8
Estrutura horizontal da célula de chuva

8.1.
Procedimentos iniciais

No capítulo 7 foram definidas as relações entre Z e R para serem utilizadas na análise dos dados radares de Cruzeiro do Sul, Manaus e Tabatinga. A partir destas relações, os dados de refletividade obtidos pelos radares no período, podem ser transformados em dados de taxa de precipitação. Com estas informações, torna-se possível investigar a estrutura horizontal da célula de chuva, cujo conhecimento é de fundamental importância no estudo da atenuação provocada pela precipitação. Todos os procedimentos que foram realizados empregaram algoritmos em "Matlab" ou o programa "Statistica".

A primeira etapa nesta análise é conceituar célula de chuva com base nas informações originadas do radar. Neste sentido, foi definido como célula o conjunto de quadrículas, acima de um limiar pré-definido, que apresentem uma ligação entre si com pelo menos um de seus lados. A figura 83 apresenta um exemplo desta definição. Ressalta-se que ligações entre quadrículas apenas através da diagonal não serão consideradas, ou seja, serão definidas como células distintas. Este procedimento e, conseqüentemente, a geração das células de chuva é realizado para todos os valores de limiar de Z. O limiar inicia-se com o valor de 30,5dBZ e cresce com passo de 0,5dBZ.

No exemplo da figura 83, foi escolhido um limiar mínimo de 37,0dBZ. As quadrículas que apresentem valores menores do que este são zeradas automaticamente durante o procedimento de análise. Na representação da figura, as quadrículas em branco correspondem a refletividades inferiores a 37 dBZ. As demais quadrículas apresentam o valor da refletividade em dBZ. Verifica-se no exemplo em questão, a existência de quatro células. Na verdade, a denominação de célula será dada ao contorno externo do conjunto associado que apresenta uma borda segmentada. Sabe-se que no interior da área limitada por esta borda a precipitação será maior do que a precipitação mínima adotada como limiar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

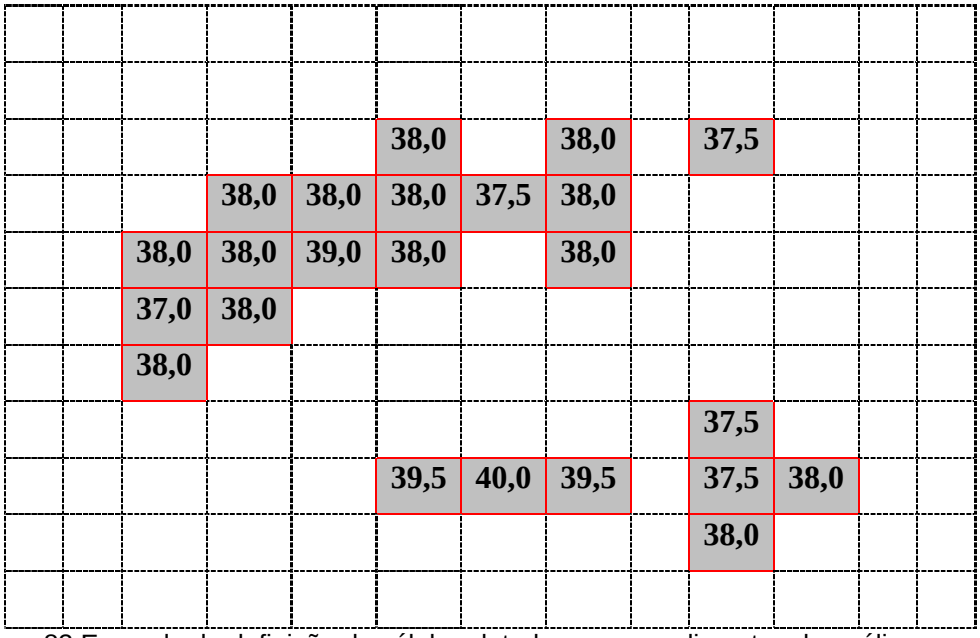

Figura 83 Exemplo da definição de célula adotado nos procedimentos de análise.

Este procedimento apresenta duas limitações. A primeira é a incapacidade de se distinguir uma única célula de um conjunto de células muito próximas. Por exemplo, a maior célula contida na figura 83, poderia ser uma única célula ou duas células, muito próximas, que acabaram sendo unidas na quadrícula com refletividade 37,5 dBz. Esta limitação produz, em limiares menores, um maior número de células grandes e um menor número de células pequenas. Para o caso dos limiares maiores, existe uma separação natural das células, minimizando este problema [103]. O procedimento de leitura adotado nesta tese, descritos nos parágrafos anteriores, introduziu uma minimização do erro quando comparado com o utilizado por Pawlina [103]. Em seu trabalho está utiliza um procedimento análogo ao nosso porém com uma pequena diferença na definição da célula. A figura 84 apresenta a mesma configuração da figura 83, porém com a definição de célula de acordo com a referência citada. Pode ser observado que a tendência neste procedimento é de criar células ainda maiores do que o procedimento aqui adotado, principalmente para níveis de precipitação de baixa intensidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

					38,0		**38,0**		**37,5**			
			38,0	**37,5**	**38,0**	**37,5**	**37,5**					
		38,0	**38,0**	**39,0**	**38,0**		**37,5**					
		37,5	**38,0**									
		38,0										
									37,5			
					39,5	**40,0**	**39,5**		**37,5**	**38,0**		
									38,0			

Figura 84 Exemplo da definição de célula adotado nos procedimentos em [90].

A segunda limitação se refere à existência de células que não se encontram totalmente na área de visibilidade do radar. Em função da adoção de uma distância máxima de 80 km (ver Seção 7.4) esta área é definida como um quadrado de 160 km de lado que tem o radar em seu centro. Estas células, por não estarem totalmente dentro da área de varredura do radar, terão a suas dimensões subestimadas. Este efeito também é mais sentido nos limiares mínimos menores. Para quantizar esta limitação, verificou-se o número de células que apresentavam pelo menos uma quadrícula na borda da área de varredura. Ressalte-se que, possivelmente algumas destas células não deveriam fazer parte desta estatística, pois apesar de estarem na borda podem estar totalmente contida dentro da área de varredura. O fato é que, como a investigação limitou-se a uma área previamente definida, não foi possível separar os dois tipos de células. Verificou-se que para os limiares relacionados à taxa de precipitação de 5mm/h existe de 8 a 10% do total de células analisadas na borda da área de varredura, enquanto que para limiares associados a 40mm/h este valor decresce para um patamar de 5%. Entretanto, conforme comentado acima, considerando a impossibilidade de identificar as células que se encontram integralmente na área, mesmo estando na borda, estas percentagens na prática ainda são um pouco menores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

As duas limitações aqui citadas de uma certa forma se contrapõem. Não existe uma forma de se prever a faixa de valores de taxa de precipitação na qual será afetada por esta limitação de leitura. O fato porém é que a tendência é que este efeito aumenta com a diminuição da taxa de precipitação, desaparecendo a partir de uma determinada taxa mínima. Mesmo para taxas menores do que esta, os erros associados a estas limitações devem permanecer em pequenos valores que possivelmente não iram interferir nas conclusões obtidas.

Adiante neste capítulo, são observadas algumas evidências de que existe uma certa distorção da informação, para valores de taxa de precipitação menores do que 40 mm/h. Nada se pode afirmar se esta distorção esta relacionada com as limitações anteriormente citadas ou outras possíveis fontes de erro que possam existir no processo de obtenção dos dados. Uma alternativa para correção das informações obtidas é proposta posteriormente. Esta questão voltará a ser tratada na Seção 8.4.

Cada célula será aqui definida através de sua área e em função do número de quadrículas. Cada quadrícula presente no CAPPI apresenta uma área de 1 km^2 (1km x 1km). No exemplo da figura 67, têm-se células com 1 km^2, 3 km^2, 4 km^2 e 15 km^2. Ressalta-se que não se tem informação de como se varia a taxa de precipitação dentro de cada célula. Sabe-se apenas de que a taxa é superior ao valor considerado como limiar.

Nesta Seção, a discussão foi limitada à dimensão da borda externa da precipitação, aqui definida como célula. Existem aplicações que necessitam deste tipo de informação, como por exemplo, o caso da técnica de diversidade espacial para estações terrenas, que será tratada na Seção 8.5. Considerando que os principais modelos adotados para o perfil da célula de chuva, quais sejam, os modelos cilíndrico [112,113,114], exponencial [104,105] e exponencial truncado [13,115] apresentam a projeção horizontal da célula como tendo uma forma circular, uma vez determinada a área (A) desta projeção, pode ser definido o diâmetro equivalente de cada célula através de $D = \frac{4A}{\pi}$. Apesar de, na grande maioria das observações, a projeção horizontal se aproximar mais de uma elipse, em termos prático, a aproximação circular é aceitável [104].

Finalizando esta Seção, cumpre assinalar que no processamento dos dados utilizados como subsídios para as considerações que serão analisadas nos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

próximos itens foram empregadas as quatro relações entre Z e R definidas no capítulo anterior (vide tabelas 39 e 40). De posse destas relações é possível relacionar os limiares mínimos de Z com os correspondentes limiares de R excedidos no interior de cada célula.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

8.2. Considerações sobre o número de células

Relativamente à estrutura da precipitação, a primeira consideração se refere à quantidade de células resultante da análise dos dados de cada radar. A relação entre célula e precipitação é fundamental no desenvolvimento de um modelo físico para o cálculo da atenuação [64]. A tabela 41 apresenta o número de células encontradas, para cada radar e com cada uma das relações. Apesar de se trabalhar com um valor único de taxa de precipitação por linha, pela existência de uma quantização dos valores de Z em passos de 0,5dBZ, existe uma associação de cada linha com uma faixa de valores de R. Isto explica a eventual igualdade de valores em duas linhas subseqüentes. Na verdade, apesar de possuírem taxas de precipitação diferentes, as duas linhas se encontram na mesma faixa de valores de R associada a um único Z. Quanto maior o valor de Z, maior também a dimensão da faixa de R associada. Para os piores casos, os valores são faixas de 0,5mm/h, no patamar de 5mm/h (10%), e de 15mm/h, no patamar de 200mm/h (7,5%). Este problema é minimizado, nas taxas superiores, pelos métodos com 2 segmentos discutidos no Capítulo 7. Estes métodos, por utilizarem uma relação mais precisa, diminuem, no patamar de 200mm/h, esta faixa para valores em torno de 8mm/h. Em alguns dos casos, o valor associado a 5mm/h ficou abaixo do fator de refletividade mínimo de 30,5dBZ, não sendo, portanto, detectado pelo processamento de leitura. Para estes casos, em lugar da taxa de 5mm/h, foram analisados os valores correspondentes à taxa de 7mm/h, apenas para se ter uma análise na menor taxa possível de ser processada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Cruzeiro do Sul				
Taxa de Precipitação (mm/h)	**Método Absoluto com 1 segmento**	**Método Relativo com 1 segmento**	**Método Absoluto com 2 segmentos**	**Método Relativo com 2 segmentos**
5	---	424.698	438.001	336.572
7	452.158	---	---	---
10	373.056	286.105	336.572	248.754
20	225.742	172.278	225.742	161.765
30	152.322	111.724	172.278	126.540
40	111.724	83.436	143.241	104.473
50	90.263	64.062	119.165	83.436
60	64.062	47.684	90.263	64.062
70	52.722	34.395	64.062	47.684
80	38.592	26.895	47.684	34.395
90	30.603	23.541	38.592	26.895
100	26.895	17.328	26.895	20.262
110	20.262	12.482	20.262	14.593
120	14.593	10.398	14.593	10.398
130	12.482	8.596	10.398	6.988
140	10.398	6.988	8.596	5.515
150	8.596	5.515	5.515	3.308
160	6.988	4.284	4.284	2.503
170	4.284	3.308	2.503	1.850
180	4.284	2.503	1.850	1.351
190	3.308	1.850	1.351	973
200	2.503	1.351	650	650
210	1.850	1.351	418	418
220	1.351	973	256	256
230	973	650	175	175
240	973	650	97	97
Manaus				
Taxa de Precipitação (mm/h)	**Método Absoluto com 1 segmento**	**Método Relativo com 1 segmento**	**Método Absoluto com 2 segmentos**	**Método Relativo com 2 segmentos**
5	569.351	667.255	508.221	609.040
10	375.712	465.903	375.712	465.903
20	206.079	242.857	242.857	291.326
30	148.517	175.786	195.183	229.418
40	113.481	139.521	166.725	195.183
50	88.467	105.140	148.517	175.786
60	64.829	88.467	105.140	130.315
70	50.478	64.829	72.414	96.688
80	38.148	50.478	50.478	64.829
90	32.680	38.148	32.680	44.144
100	22.903	32.680	22.903	27.500
110	18.950	22.903	12.210	15.368
120	15.368	18.950	7.447	9.559
130	12.210	15.368	4.270	5.714
140	9.559	12.210	3.180	3.180
150	7.447	9.559	1.726	1.726
160	5.714	7.447	948	948
170	4.270	5.714	716	716
180	3.180	4.270	403	403
190	2.355	3.180	333	333
200	2.355	2.355	267	219

Tabela 41 Quantidade de células analisadas por radar e por relação adotada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Manaus (continuação)				
Taxa de Precipitação (mm/h)	**Método Absoluto com 1 segmento**	**Método Relativo com 1 segmento**	**Método Absoluto com 2 segmentos**	**Método Relativo com 2 segmentos**
210	1.726	2.355	219	183
220	1.287	1.726	183	150
230	1.287	1.287	150	111
240	948	1.287	111	94
Tabatinga				
Taxa de Precipitação (mm/h)	**Método Absoluto com 1 segmento**	**Método Relativo com 1 segmento**	**Método Absoluto com 2 segmentos**	**Método Relativo com 2 segmentos**
5	---	---	531.607	475.147
7	571.846	512.031	---	---
10	420.224	386.192	353.582	310.234
20	215.426	194.537	215.426	194.537
30	120.774	113.216	155.098	137.037
40	80.843	75.599	120.774	105.918
50	57.033	52.912	99.187	86.707
60	41.967	38.878	66.083	57.033
70	31.372	29.354	45.425	38.878
80	25.344	25.344	31.372	29.354
90	21.558	19.829	25.344	21.558
100	16.414	16.414	18.263	16.414
110	13.042	13.042	13.042	11.491
120	9.988	9.988	8.557	7.243
130	8.557	7.243	5.047	5.047
140	6.082	5.047	3.112	2.386
150	4.020	4.020	1.798	1.328
160	3.112	3.112	632	632
170	2.386	1.798	271	271
180	1.328	1.328	172	105
190	945	945	63	63
200	632	632	21	21
210	402	402	6	6
220	271	271	2	2
230	172	172	1	1
240	105	105	0	0

Tabela 41 Quantidade de células analisadas por radar e por relação adotada (continuação)

Na determinação o número de células N_T , foi realizado um ajuste na faixa entre 50mm/h e 120mm/h. Valores menores do que 50mm/h não foram considerados pelo problema do agrupamento de células próximas, comentado anteriormente. Este problema tende a subestimar o número de células existentes. Valores acima de 120mm/h também não foram analisados por dois motivos. O primeiro associado a faixa mais larga de valores de R relacionada a cada valor de quantidade de células, diminuindo a precisão da função este patamar. O segundo o fato é que em taxas elevadas, ocorre um certo número de células com áreas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

menores do que 1 km^2. Algumas destas não detectadas pelo radar, havendo também a uma minimização do número total de células.

Verificou-se, através de uma análise gráfica e o método dos mínimos quadrados, que o melhor ajuste foi obtido através de uma função exponencial. Isto ocorreu para os três radares e as quatro relações Z-R adotadas. Este ajuste através de uma função exponencial, coincide com trabalhos encontrados na literatura científica [64,118]. Com base neste resultado, matematicamente, o número de células que possuem uma taxa de precipitação R_0, excedida em seu interior, é determinado por:

$$N_T(R \geq R_0) = u_1 \exp(-v_1 R_0) \qquad (8.1)$$

onde os parâmetros u_1 e v_1 constam da tabela 42. Os erros relativos encontrados e a correlação também são mostrados nesta tabela.

Como pode ser observado, todos os métodos apresentaram resultados bastante semelhantes em relação à possibilidade de ajuste. Apenas os métodos de dois segmentos, no caso do radar de Manaus, evidenciaram um erro relativo mais elevado e uma correlação ligeiramente menor, quando comparados aos demais. Este fato está relacionado diretamente ao ajuste da relação entre Z e R com dois segmentos, comentado no capítulo anterior. Como pode ser verificado através da figura 81, na Seção 7.4, o ajuste da relação produziu uma distorção maior entre 40mm/h e 70mm/h, levando a existência de uma "cunha" na função ajustada.

Esta "cunha", de uma certa forma, introduziu uma pequena distorção nas considerações relacionadas a esta faixa de taxa de precipitação (40 a 70 mm/h) para o radar de Manaus. Na verdade, o erro relativo mais elevado foi ocasionado basicamente pelo fato do ajuste ter sido feito entre 50 e 70 mm/h. Caso o ajuste tivesse sido feito na faixa de 70mm/h a 120mm/h, os erros cairiam para os mesmos níveis dos demais métodos. Cabe ressaltar, porém, que apesar desta pequena distorção, mesmo para o caso de Manaus, pode-se concluir que o ajuste exponencial apresentou resultados satisfatórios para a distribuição do numero de células de chuva. Por fim, conforme seria de esperar, quando extrapolado para outras faixas, o ajuste realizado para valores entre 50 e 120mm/h, mostra a subestimação da quantidade de células existentes. Mesmo assim, acima de 120 mm/h, vale acrescentar que resultados aceitáveis são obtidos até taxas da ordem de 160 mm/h.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Radar	Método	"u_1"	"v_1"	Erro rel Máx. (%)	Erro rel médio (%)	Correlação (%)
Cruz. do Sul	**Mét. Absoluto 1 segmento**	294.125	0,025	7,8	4,5	99,5
	Mét. Relativo 1 segmento	221.427	0,026	7,1	4,2	99,7
	Mét. Absoluto 2 segmento	528.661	0,030	5,8	2,0	99,9
	Mét. Relativo 2 segmento	373.428	0,030	4,0	2,1	99,9
Manaus	**Mét. Absoluto 1 segmento**	292.967	0,025	5,8	3,4	99,7
	Mét. Relativo 1 segmento	378.736	0,025	6,0	3,1	99,7
	Mét. Absoluto 2 segmento	1.377.690	0,042	14,7	8,1	99,1
	Mét. Relativo 2 segmento	1.641.535	0,042	15,1	10,0	98,2
Tabatinga	**Mét. Absoluto 1 segmento**	177.929	0,024	6,2	3,0	99,5
	Mét. Relativo 1 segmento	154.324	0,023	7,3	3,0	99,4
	Mét. Absoluto 2 segmento	498.825	0,034	8,4	4,7	99,6
	Mét. Relativo 2 segmento	441.929	0,034	7,5	4,8	99,6

Tabela 42 Valores dos parâmetros encontrados no ajuste da variação do número de células com a taxa de precipitação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

8.3.
Considerações sobre as dimensões da célula de precipitação

Esta Seção traça considerações sobre as dimensões das células de precipitação encontradas na análise realizada. Cabe aqui recordar que cada célula será definida pela taxa mínima excedida em todo o seu interior e por sua área, computada através do número de quadrículas que compõe cada conjunto. Caso se deseje, tendo-se a área da célula, através de uma transformação direta determina-se o diâmetro equivalente da mesma, partindo de uma hipótese de uma projeção horizontal circular. As figuras de 85 a 87 apresentam as distribuições das dimensões da célula de chuva para diferentes valores de taxa de precipitação excedida. Na realidade, estas figuras indicam a percentagem das células, em cada taxa de precipitação excedida, que possuem uma área igual ou maior do que a definida na abscissa do gráfico. Para os três sítios, os gráficos foram elaborados com base unicamente no método absoluto com dois segmentos. Não houve necessidade de considerar os demais métodos, uma vez que os resultados são essencialmente os mesmos das figuras em questão.

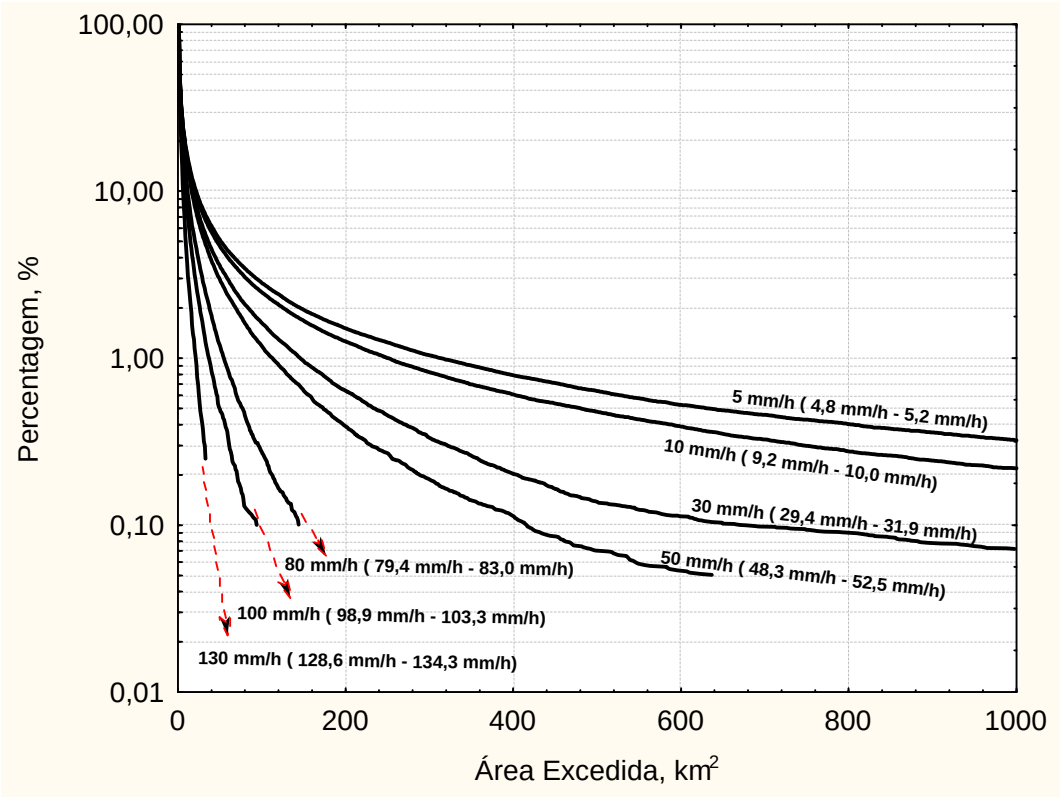

Figura 85 Distribuição das células quanto a área excedida para cada valor de taxa de precipitação mínima em seu interior para o radar de Cruzeiro do Sul.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

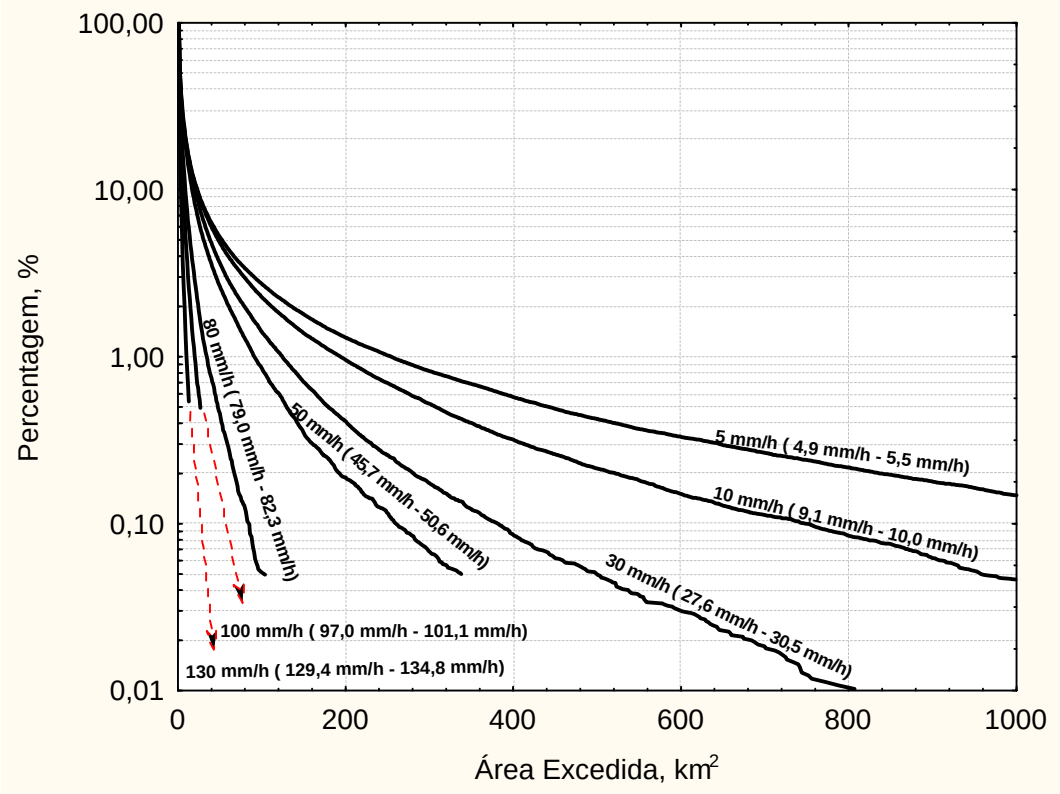

Figura 86 Distribuição das células quanto a área excedida para cada valor de taxa de precipitação mínima em seu interior para o radar de Manaus.

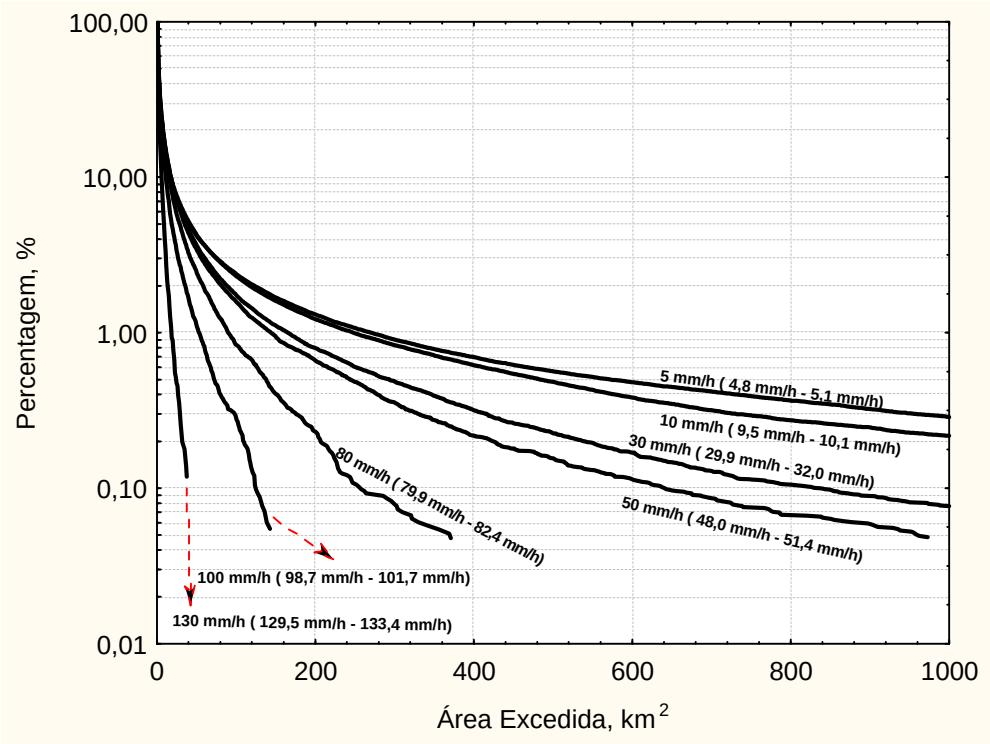

Figura 87 Distribuição das células quanto a área excedida para cada valor de taxa de precipitação mínima em seu interior para o radar de Tabatinga.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Cumpre ressaltar que, em verdade, para se determinar a percentagem de uma determinada célula existir, com um determinado diâmetro e precipitação excedidos, deve-se multiplicar a probabilidade da distribuição das dimensões da célula, condicionada a uma taxa ser excedida, pela probabilidade da precipitação ser excedida. Matematicamente, isto corresponde a,

$$p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0) = p(D \geq D_0 / R \geq R_0)\ p(R \geq R_0) \tag{8.2}$$

onde a $p(D \geq D_0 / R \geq R_0)$ é dada pelas figuras de 85 a 87 e $p(R \geq R_0)$ pela distribuição acumulativa da taxa de precipitação do local, dada pelas figuras de 13 a 17. A tabela 43 apresenta, como exemplo, os valores dos diâmetros mínimos equivalentes encontrados para o sítio de Cruzeiro do Sul, em diversas percentagens, utilizando-se do método absoluto com dois segmentos. Na análise realizada, o valor de $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ foi limitado a um valor mínimo de 0,0001%. Esta percentagem corresponde a um valor de 31,5 segundos ao ano. Por exemplo, para o caso de Cruzeiro do Sul onde pela distribuição de precipitação uma taxa de 50 mm/h é excedida em torno de 0,15% do tempo, somente serão analisadas dimensões excedidas acima de 0,067%, que proporcionaria um valor de $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ acima dos 0,0001% desejados. Os valores em branco são aqueles que não atendem ao caso descrito na frase parágrafo anterior.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

CRUZEIRO DO SUL														
Taxa de Precipitação (mm/h)	**Percentagem (%)**													
	50,00	**40,00**	**30,00**	**20,00**	**10,00**	**5,00**	**2,50**	**1,00**	**0,50**	**0,25**	**0,10**	**0,05**	**0,01**	**0,005**
5	1,59	1,89	2,38	3,26	5,26	8,09	12,11	19,99	28,39	40,48	61,68	80,56	110,96	121,33
10	1,59	1,90	2,39	3,23	5,10	7,70	11,24	17,86	24,74	33,45	49,50	62,99	97,99	
20	1,62	1,93	2,42	3,20	4,89	7,18	10,13	15,04	19,71	25,08	34,31	49,72		
30	1,63	1,94	2,41	3,16	4,75	6,78	9,36	13,63	17,27	21,34	29,32	43,42		
40	1,65	1,96	2,43	3,16	4,69	6,62	9,02	12,75	16,09	19,93	27,22	36,60		
50	1,66	1,97	2,42	3,13	4,58	6,37	8,54	11,98	14,87	18,05	23,01	28,51		
60	1,65	1,94	2,37	3,02	4,32	5,90	7,76	10,59	12,85	15,04	18,31			
70	1,63	1,91	2,30	2,89	4,05	5,41	7,04	9,25	11,10	12,75				
80	1,61	1,88	2,24	2,79	3,84	5,10	6,46	8,35	9,91	11,51				
90	1,59	1,85	2,19	2,70	3,68	4,80	6,02	7,70	9,05	10,60				
100	1,57	1,78	2,09	2,54	3,39	4,36	5,41	6,86	7,95					
110	1,55	1,74	2,02	2,46	3,23	4,10	5,05	6,21	7,32					
120	1,54	1,71	1,98	2,36	3,05	3,84	4,60	5,72						
130	1,51	1,63	1,88	2,23	2,83	3,46	4,16	5,20						
140	1,50	1,60	1,83	2,15	2,74	3,32	4,00							
150	1,48	1,57	1,77	2,05	2,54	3,09	3,65							
160	1,47	1,57	1,74	2,00	2,47	2,96								
170	1,44	1,53	1,66	1,88	2,27	2,70								
180	1,42	1,50	1,61	1,83										
190	1,40	1,48	1,57											

Tabela 43 Valores dos diâmetros mínimos equivalentes excedidos encontrados para o caso do radar de Cruzeiro do Sul com o método absoluto com 2 segmentos.

Comparando os valores dos diâmetros equivalentes observados nesta tese com outros disponíveis na literatura científica, não foram observadas diferenças significativas [103,116,117,118]. De uma forma geral, todos os valores publicados nas referências citadas estão na mesma ordem de grandeza dos dados aqui observados. Os valores apresentados por Pawlina [103] são um pouco maiores nas taxas de precipitação inferiores. Isso se deve a dois fatos: pequena distorção dos dados aqui obtidos, que será corrigida posteriormente (vide tabela 50), e o fato, comentado na Seção 8.1, do procedimento adotado por Pawlina maximizar as dimensões nas taxas menores.

Observa-se também que a forma das curvas que representam a variação do diâmetro mínimo com a percentagem e taxa de precipitação excedidas é semelhante às encontradas na literatura. Como pode ser visualizado nas figuras de 85 a 87, existe uma mudança da inclinação ("*slope*") da curva com a variação da percentagem de tempo. Quanto maior for a precipitação excedida analisada, maior também será a inclinação da curva observada. Assim, em percentagens mais elevadas, os diâmetros equivalentes correspondentes a taxas de precipitação distintas, possuem praticamente o mesmo valor. Entretanto, com a diminuição da percentagem de tempo, os diâmetros passam a diferir substancialmente. Como exemplo pode ser citada a cidade de Cruzeiro do Sul. Para 50% do tempo, tanto a chuva que excede 10mm/h quanto a que excede 100mm/h apresentam um diâmetro mínimo em torno de 1,6 km. Porém, para 1% do tempo, o diâmetro mínimo da chuva que excede 10mm/h situa-se em torno de 25 km, enquanto que o correspondente à chuva que excede 100mm/h não ultrapassa 8km.

Outro aspecto a ser analisado é a evidência que pode ser observada, através dos dados apresentados pela tabela 43, da existência de uma distorção nos dados. Sabe-se que quanto maior a taxa de precipitação excedida, menor deve ser a dimensão horizontal da célula de chuva. Este comportamento é verificado na maioria dos dados apresentados na tabela citada. Entretanto, existe uma inversão deste comportamento para taxas de precipitação mais baixas, principalmente em maiores percentagens de tempo. Esta inversão de comportamento, ou seja, um acréscimo na dimensão horizontal da precipitação com o aumento da taxa de precipitação excedida, é conseqüência da distorção dos dados comentada no inicio deste capítulo. Está distorção ocorreu nos três radares e com todos os métodos de obtenção da relação entre Z e R.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

A figura 88 apresenta um exemplo levantado em Cruzeiro do Sul para a percentagem de 50% do tempo, onde é evidente a mudança de comportamento da dimensão da célula abaixo de 50mm/h.

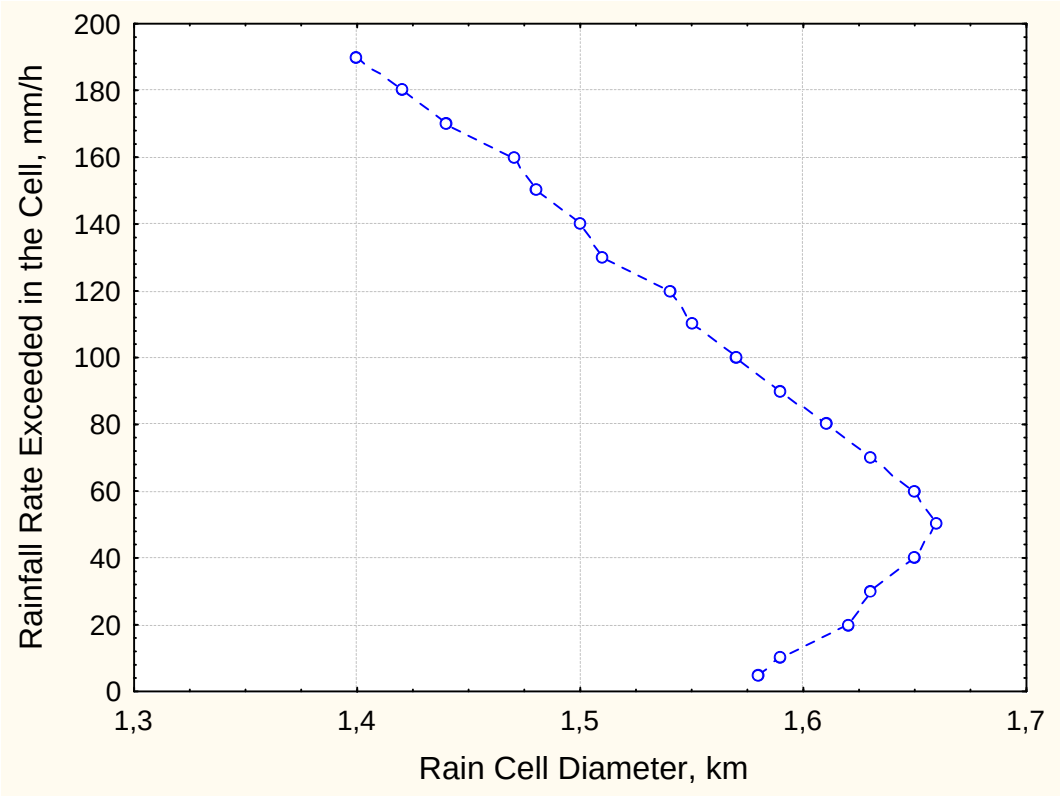

Figura 88 Variação do diâmetro equivalente da célula de chuva com a taxa de precipitação excedida para 50% do tempo no radar de Cruzeiro do Sul com o método absoluto com dois segmentos.

Dando continuidade às considerações sobre a dimensão horizontal das células, deve ser feita uma análise da variação do diâmetro equivalente com a mudança do método que determina a relação entre Z e R. Como comentado diversas vezes, este trabalho considerou como relação mais precisa aquela determinada pelo método absoluto de dois segmentos. Acontece, porém, que apesar da mudança do método empregado produzir, em algumas taxas de precipitação excedidas (vide tabela 41), variações significativas na determinação do número de células existentes, esta diferença é bem menor quando se trata da determinação do diâmetro equivalente da célula de precipitação. As tabelas de 44 a 46 apresentam as estatísticas das diferenças relativas observadas, em cada radar, com a mudança do método. O método absoluto com dois segmentos foi utilizado como o padrão na comparação. Nesta comparação foram utilizados,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

diferentemente das tabelas anteriores, três valores de percentagem como limites mínimos de $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$: 0,0001%, 0,001% e 0,005% que correspondem, respectivamente, 31,5s, 5,3min e 26,3min do ano. Dos três métodos utilizados, na comparação com o método absoluto com dois segmentos, não existe nenhum que se destaque em relação aos demais. Na média as diferenças são pequenas, o mesmo acontecendo com desvio padrão, indicando que a dispersão também não é relevante. São observadas apenas algumas diferenças acima de 20%, pontualmente localizadas para alguns valores de taxas de precipitação excedida. As diferenças maiores estão concentradas nas menores percentagens de tempo, fato este que pode ser notado pela diminuição dos valores das diferenças observadas com a diminuição do valor de $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ adotado.

Cruzeiro do Sul - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ = 0,0001%				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	31,0	4,3	5,0	6,6
Rel. 1 seg.	17,9	5,1	4,3	6,7
Rel. 2 seg.	37,6	7,2	6,3	9,6
Cruzeiro do Sul - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ = 0,001%				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	16,6	3,2	3,5	4,8
Rel. 1 seg.	16,0	4,2	3,4	5,4
Rel. 2 seg.	25,1	5,7	4,8	7,4
Cruzeiro do Sul - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ = 0,005%				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	11,6	2,3	2,3	3,3
Rel. 1 seg.	11,6	3,5	2,6	4,4
Rel. 2 seg.	15,2	4,2	3,1	5,2

Tabela 44 Diferenças entre as dimensões de células observadas através da variação do modelo empregado em comparação com o modelo absoluto com 2 segmentos, para a cidade de Cruzeiro do Sul.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Manaus - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ **= 0,0001%**				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	26,2	8,1	7,0	10,7
Rel. 1 seg.	20,0	6,4	5,6	8,6
Rel. 2 seg.	18,0	5,7	4,4	7,2
Manaus - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ **= 0,001%**				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	24,7	7,0	6,6	9,6
Rel. 1 seg.	17,8	5,1	4,6	6,9
Rel. 2 seg.	16,5	4,9	3,9	6,3
Manaus - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ **= 0,005%**				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	21,1	5,9	6,3	8,6
Rel. 1 seg.	15,2	3,7	3,7	5,3
Rel. 2 seg.	11,1	4,0	3,1	5,0

Tabela 45 Diferenças entre as dimensões de células observadas através da variação do modelo empregado em comparação com o modelo absoluto com 2 segmentos, para a cidade de Manaus.

Tabatinga - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ **= 0,0001%**				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	21,7	4,6	4,8	6,7
Rel. 1 seg.	22,7	4,8	4,9	6,8
Rel. 2 seg.	8,6	2,1	1,9	2,9
Tabatinga - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ **= 0,001%**				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	14,1	3,2	3,3	4,6
Rel. 1 seg.	14,8	3,4	3,5	4,8
Rel. 2 seg.	7,4	1,5	1,4	2,1
Tabatinga - $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ **= 0,005%**				
Método	**Diferença Relativa Máxima (%)**	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**	**Diferença RMS (%)**
Abs. 1 seg.	9,0	2,1	2,2	3,0
Rel. 1 seg.	10,1	2,2	2,3	3,2
Rel. 2 seg.	4,1	1,1	1,0	1,5

Tabela 46 Diferenças entre as dimensões de células observadas através da variação do modelo empregado em comparação com o modelo absoluto com 2 segmentos, para a cidade de Tabatinga.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Desta forma, conclui-se que mesmo adotando outro método diferente do absoluto com dois segmentos, o resultado que se obtém, quanto à dimensão da célula de chuva, não será tão diferente. Em outras palavras, apesar de cada método utilizar uma relação entre Z e R distinta dos demais, os resultados são equivalentes.

Finalizando, será abordada a variação da dimensão da célula em função do local considerado. Inúmeros autores afirmam que a estrutura espacial da precipitação independe do local de observação [18, 64, 119]. O diferencial entre um local e outro é dado pela percentagem de tempo na qual um estrutura é observada. Esta percentagem está diretamente relacionada à distribuição estatística da taxa de precipitação. A tabela 47 apresenta as diferenças observadas entre as três localidades analisadas para o caso do método absoluto de dois segmentos e com adoção de $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$ maior do que 0,005%.

$p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$	**Diferença Relativa Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**
0,001%	13,3	10,0
0,01%	10,3	7,7
0,05%	7,7	5,7

Tabela 47 Diferenças entre as dimensões de células observadas variando o radar analisado.

Verifica-se na tabela 47 que, em média, as diferenças permanecem em patamares que pode ser considerado como aceitáveis. Novamente, apesar dos valores razoáveis de média e desvio padrão, existem algumas diferenças mais significativas, localizadas pontualmente em determinadas taxas de precipitação. Na maioria do casos, estas diferenças estão concentradas em pequenas percentagens de tempo. A própria forma de medição utilizada pelo radar, através de uma quantização dos valores de Z, pode ser responsabilizada por este resultado. Quando são comparados dados de um mesmo radar, ou seja, dados associados a uma determinada relação Z-R, isto é feito na mesma faixa de valores de R. Entretanto, isto não acontece quando os dados são provenientes de radares diferentes, portanto, com relações Z-R distintas. Nesta situação, podem ser observadas variações nos resultados, particularmente em percentagens menores. De qualquer forma, cabe ressaltar que não existe uma contradição entre os dados aqui apresentados e a hipótese da independência da estrutura da chuva com o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

local. O próprio fenômeno metereológico apresenta variações, fato comentado no capítulo 4 desta tese. Esta consideração é reforçada em um trabalho de Pawlina [118], onde foi reportada uma variação das dimensões horizontais da estrutura de chuva, para uma mesma localidade, porém com medições em anos diferentes. Em outras palavras, quando se comparam períodos anuais de medição de um mesmo local ou locais distintos existe uma certa probabilidade de se encontrar diferenças nos resultados, fato este confirmado nesta tese. Porém, caso se compare médias obtidas em vários anos, a tendência é que as diferenças ainda sejam menores do que as apresentadas na tabela 47.

Resumindo este aspecto da questão, pode-se concluir que apesar da hipótese da estrutura de precipitação independer do local ou do tempo de medição ser válida, sempre existirá alguma variação. O fato é que, na maioria dos casos, esta variação associada ao fenômeno ou ao processo de medição pode ser considerada pequena, podendo ser ignorada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

8.4.
Modelagem das dimensões horizontais da célula de precipitação

Nesta Seção pretende-se desenvolver um modelo para a variação da dimensão horizontal da célula com a percentagem de tempo e com o valor da taxa de precipitação excedida. O primeiro modelo a ser analisado está relacionado à variação da dimensão horizontal mínima da célula de chuva com a taxa de precipitação excedida. Foi fixado um determinado valor de percentagem de tempo e avaliados os valores dos diâmetros mínimos equivalentes observados para cada taxa de precipitação excedida. Em outras palavras, para cada valor de $p(D \geq D_0 / R \geq R_0)$, foi pesquisado o modelo matemático da variação de D_0 com R_0.

A menor taxa de precipitação considerada foi de 50mm/h para Cruzeiro do Sul e Manaus e 80mm/h para Tabatinga, uma vez que, abaixo destas taxas, o valor do diâmetro é comprometido pelas distorções já comentadas (vide Seção 8.3). A maior taxa foi relacionada ao valor máximo de $p(R \geq R_0 \text{ e } D \geq D_0)$, sendo tomado o valor de 0,005%. As taxas de precipitação analisadas variaram a cada 10mm/h e no modelo foram levadas em conta apenas as percentagens que possuíam pelo menos quatro valores de taxa dentro dos limites listados neste parágrafo. Desta forma, para os três radares foram analisadas as percentagens que variaram de 50 a 5 %. Em outras palavras, o número de valores utilizados no ajuste variou de percentagem para percentagem, porém este foi no mínimo de seis. Utilizou-se no ajuste o método dos mínimos quadrados através do programa "Statistica". A função que melhor se ajustou aos dados foi a exponencial:

$$D_0 = u_2 \exp(-v_2 R_0) \tag{8.3}$$

onde u_2 e v_2 são os parâmetros a serem ajustados, sendo D_0 medido em km e R_0 em mm/h.

A tabela 48 apresenta, para cada valor de percentagem e para cada radar, os valores de u_2 e v_2, o erro relativo máximo, o erro relativo médio e a correlação encontrados nos ajustes realizados. Verifica-se que o ajuste é excelente. As quatro relações entre Z e R, para cada radar, demonstraram o mesmo desempenho quanto ao ajuste. Em outras palavras, apesar de valores diferentes para u_2 e v_2, os erros e a correlação foram praticamente idênticos. Desta forma, no que segue, somente serão mostrados os resultados relativos ao método absoluto com dois segmentos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Radar	Percentagem	"u_2"	"v_2"	Erro rel Máx. (%)	Erro rel médio (%)	Correlação (%)
Cruzeiro do Sul	**50%**	1,767	0,001	0,2	0,5	99,8
	40%	2,226	0,002	0,8	2,0	99,4
	30%	2,871	0,003	0,6	1,5	99,8
	20%	3,883	0,004	0,6	1,4	99,9
	10%	6,122	0,006	0,5	1,4	99,9
	5%	9,035	0,007	0,6	1,5	99,8
Manaus	**50%**	1,927	0,002	0,8	1,9	99,0
	40%	2,544	0,004	0,7	1,5	99,6
	30%	3,382	0,006	0,8	1,3	99,8
	20%	4,731	0,008	1,0	1,6	99,7
	10%	7,812	0,011	0,6	1,1	99,9
	5%	11,749	0,013	0,9	1,6	99,8
Tabatinga	**50%**	2,055	0,002	0,5	1,1	99,5
	40%	2,909	0,004	1,3	2,7	99,0
	30%	4,007	0,006	1,2	1,9	99,1
	20%	5,713	0,007	1,0	1,6	99,3
	10%	9,056	0,009	0,9	1,7	99,3
	5%	14,414	0,011	1,4	2,9	99,2

Tabela 48 Valores dos parâmetros e erros encontrados no ajuste da variação do diâmetro equivalente com a taxa de precipitação, para uma percentagem fixa.

Apesar de alguns trabalhos no passado definirem um diâmetro de célula fixo, variando apenas com a taxa de precipitação, que foi o caso de Misme [112,113], pode ser observado, no entanto, que para uma mesma taxa de precipitação excedida, existem diversos valores para o diâmetro da célula.

Goldhirsh [117] modelou a variação do diâmetro mínimo com a taxa de precipitação, para uma percentagem fixa de tempo, através de uma função potência, ou seja:

$$D_0 = uR_0^{-v} \tag{8.4}$$

onde u e v são parâmetros a serem obtidos por ajuste, D_0 em km e R_0 em mm/h. Ao se testar o ajuste com este tipo de função, verificou-se que o mesmo apresentou resultados piores do que os obtidos com a função exponencial quando considerarmos os três sítios analisados. A tabela 49 apresenta a comparação dos dois tipos de ajustes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Radar	Ajuste	Média do Erro Rel. Médio (%)	Média do Erro Rel. Máximo (%)	Média da Correlação (%)
Cruzeiro do Sul	**Exponencial**	0,6	1,4	99,8
	Potência	1,3	2,6	98,6
Manaus	**Exponencial**	0,8	1,5	99,6
	Potência	0,5	1,0	99,8
Tabatinga	**Exponencial**	0,9	1,7	99,2
	Potência	1,3	2,1	98,5

Tabela 49 Comparação entre os dois tipos de ajuste para a variação do diâmetro com a taxa de precipitação.

A função de ajuste exponencial aqui definida pode ser utilizada para propor uma correção nos dados distorcidos pela limitação do procedimento de leitura. Supondo que o ajuste satisfatório que ocorreu na faixa analisada possa ser extrapolado para as demais taxas de precipitação, determinam-se os novos valores para os diâmetros mínimos equivalentes. A tabela 50 apresenta, para o caso do radar de Cruzeiro do Sul na percentagem de 50%, os novos valores corrigidos, determinados pelo ajuste exponencial utilizando os parâmetros constantes da tabela 48. O mesmo procedimento poderia ser realizado para os demais radares e percentagens. Verificam-se diferenças menores do que 10% confirmando que as conclusões obtidas não são comprometidas pelas distorções observadas.

Taxa de Precipitação Excedida	Valor Observado	Valor Corigido-Função Exponencial
5 mm/h	1,59	1,76
10 mm/h	1,59	1,75
20 mm/h	1,62	1,73
30 mm/h	1,63	1,71
40 mm/h	1,65	1,69

Tabela 50 Valores corrigidos através das funções de ajuste.

Foi também investigado o modelo da variação da dimensão mínima horizontal da célula de chuva com a percentagem de tempo, para uma taxa de precipitação excedida fixa. Em outras palavras, para cada valor de R_0, foi pesquisado o modelo matemático da variação de D_0 com $p(D \geq D_0 / R \geq R_0)$. Trabalhou-se com taxas acima de 50mm/h para evitar os dados distorcidos pelo procedimento de leitura. Da mesma forma que no caso anterior, as quatro relações entre Z e R, para cada radar, apresentaram o mesmo desempenho quanto ao ajuste.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Em vista deste resultado, somente será apresentado os resultados do ajuste referente ao método absoluto com dois segmentos. Através de uma análise gráfica e o método de ajuste dos mínimos quadrados, a função que proporcionou o melhor ajuste foi,

$$D_0 = u_3 p^{-v_3} \exp(-w_3\, p) \tag{8.5}$$

onde u_3, v_3 e w_3 são os parâmetros a serem obtidos no ajuste, sendo D_0 medido em km e p em %.

A tabela 51 apresenta, para cada valor de taxa de precipitação excedida nos três radares, os valores de u_3, v_3 e w_3 , o erro relativo máximo, o erro relativo médio e a correlação encontrados nos ajustes realizados. Verificou-se também um ótimo resultado no ajuste realizado. Em [103], Pawlina utilizou o modelo através de uma função de potência de p,

$$D_0 = u\ p^{-v} \tag{8.6}$$

onde u e v são parâmetros a serem obtidos no ajuste, com D_0 medido em km e p em %. Apesar de ter apresentado um ajuste pior do que o obtido pela equação 8.5, inclusive por possuir um número menor de parâmetros, apresentou um resultado bom principalmente para taxas de percentagem maiores do que 10%. Este tipo de função pode ser utilizado caso haja interesse em se trabalhar com uma função mais simples, e não se necessite de uma precisão grande . O maior erro relativo máximo e maior erro relativo médio observados neste ajuste foram de 15% e 9,8%, respectivamente. O erro relativo diminui com o aumento da taxa de precipitação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Radar	Taxa Prec. Exc. (mm/h)	"u_3"	"v_3"	"w_3"	Erro rel Máx. (%)	Erro rel médio (%)	Cor. (%)
Cruzeiro do Sul	**50**	11,438	-0,3183	-0,0147	5,9	3,3	99,8
	60	10,072	-0,2896	-0,0145	7,0	3,5	99,6
	70	9,028	-0,2861	-0,0124	5,0	2,5	99,8
	80	8,222	-0,2709	-0,0120	3,6	2,1	99,9
	90	7,612	-0,2605	-0,0114	3,3	1,8	99,9
	100	6,841	-0,2611	-0,0094	2,7	1,7	99,9
	110	6,291	-0,2482	-0,0091	2,9	1,5	99,9
	120	5,840	-0,2492	-0,0075	1,9	1,0	99,9
	130	5,267	-0,2450	-0,0062	2,0	0,9	99,9
	140	5,185	-0,2635	-0,0046	2,0	0,9	99,9
	150	4,679	-0,2525	-0,0036	1,5	0,9	99,9
Manaus	**50**	10,383	-0,269	-0,015	5,7	3,0	99,7
	60	8,683	-0,249	-0,014	5,4	2,8	99,7
	70	7,5009	-0,253	-0,011	3,4	1,8	99,9
	80	6,571	-0,243	-0,010	2,8	1,6	99,9
	90	5,694	-0,238	-0,008	2,2	1,4	99,9
	100	5,149	-0,233	-0,007	2,1	1,2	99,9
	110	4,581	-0,247	-0,004	1,6	1,1	99,9
	120	4,200	-0,257	-0,001	1,2	0,5	99,9
	130	4,265	-0,302	0,001	0,8	0,4	99,9
	140	3,937	-0,278	0,001	0,5	0,2	99,9
	150	3,109	-0,207	-0,0001	0,2	0,1	99,9
Tabatinga	**50**	12,900	-0,3545	-0,0146	7,1	3,8	99,7
	60	11,996	-0,3368	-0,0140	6,8	3,3	99,7
	70	11,583	-0,3404	-0,0124	4,3	2,0	99,6
	80	10,589	-0,3136	-0,0125	3,8	2,0	99,9
	90	9,711	-0,3079	-0,0114	2,6	1,5	99,9
	100	8,148	-0,2842	-0,0104	2,8	1,3	99,9
	110	7,264	-0,2843	-0,0085	1,6	0,9	99,9
	120	6,135	-0,2639	-0,0071	1,8	1,0	99,9
	130	5,097	-0,2464	-0,0057	2,4	1,4	99,9
	140	5,040	-0,2812	-0,0027	0,5	0,7	99,9
	150	5,232	-0,3335	0,0003	0,7	0,4	99,9

Tabela 51 Valores dos parâmetros e erros encontrados no ajuste da variação do diâmetro equivalente com a percentagem de tempo, para uma taxa de precipitação excedida fixa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

8.5. Aplicação na técnica de diversidade de sítio

Esta seção desenvolve uma aplicação dos dados aqui analisados na técnica de diversidade de sítio para enlaces terra-satélite [109,110]. A diversidade de sítio representa uma das soluções técnicas mais eficientes para compensar o efeito da atenuação por chuva em enlaces terra-satélite que operam em freqüências acima de 10 GHz. É claro que esta solução implica em maior custo na implementação do sistema. Entretanto, em locais onde o emprego de comunicações via satélite seja a melhor alternativa, a relação custo-benefício poderá justificar o investimento realizado. A Amazônia é um exemplo a ser citado, uma vez que as distâncias envolvidas e a barreira natural da floresta indicam o satélite como um caminho natural para resolver os problemas de comunicações. Por outro lado, o uso da banda Ku (12 – 18 GHz) nesta região poderá ser inviabilizado se não houver uma utilização criteriosa de técnicas que possibilitem a operação dentro de padrões aceitáveis de disponibilidade.

A questão fundamental que se apresenta é determinar a separação que deve existir entre as duas estações terrenas de uma configuração em diversidade para que o efeito da chuva seja minimizado e permita que a disponibilidade seja adequada para o serviço que está sendo prestado. Para isto torna-se necessário avaliar a probabilidade de que uma determinada taxa de precipitação (R_0) seja excedida, simultaneamente, nas duas estações distanciadas por uma distância L_0. Esta probabilidade pode ser determinada através de uma probabilidade condicional:

$$p(R_1 > R_0 \text{ e } R_2 > R_0) = p(R_2 > R_0 / R_1 > R_0).p(R_1 > R_0) \qquad (8.7)$$

onde R_1 e R_2 são as taxas de precipitação na estação 1 e 2, respectivamente.

A probabilidade da chuva ser excedida na estação 1, $p(R_1>R_0)$, é dada pela função distribuição cumulativa da precipitação, apresentada no Capítulo 3 desta tese, e aqui denominada por F_R (R_0). A probabilidade da chuva da estação 2 exceder a chuva especificada, dado que na estação 1 a mesma foi excedida, $p(R_2>R_0 / R_1 > R_0)$, pode ser determinada pela união de dois eventos disjuntos, isso é, a probabilidade das estações 1 e 2 serem atingidas pela mesma célula de chuva (p_{mc}) ou a probabilidade de serem atingidas por células distintas (p_{cd}).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

No cálculo destas probabilidades, leva-se em conta a função densidade de probabilidade da dimensão tamanho horizontal da célula de chuva para uma determinada taxa de chuva excedida, que pode ser obtida através da distribuições cumulativas determinadas no início deste capítulo. A função densidade de probabilidade da dimensão da célula será denominada $f_D(D, R_0)$.

A probabilidade da estação 2 ser afetada pela mesma célula de chuva, excedendo R_0, que está atingindo a estação 1, será dada pelo produto entre probabilidade do diâmetro da célula ser D_i, $f_D(D_i,R_0)$, e a probabilidade de que o centro desta célula esteja em pontos específicos, ou seja, pontos que permitam atingir ambas as estações simultaneamente, $p_1(D_i)$. Por simplificação o ponto onde a localização do centro da célula possibilitará atender esta condição será designado P_C. A probabilidade, $p_1(D_i)$, será a soma das probabilidades obtidas desde o valor mínimo de D_i, ou seja L_0, até o valor máximo D_{MAX}. O valor de D_{MAX} será o maior valor de D contido na distribuição cumulativa da dimensão horizontal da célula de chuva do local.

O valor de $p_1(D_i)$ é dado por uma relação de áreas. Considerando que a projeção horizontal da célula de chuva é um círculo, o lugar geométrico definido pelos centros de célula que atingem a estação 1 corresponde a uma circunferência de raio $D_i/2$, com área A_T dada por $A_T = \pi D_i^2 / 4$. De forma similar, o lugar geométrico definido pelos possíveis P_C será uma intercessão entre duas circunferências, área A_1 destacada da figura 89. Assim o valor de p_1 é dado pela relação entre A_1 e A_T:

$$p_1(D_i) = p(\text{centro} = P_C) = \left(\frac{1}{\pi}\right)\left[2\text{arctg}\left(\frac{\sqrt{D_i^2 - L_0^2}}{L_0}\right) - 2\left(\frac{L_0\sqrt{D_i^2 - L_0^2}}{D_i^2}\right)\right] \qquad (8.8)$$

onde L_0 é a distância entre as estações e D_i é o diâmetro da célula considerado, ambos medidos na mesma unidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

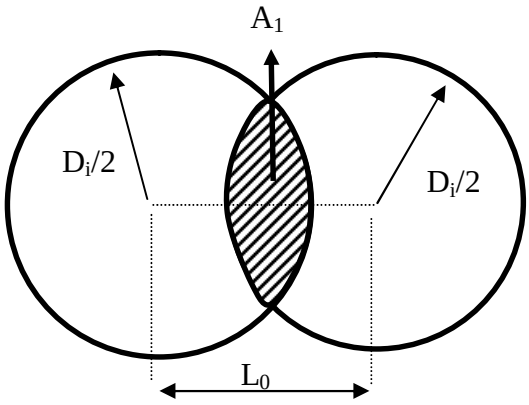

Figura 89 Lugar geométrico dos centros da célula que atingem duas estações simultaneamente.

A probabilidade das estações 1 e 2 serem atingidas pela mesma célula de chuva será dada então por:

$$p_{mc}(R_0) = \sum_{D_i=L_0}^{D_{MAX}} p(D = D_i)p_1(D_i) = \sum_{D_i=L_0}^{D_{MAX}} f_D(D_i, R_o).\left\{\left(\frac{1}{\pi}\right)\left[2\text{arctg}\left(\frac{\sqrt{D_i^2 - L_0^2}}{L_0}\right) - 2\left(\frac{L_0\sqrt{D_i^2 - L_0^2}}{D_i^2}\right)\right]\right\} \quad (8.9)$$

A probabilidade da estação 2 ser afetada por uma célula de chuva, excedendo R_0, distinta da que atinge a estação 1, é dada pelo produto entre a probabilidade de existir esta nova célula de chuva, F_R (R_0), e a probabilidade de que ambas as células, com diâmetros D_{i1} e D_{i2} não atinjam simultaneamente as duas estações.

A probabilidade de duas células, com diâmetros D_{i1} e D_{i2} não atingirem simultaneamente as duas estações é dada pelo produto da probabilidade de existir uma célula com diâmetro D_{i1} com o centro em uma região específica pela probabilidade de existir uma célula com diâmetro D_{i2} também com o centro em outra região específica. As duas parcelas deste produto são iguais e serão denominadas $p_3(D_i)$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

O valor de $p_3(D_i)$ é dado por uma soma de probabilidades. A primeira se refere a probabilidade do diâmetro da célula ser menor do que L_0, para este caso, não importando a localização do centro da célula, uma vez que a mesma nunca atingirá as duas estações simultaneamente. A segunda parcela será dada pela probabilidade do diâmetro da célula estar entre L_0 e D_{MAX} e seu centro em um ponto tal que permita que a mesma não atinja as duas estações. Esta segunda parcela é obtida de forma análoga a p_{mc} com a diferença de que o lugar geométrico dos centros não seja A_1 e sim $(A_T\text{-}A_1)$.

Assim,

$$p_{cd}(R_0) = \left(\sum_{D_{i1}=0}^{L_0} p(D = D_{i1}) + \sum_{D_{i1}=L_0}^{D_{MAX}} p(D = D_{i1})(1 - p_1(D_{i1})) \right) \cdot \left(\sum_{D_{i2}=0}^{L_0} p(D = D_{i2}) + \sum_{D_{i2}=L_0}^{D_{MAX}} p(D = D_{i2})(1 - p_1(D_{i2})) \right) F_R(R_0) \tag{8.10}$$

$$p_{cd}(R_0) = \left(\sum_{D_i=0}^{L_0} p(D = D_i) + \sum_{D_i=L_0}^{D_{MAX}} p(D = D_i)(1 - p_1(D_i)) \right)^2 F_R(R_0) = \tag{8.11}$$

$$\sum_{D_i=0}^{L_0} f_D(D_i, R_o) + \sum_{D_i=L_0}^{D_{MAX}} f_D(D_i, R_o) \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{1}{\pi} \right) \left[2\,\mathrm{arctg}\left(\frac{\sqrt{D_i^2 - L_0^2}}{L_0} \right) - 2\left(\frac{L_0 \sqrt{D_i^2 - L_0^2}}{D_i^2} \right) \right] \right\}$$

Finalizando a probabilidade desejada, $p(R_1 > R_0 \text{ e } R_2 > R_0)$, pode ser expressar,

$$p(R_1 > R_0 \text{ e } R_2 > R_0) = (p_{mc}(R_0) + p_{cd}(R_0)) F_R(R_0) \tag{8.12}$$

onde $p_{mc}(R_0)$ é dada pela equação 8.9 e $p_{dc}(R_0)$ pela equação 8.11.

Pode ser verificado que o valor da probabilidade dada pela equação 8.12 tende para $F_R(R_0)$ quando à distância entre as duas estações, L_0, tende para zero. Quando está distância tende para o infinito, isto é, para valores maiores que o diâmetro máximo de chuva encontrado na região, o valor da probabilidade dada pela equação 8.12 tende para o quadrado de $F_R(R_0)$, em outras palavras passam a ser eventos independentes entre si.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Para cada radar analisado, determinou-se o valor da equação 8.12 para diversos valores de taxa de precipitação excedida (R_0). As figuras 90, 91 e 92 apresentam o resultado obtido. Estas figuras mostram a percentagem de tempo que uma taxa de precipitação acima de R_0 é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância L_0 de forma simultânea. Verifica-se que existe uma saturação das curvas entre 10 e 15 km. Este resultado é similar as curvas de ganho de diversidade desenvolvidos a partir de modelos empíricos que têm por base a atenuação do sinal [120-123].

Considerando que os parâmetros de sistema, tais como, freqüência, polarização e ângulo de elevação afetam unicamente o valor da atenuação, pode se concluir que o efeito de saturação é função apenas da descorrelação da chuva à medida que se aumenta a distância de separação entre os terminais.

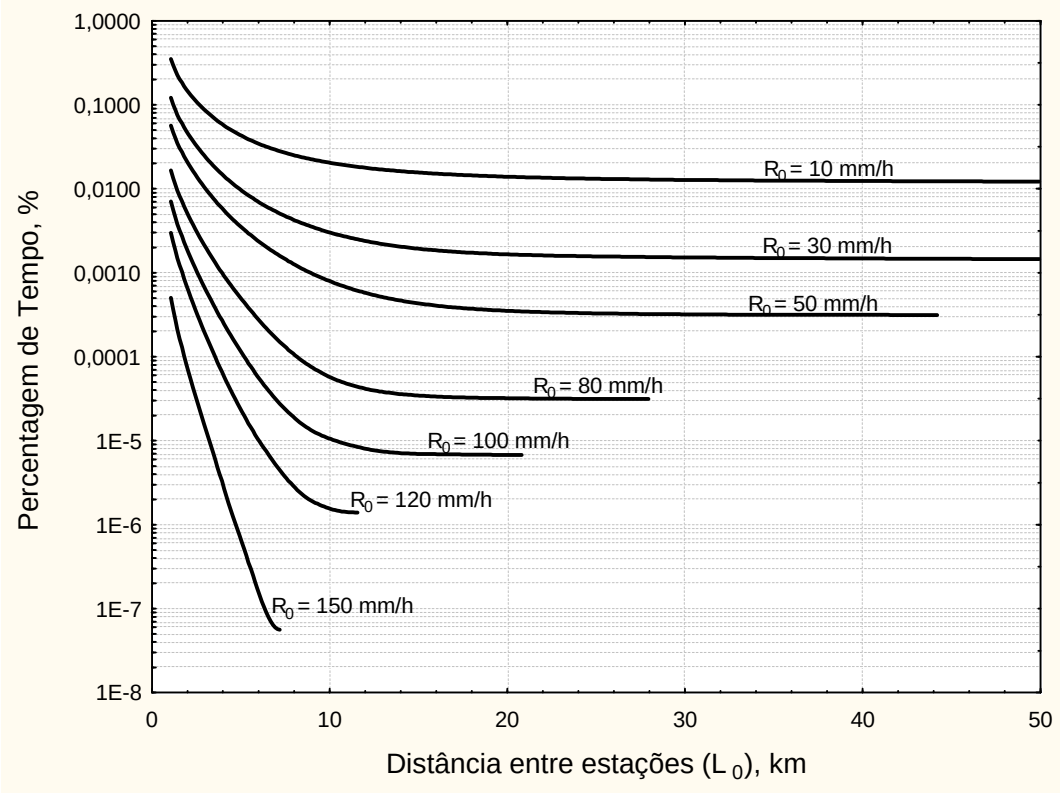

Figura 90 Percentagem de tempo (%) que uma taxa de precipitação acima de R_0(mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância L_0 (km), para o radar de Cruzeiro do Sul.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

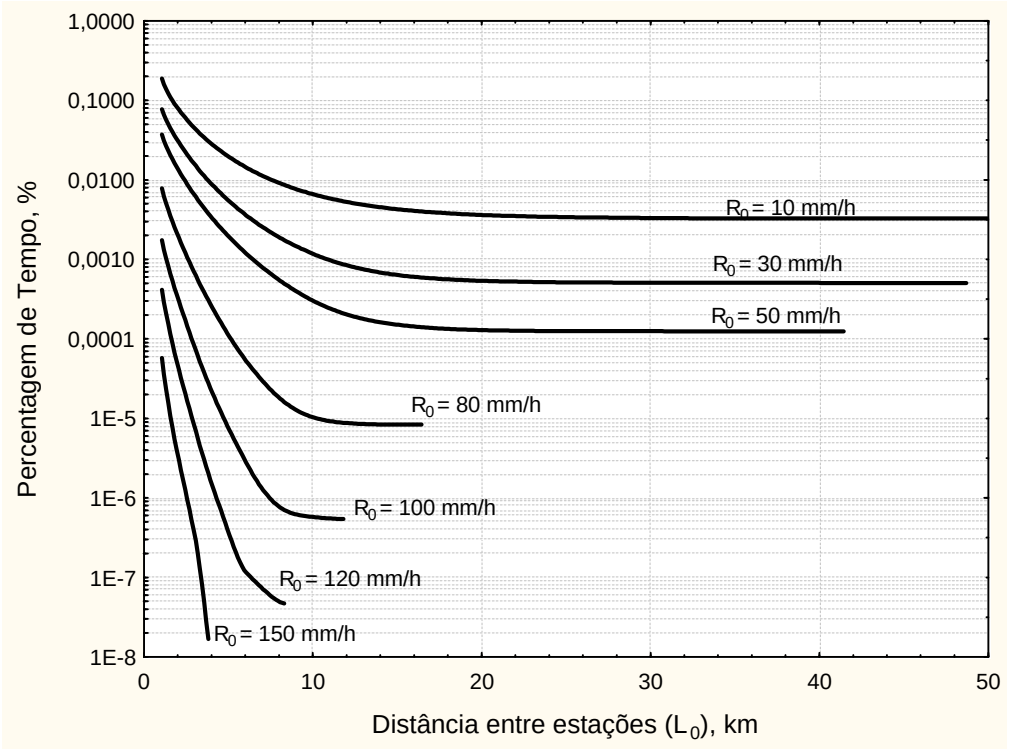

Figura 91 Percentagem de tempo (%) que uma taxa de precipitação acima de R_0(mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância L_0 (km), para o radar de Manaus.

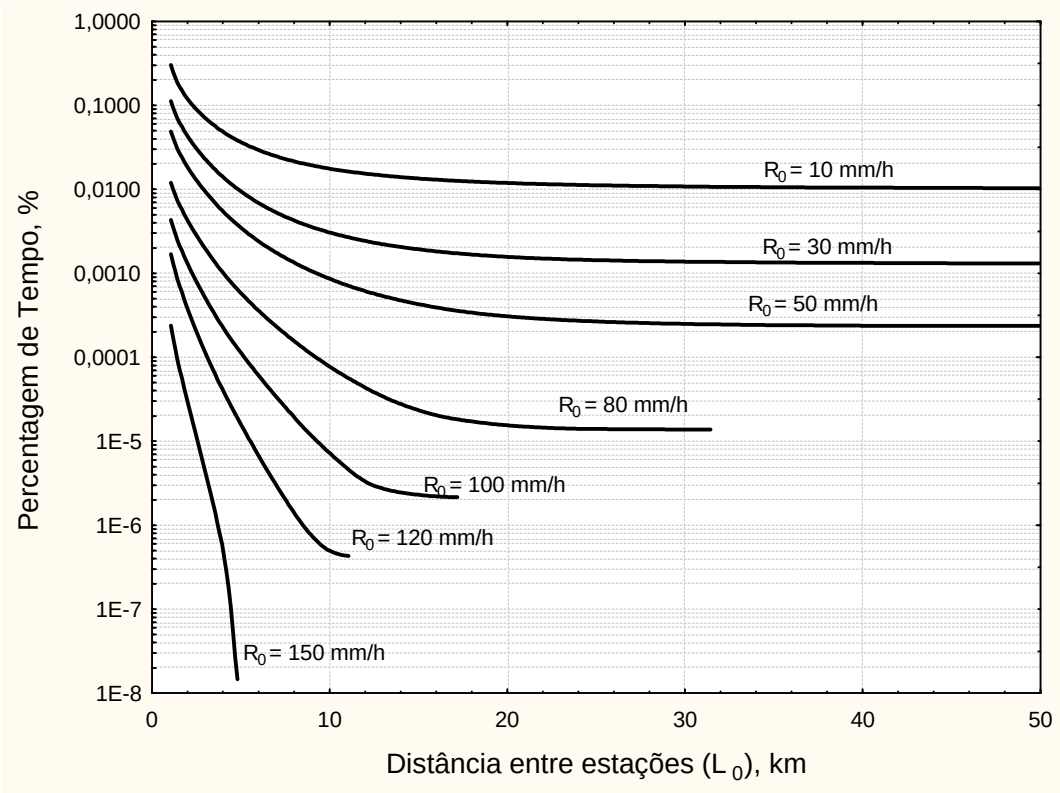

Figura 92 Percentagem de tempo (%) que uma taxa de precipitação acima de R_0(mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância L_0 (km), para o radar de Tabatinga.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA

Em vista deste resultado, procurou-se definir um relacionamento prático entre a taxa de chuva excedida em uma estação isoladamente (R_A) em uma dada percentagem de tempo (p) e o valor da taxa excedida simultaneamente em duas estações (R_B), separadas por uma distância da na mesma percentagem de tempo.

A função analisada foi do tipo:

$$R_A = R_B(u_4 p + v_4) D^{(w_4 \log(p) + z_4)} \tag{8.13}$$

sendo R_A e R_B em mm/h, D em km e p em %.

Apesar de apresentar variações, como os erros médios ficaram abaixo de 10%, os resultados numéricos obtidos a partir de (8.13) podem ser considerados aceitáveis [110]. De qualquer forma, pretende-se em uma investigação futura, empregar a formulação apresentada como uma ferramenta para o cálculo do ganho de diversidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116434/CA