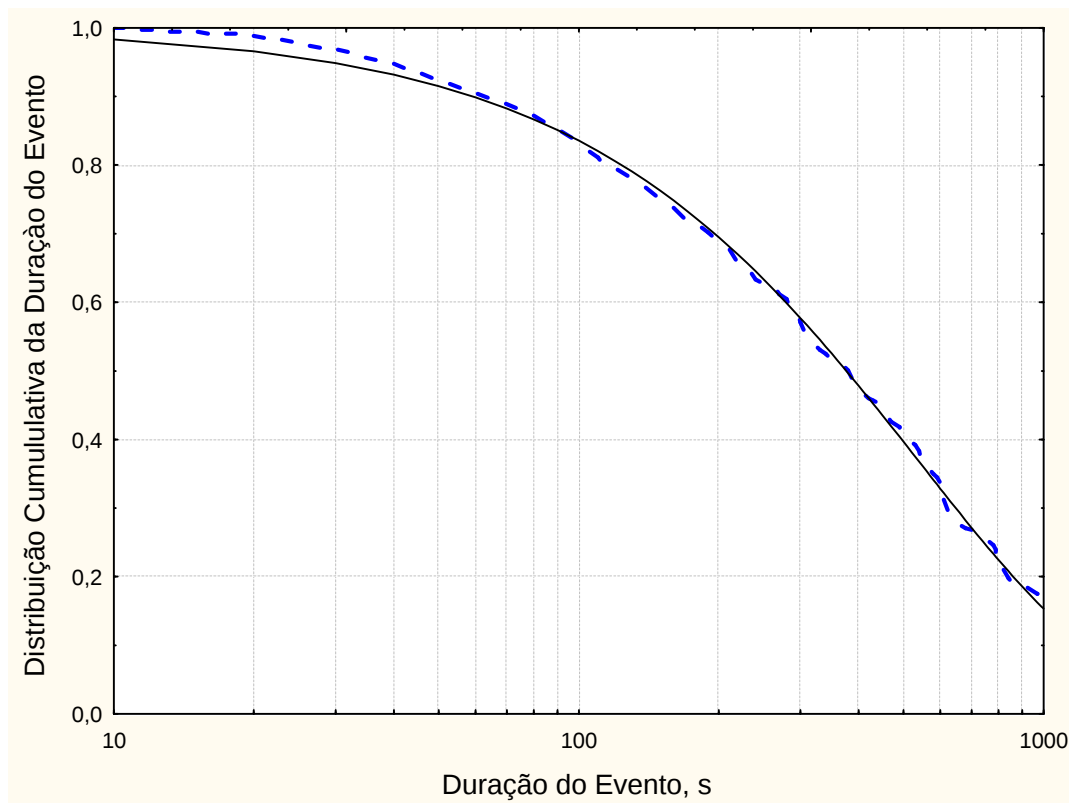


Figura 50 Comparação entre a distribuições cumulativas da duração de um evento relacionado à superação da taxa de 30mm/h medida em Belém (- - -) e ajustada (—).

Goldhirsh [69] e Timothy [67] verificaram que, fixando uma percentagem da distribuição cumulativa da duração do evento, a duração do evento varia com a taxa de precipitação excedida através de uma função potência, isso é:

$$D = a(p)R^{-b(p)} \quad (6.1)$$

onde D é a duração do evento, R a taxa de precipitação medida em mm/h e a e b variáveis do ajuste que dependerão da percentagem considerada p .

Foi feita a comparação de todos os sítios para diversas percentagens com a taxa de precipitação integrada em 10 s e também em 1 min. Os autores referenciados fizeram suas análises com uma taxa integrada em 1 min [67,69]. Em todos os sítios foi observado um comportamento idêntico, isso é, um bom ajuste da variação da duração do evento com uma função de potência, para percentagens entre 5% e 95%. Quanto menor a percentagem de tempo analisada, maior é a variação em torno desta distribuição ajustada, conforme pode ser analisado na figura 51. A figura 51 apresenta o exemplo para a cidade de Belém, com a taxa de precipitação integrada em 1 min. Nos trabalhos referenciados [67,69] não foram

observadas umas variações tão grandes, porém verifica-se que estes analisaram um número menor de valores de R.

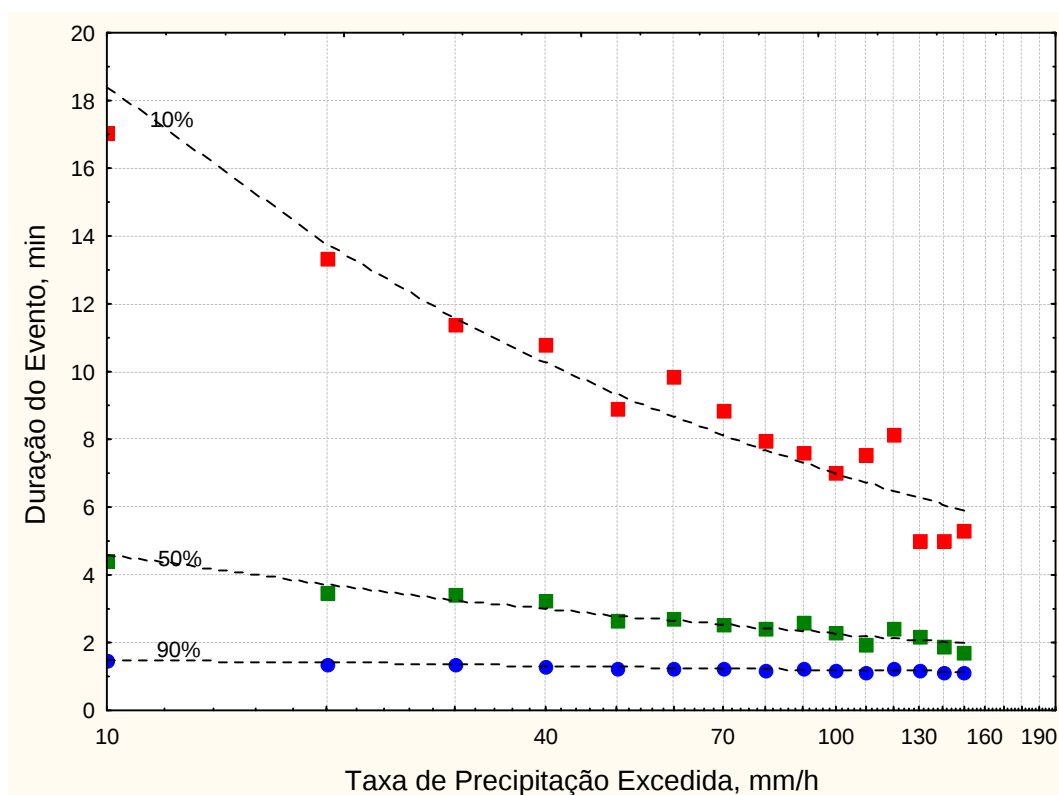


Figura 51 Variação da duração do evento com a taxa de precipitação excedida, em uma percentagem fixa, para a localidade de Belém.

Finalizando este item, resta analisar a duração média de eventos. Estes dados estão apresentados na terceira coluna das tabelas de 25 a 31. As figuras 52 e 53 apresentam a variação da duração média em função da taxa de precipitação excedida. Também neste caso, com exceção de Cruzeiro do Sul, verificou-se um comportamento similar para os demais sítios. Mais uma vez a discrepância observada em Cruzeiro do Sul pode ser creditada ao grande número de eventos rápidos detectados neste sítio. Caso o processamento dos dados utilização um tempo de integração superior a 10s, a diferença desapareceria.

Em todos os sítios as maiores durações corresponderam a uma faixa da taxa de precipitação que se estende até 70 ~ 80 mm/h. Considerando que estes valores correspondem a percentagens anuais superiores a 0,1% (ver Capítulo 3), é imediato inferir sobre a importância da duração média dos eventos na implementação das técnicas de melhoria. Para taxas de precipitação elevadas a duração média torna-se gradativamente menos relevante.

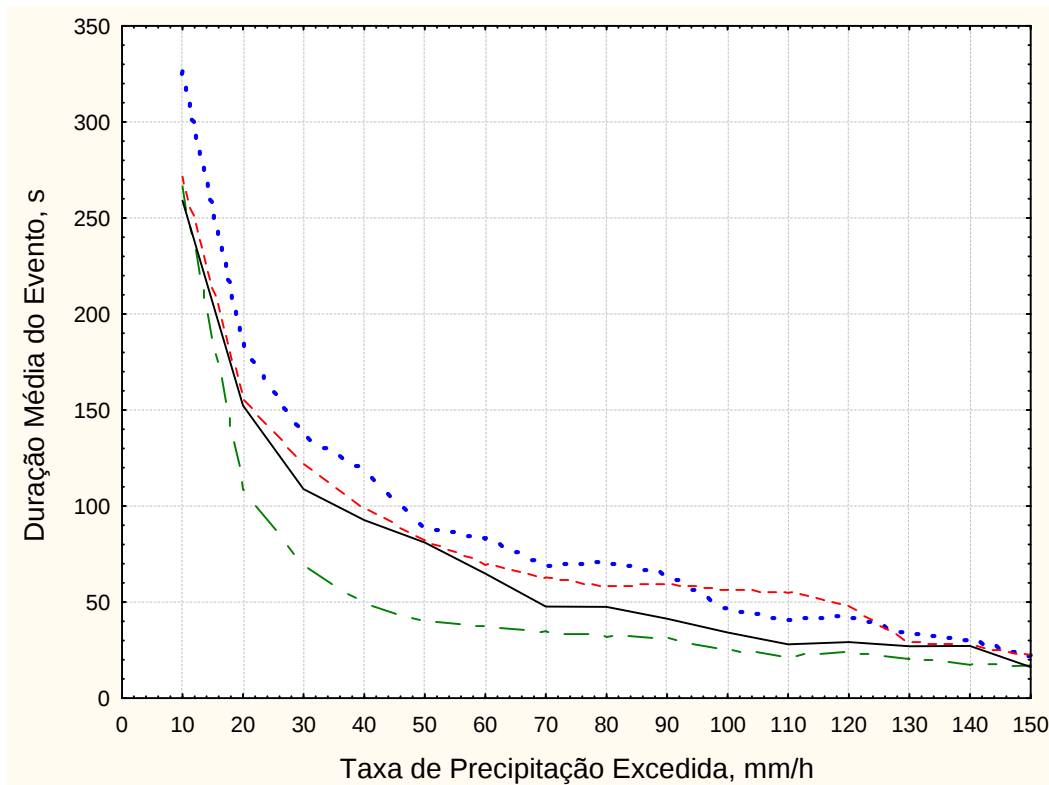


Figura 52 Variação da duração média do evento com a taxa de precipitação para o local para Belém (---), Boa Vista (---), Cruzeiro do Sul (---) e Macapá (---).

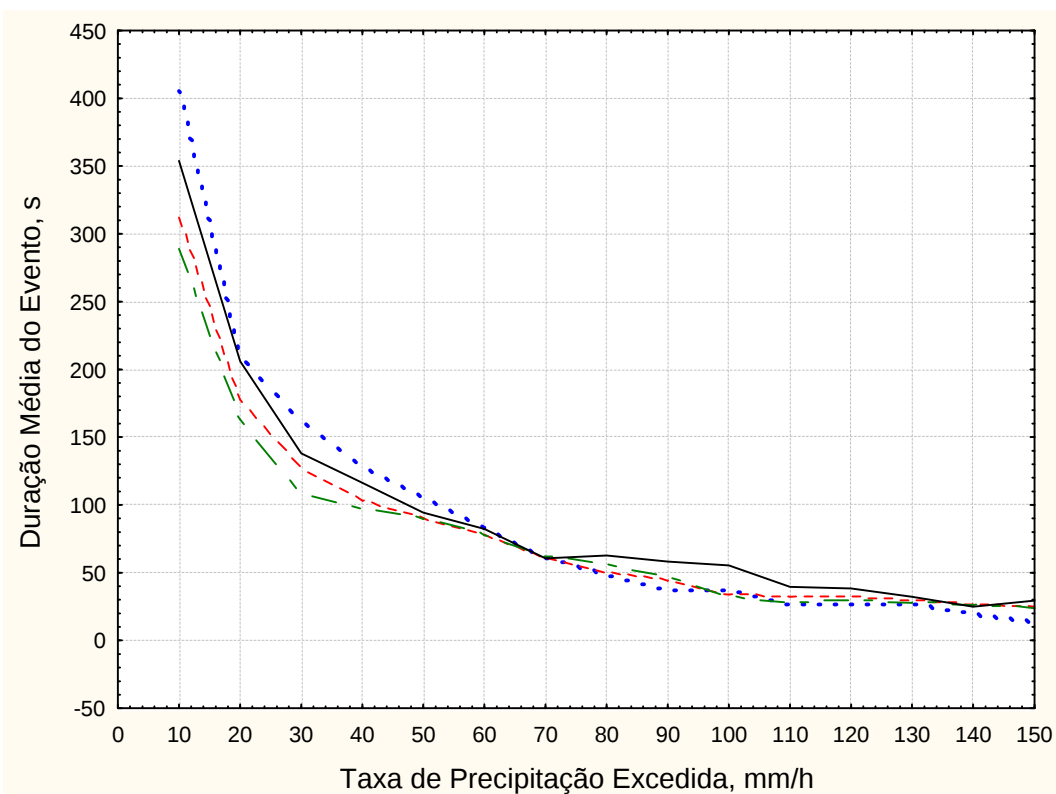


Figura 53 Variação da duração média do evento com a taxa de precipitação para o local para Manaus (---), Santarém (---), São Gabriel da Cachoeira (---) e Tabatinga (---).

6.3.

Variações horárias e mensais da precipitação

O estudo das variações horárias e mensais da precipitação é também importante na análise das condições a serem consideradas no projeto de sistema de telecomunicações. Em certos tipos de sistemas existe uma disponibilidade associada ao horário do dia. Neste caso, há necessidade de se conhecer, além do comportamento anual, as condições de propagação em determinados horários. As figuras 54 a 61 mostram exemplos da variação chuva acumulada, em cada hora do dia, para todos os sítios considerados neste trabalho. Os níveis de precipitação apresentados correspondem a valores médios durante um ano de medição.

Observa-se nestas figuras que existe um comportamento diversificado para cada sítio e para cada hora do dia. Por exemplo, em Belém há uma grande concentração de chuva entre 15 e 17 horas. Nos sítios de Manaus, Santarém e Cruzeiro do Sul os níveis de precipitação são aproximadamente equivalentes, porém a maior intensidade acontece em horários distintos. Em Macapá, São Gabriel da Cachoeira e Tabatinga há uma certa homogeneidade da chuva ao longo do dia. Finalmente, como seria de esperar a precipitação acumulada em Boa Vista é a menor de todos os sítios. Esta variabilidade é importante em função do tipo de sistema em operação. No caso de sistemas comerciais, a concentração de chuva nos horários da manhã e da tarde trazem mais problemas. Por outro lado, para os sistemas DTH, a situação é mais desfavorável para chuvas que acontecem no início da noite, no chamado horário nobre da televisão.

Pode ser verificado que a precipitação acumulada, em cada horário, está associada com a probabilidade de uma determinada taxa de chuva ser excedida durante este período do dia [14]. Na verdade através da distribuição cumulativa anual verifica-se que uma determinada taxa de precipitação será excedida em p_t % do tempo. Entretanto, esta percentagem do tempo é dividida, de forma heterogênea, ao longo do dia. Desta forma, um gráfico que apresente a probabilidade de uma determinada taxa de precipitação ser excedida, em um dado horário, deve apresentar a variação dos gráficos mostrados nas figuras de 54 a 61, para todos os valores de taxa de precipitação.

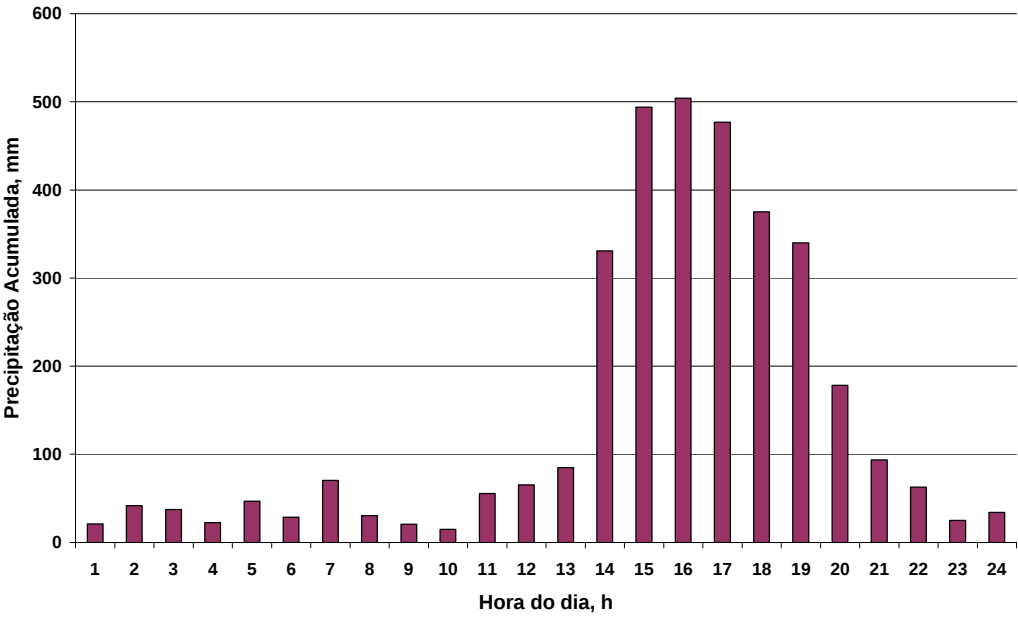


Figura 54 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Belém.

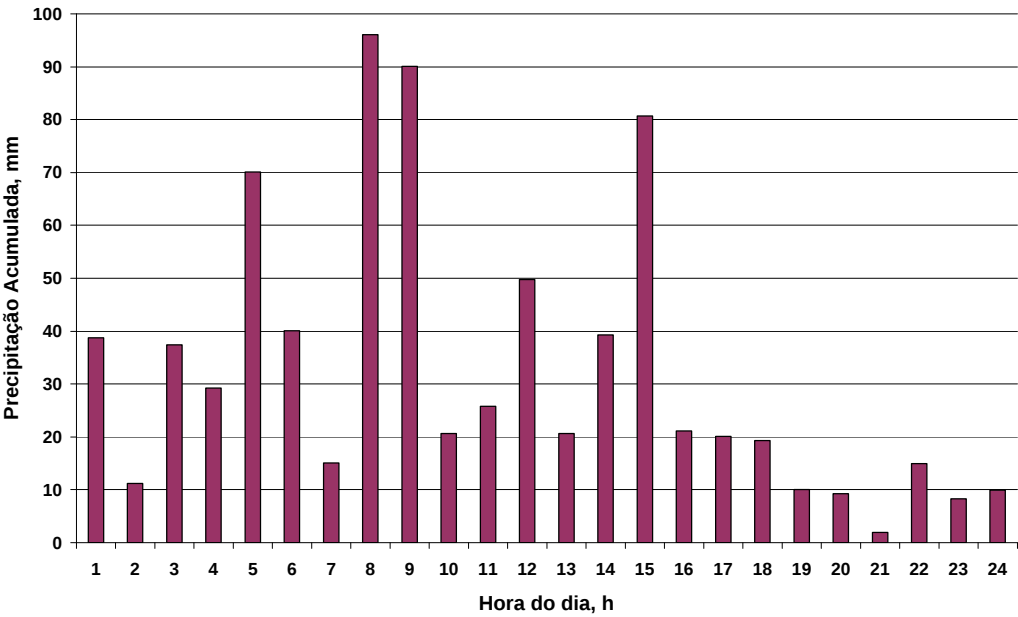


Figura 55 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Boa Vista.

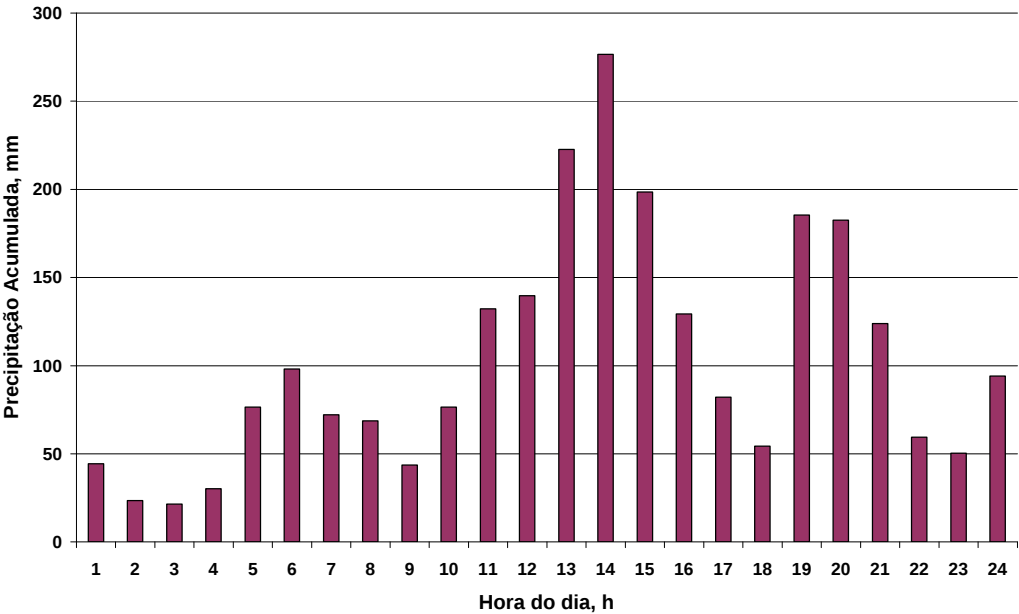


Figura 56 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Cruzeiro do Sul.

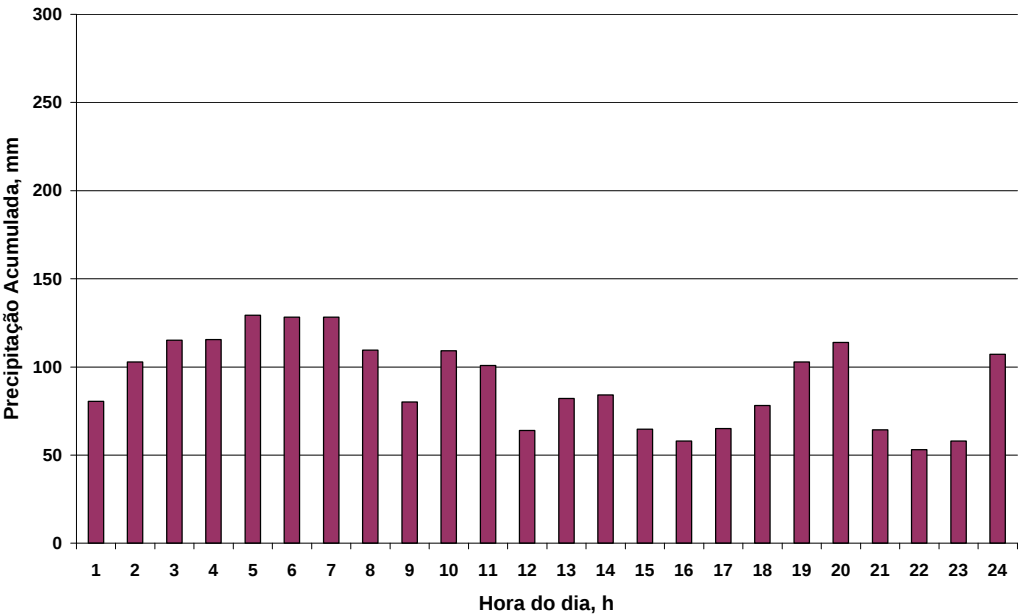


Figura 57 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Macapá.

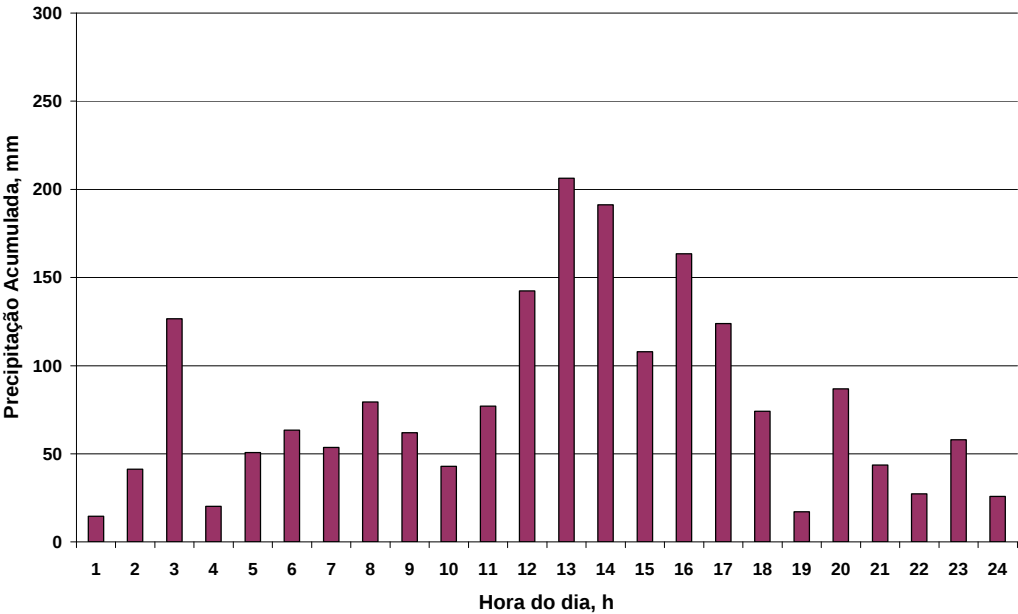


Figura 58 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Manaus.

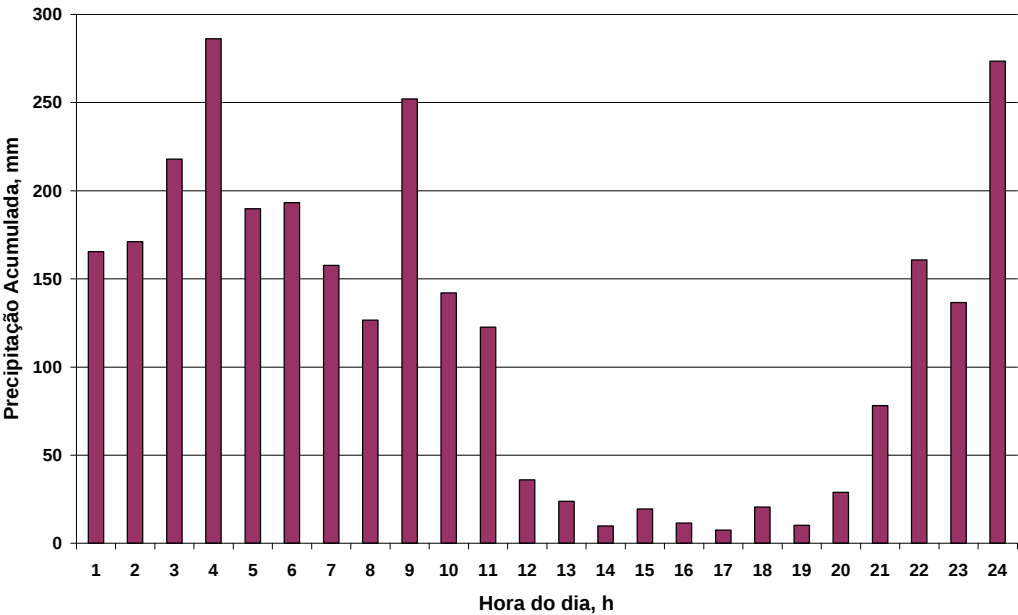


Figura 59 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Santarém.

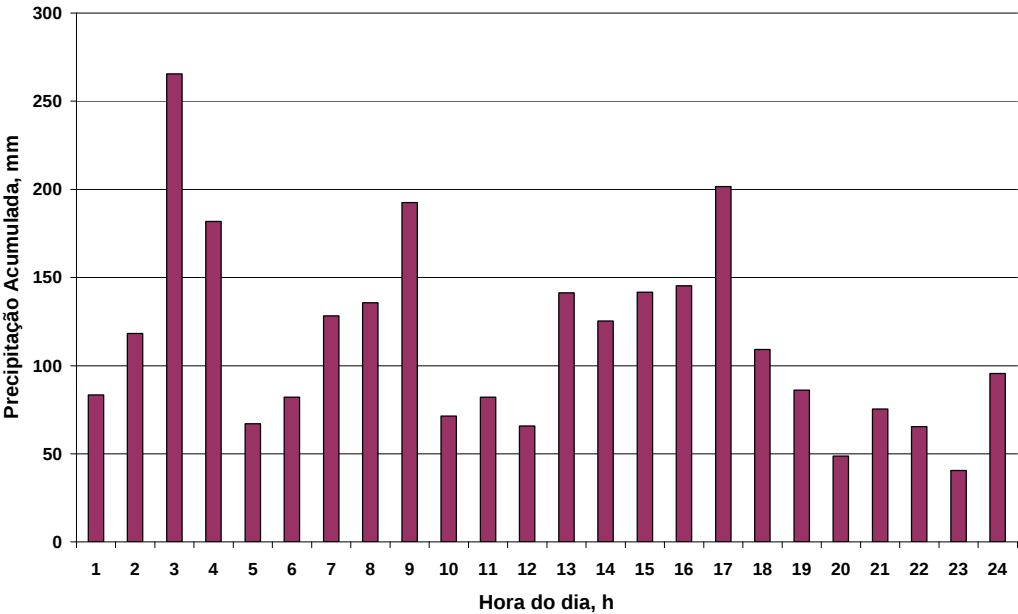


Figura 60 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de São Gabriel da Cachoeira.

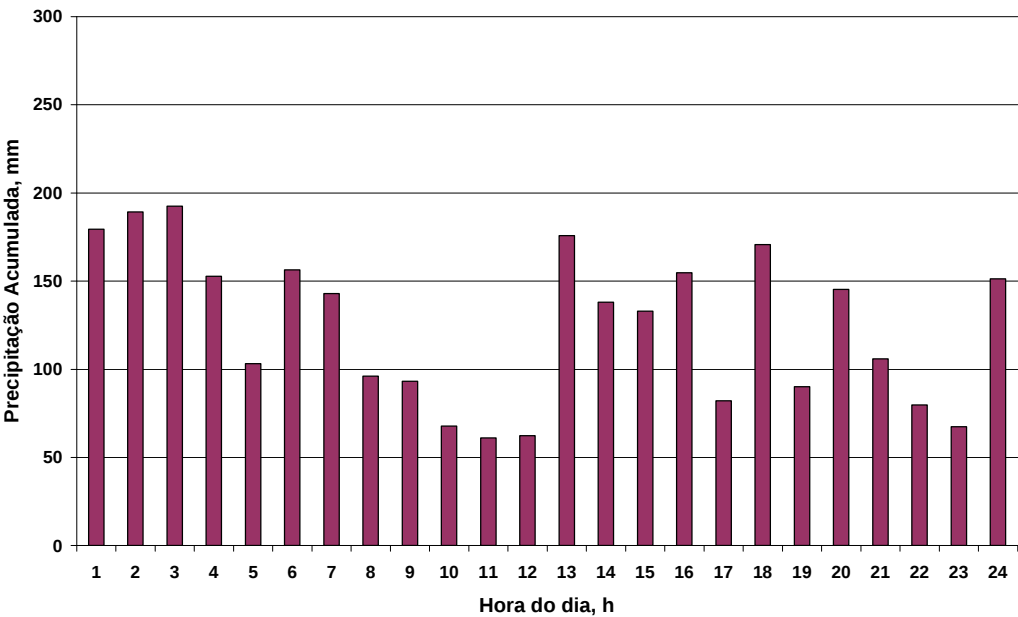


Figura 61 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Tabatinga.

A figura 62 fornece um exemplo para a cidade de Belém, tomando por referência uma taxa de precipitação de 70mm/h. Pelas tabelas 3 e 4 do capítulo 3, verifica-se que este valor corresponde a percentagens de 0,1% no ano e 0,25% no pior mês. Caso estes valores fossem utilizados como requisito de projeto, observasse pela figura 62, que os mesmos não seriam capazes de atender, em certos horários, a necessidade do sistema. Fato semelhante poderia ser observado no que diz respeito às variações mensais. Ilustrando esta situação, a figura 63 apresenta a variação mensal para o sítio de Cruzeiro do Sul, onde foi considerada uma taxa de 50mm/h, a qual corresponde a uma percentagem anual de 0,1% e de 0,35% no pior mês. Verifica-se para este caso a adoção do valor relativo ao pior mês no projeto atende o critério de disponibilidade para todo o ano. Entretanto, em parte dos meses, o projeto do sistema ficará superdimensionado. Estes dois exemplos evidenciam, mais uma vez, a importância das técnicas de melhoria nos sistemas de baixa disponibilidade.

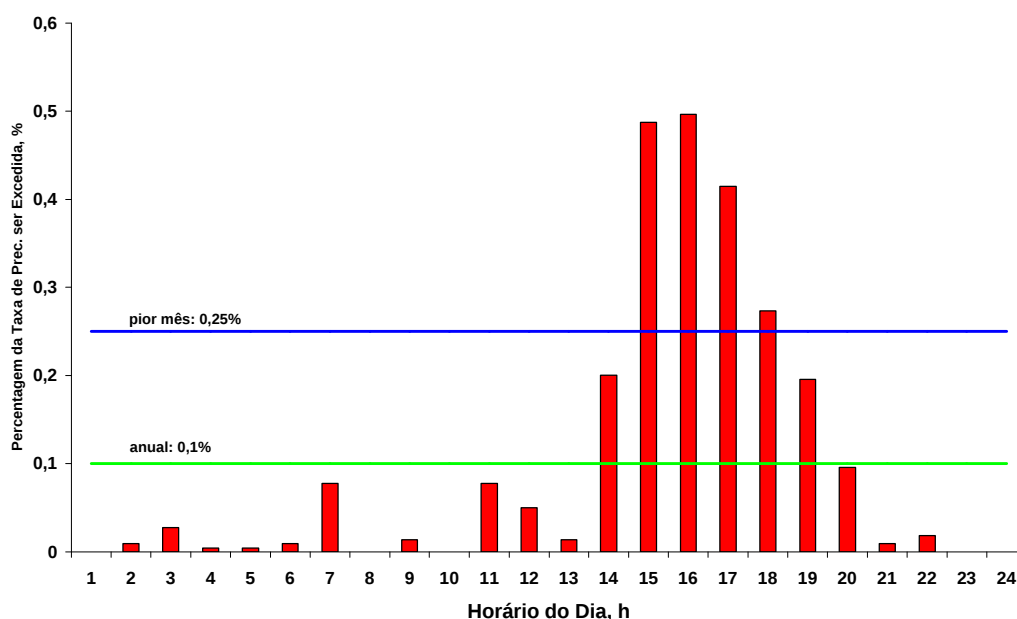


Figura 62 Variação da percentagem de uma determinada taxa de precipitação ser excedida em um determinado horário do dia. Cidade de Belém.

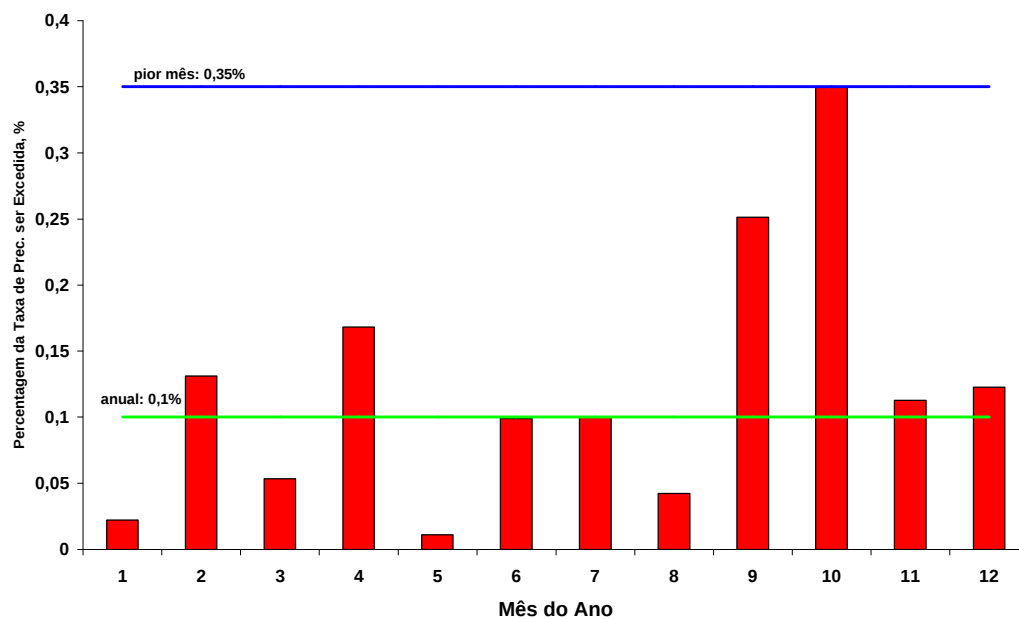


Figura 63 Variação da percentagem de uma determinada taxa de precipitação ser excedida em um determinado mês do ano. Cidade de Cruzeiro do Sul.