

## Modelagem da distribuição do tamanho das gotas de chuva para um local semiárido tropical quente na Índia

BS Jassal<sup>1,\*</sup>, Anurag Vidyarthi<sup>1,#</sup>, R Gowri<sup>1,%</sup> & Ashish K Shukla<sup>2,~</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Eletrônica e de Comunicação, Graphic Era University, Dehradun 248 002

<sup>2</sup>Centro de Aplicações Espaciais, Ahmedabad 380 015

E-mail: <sup>\*</sup>bsjassal@yahoo.co.in, <sup>#</sup>vidyarthianurag@yahoo.co.in, <sup>%</sup>ravigowri07@gmail.com, <sup>~</sup>ashishs@sac.isro.gov.in

Recebido em 24 de março de 2011; revisto em 30 de setembro de 2011; aceito em 12 de outubro de 2011

Os dados sobre a distribuição do tamanho das gotas de chuva, coletados em Ahmedabad, Índia, foram analisados para desenvolver um modelo empírico sobre a distribuição do tamanho das gotas (DSD). Dos vários modelos de DSD disponíveis na literatura, a análise foi feita para distribuição lognormal, uma vez que foi relatado ser adequado para regiões tropicais. O modelo empírico foi derivado com base em parâmetros de ajuste avaliados a partir de dados experimentais. Observa-se que os dados se ajustam bem na distribuição lognormal para Ahmedabad.

Palavras-chave: Modelo empírico, Distribuição do tamanho das gotas de chuva (DSD), Atenuação induzida pela chuva, Distribuição lognormal

PACS No.: 92.40.ex.

### 1 Introdução A

demanda por alocação para a extremidade superior do espectro eletromagnético, especialmente acima de 10 GHz, está aumentando dia a dia para atender à demanda de maior taxa de dados para vários requisitos de comunicação e multimídia. Infelizmente, o comprometimento do sinal devido à chuva é o fator mais importante em frequências de ondas milimétricas (acima de 10 GHz) e é o fator limitante no projeto de links satélite/terrestre, especialmente para regiões tropicais e equatoriais que sofrem chuvas muito fortes. A chuva pode causar vários decibéis de atenuação resultando em um longo tempo de interrupção, afetando assim a confiabilidade do link de comunicação. É, portanto, necessário ter uma estimativa precisa da atenuação induzida pela chuva. Vários métodos têm sido relatado<sup>1</sup>. A medição da temperatura do ruído do céu durante tempo claro e condições de chuva por radiômetro é uma maneira de determinar a atenuação devido à chuva. Mas devido ao alcance dinâmico limitado do radiômetro, ele não prevê a atenuação com precisão em altas taxas de chuva. A medição da intensidade do sinal por meio do monitoramento de sinais de satélites é outro método amplamente utilizado para estimar as atenuações da chuva. Muitas medições de atenuação foram feitas usando o Advanced Communications Technology Satellite (ACTS), satélites Olympus a 30/20 GHz (ref. 2). No entanto, na ausência de hardware necessário para fazer medições por meio de radiômetro ou beacon, o método geralmente utilizado é estimar a chuva induzida.

atenuação a partir do conhecimento da distribuição do tamanho das gotas de chuva. Recentemente, medições mundiais de disdrômetro<sup>3-6</sup>. A partir dos vários estudos feitos sobre DSD, está agora bem estabelecido que a distribuição do tamanho das gotas caindo em uma determinada intensidade de chuva varia de lugar para lugar dependendo das condições meteorológicas e, portanto, é a atenuação em uma determinada frequência.

A modelagem da distribuição do tamanho das gotas de chuva (DSD) tem sido relatada por muitas pesquisas, viz. Marshall & Palmer<sup>7</sup>, Joss & Waldvogel<sup>8</sup>, Joss & Gori<sup>9</sup>, etc. DSD exponencial tem sido a parametrização analítica mais utilizada para a distribuição do tamanho das gotas de chuva:

$$N(D) = N_0 e^{-(\gamma D)} \quad \dots (1)$$

onde,  $N(D)$ , é o número de gotas por unidade de volume por unidade de intervalo de diâmetro de gota  $D$ . Os parâmetros  $N_0$  e  $\gamma$  podem ser determinados experimentalmente. Marshall & Palmer sugeriram que  $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$  e  $\gamma = 4.18 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$  é a taxa de precipitação em mm/h.

Embora este modelo seja simples, não foi encontrado aplicável em muitas das medições subsequentes feitas no DSD, especialmente quando o tempo de amostragem é de 1 minuto ou menos. Tende a exagerar o número de gotas menores e maiores<sup>9</sup>. Muitos pesquisadores têm preferido o método de dois parâmetros

distribuição exponencial, que não restringe  $N_0$  a nenhum valor fixo. Alguns pesquisadores<sup>10-12</sup> sugeriram o uso da distribuição gama:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\gamma D} \quad \dots (2)$$

Os desvios do modelo exponencial são expressos em termos do parâmetro de curvatura  $\mu$ .

A equação (2) se reduz ao modelo exponencial para  $\mu = 0$ .

Para países tropicais, com base nos dados coletados sobre taxa de precipitação e DSD, a maioria dos pesquisadores<sup>13-15</sup> sugeriram o uso de três parâmetros de distribuição lognormal:

$$N(D) = [NT / (2 \sqrt{\tilde{\gamma}} \ln(\tilde{\gamma}) D)] \exp[-\ln^2(D/D_g)/(2 \ln^2 \tilde{\gamma})] \dots (3)$$

onde,  $D_g$ , é a média geométrica dos diâmetros das gotas;  $\tilde{\gamma}$ , representa o desvio geométrico padrão, que é uma medida da amplitude do espectro; e  $NT$ , o número total de gotas  $m^{-3}$ .

Dos vários DSDs explicados matematicamente por distribuições exponencial, gama e lognormal, a adequação de um determinado tipo de modelo para uma determinada área geográfica depende das características da chuva naquela zona climática. A variabilidade do DSD para diferentes regiões climáticas é uma grande preocupação para a região tropical<sup>16</sup>, que possui grande diversidade nas condições climáticas. Por exemplo, na Índia, diferentes regiões meteorológicas, como áreas costeiras, deserto do Rajastão, montanhas do Himalaia, experimentam uma quantidade muito diferente de chuva em termos de intensidade e quantidade.

A Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO), como parte do experimento de propagação do espaço terrestre sobre a região indiana, realizou medições terrestres sobre a taxa de precipitação e distribuição do tamanho das gotas em cinco locais geográficos diferentes, a saber, Ahmedabad, Shillong, Thiruvananthapuram, Kharagpur e Hassan<sup>16</sup>. Esses locais caem em diferentes zonas climáticas da Índia com diferentes características de chuva.

A Graphic Era University, Dehradun, foi encarregada da tarefa de análise de dados para modelagem de DSD e atenuação de chuva. O presente artigo discute a modelagem do DSD para Ahmedabad a partir dos dados coletados, em 2007, utilizando disdrômetro tipo impacto RD-80. Posteriormente, o modelo DSD será utilizado para estimar a atenuação específica (dB km<sup>-1</sup>) em diferentes taxas e frequências de chuva com base no cálculo dos coeficientes de espalhamento Mie e seção transversal de extinção de gotas de água de diferentes diâmetros<sup>17</sup>.

Ahmedabad está localizada (latitude 23,03°N, longitude 72,58°E) no oeste da Índia a uma altitude de 53 m. A cidade é quase plana, exceto pelas pequenas colinas de Thalaj Jodhpur Tekra e está localizada em uma área arenosa e seca. Tem um clima semi-árido quente, exceto nas estações chuvosas. Ele experimenta monção de sudoeste que se estende de junho a outubro com chuvas médias a fortes.

A precipitação média anual é de cerca de 932 mm, o que inclui chuvas torrenciais fortes e pouco frequentes. A temperatura média varia de 45°C no verão a 15°C no inverno.

## 2 Coleta de dados

Um disdrômetro do tipo impacto Joss-Waldvogel (RD-80) (Joss e Waldvogel, 1967), fabricado pela M/s Distromet Ltd, Suíça, foi usado para coleta de dados. Este instrumento é usado em todo o mundo para

medidas do tamanho da gota. Lakshmi *et al.*<sup>5</sup> discutiram vários parâmetros do disdrômetro. Converte o momento mecânico vertical das gotas em pulsos elétricos. A área de amostragem da unidade externa mede 50 cm<sup>2</sup> e a unidade interna é composta por um analisador ADA-90. Os pulsos são convertidos em números de 8 bits. Assim, o disdrômetro pode medir 127 tamanhos de gota que são subdivididos em 20 classes de tamanho de gota, todas com diferentes intervalos de diâmetro  $\tilde{\gamma}D$  e diâmetros que variam de valor limite de 0,313 mm a 5,145 mm. As velocidades de queda das gotas com diâmetro correspondente a cada classe de queda,  $\tilde{\gamma}D$ , foram tomadas como sugerido por Gunn & Kinzer<sup>18</sup>. As medidas dos DSDs foram feitas com variação temporal de 30 segundos para melhor resolução das taxas de chuva. O disdrômetro foi instalado na cobertura de um edifício (5 m de altura) para minimizar as fontes de erro conhecidas como ruídos acústicos<sup>16</sup>. A localização do Centro de Aplicações Espaciais (SAC) é tal que a área esteja livre de qualquer ruído industrial ou acústico.

O disdrômetro tem certas limitações no que diz respeito à contagem das gotas menores e maiores.

O instrumento possui mecanismo de autocontrole de ruído.

Quando o ruído ambiente é alto, há possibilidade de erro na contagem de gotas menores. Durante a alta taxa de chuva, um circuito de supressão de ruído é ativado, o que resulta em uma redução na contagem de gotas menor.

A subestimação, em uma taxa de chuva muito forte, também pode ser devido ao tempo finito exigido pelo instrumento para se recuperar de uma queda e estar pronto para a próxima queda. Esse erro é chamado de erro de tempo morto e é corrigido usando a matriz de correção fornecida pelo fabricante. Mas os efeitos desses menores

gotas são menores na atenuação da chuva e estão dentro do limite de erro de 5%<sup>19</sup>. Gotas coletadas em todas as classes de tamanho de gota do disdrômetro foram consideradas na presente análise. Tem muito menos efeito no espectro DSD, exceto em taxas de chuva muito baixas. Na presente análise, a correção do tempo morto não é considerada. A possibilidade de erro é devido ao acúmulo de água na cabeça do sensor que pode alterar a calibração do sensor. Geralmente, toma-se cuidado na montagem do sensor de modo que os efeitos do ruído acústico e do vento sejam minimizados.

Os dados sobre a taxa de precipitação também foram coletados por um pluviômetro de balde basculante colocado. A comparação dos dados de chuva foi relatada<sup>20</sup>. Um coeficiente de correlação de 0,96 foi relatado entre os dois conjuntos de dados. A intensidade da chuva (mm h<sup>-1</sup>) estimada pelo disdrômetro é maior do que a estimada pelo balde basculante.

#### 2.1 Conjunto de dados

Alguns dos parâmetros importantes do conjunto de dados são apresentados na Fig. 1. A precipitação total acumulada, derivada dos dados DSD, ao longo do ano ocorreu por 9585 minutos. Os dados mensais de precipitação mostram que a precipitação máxima (pior mês) ocorreu no mês de agosto, que é de 5303 minutos. Os dados de chuva também foram agrupados em número de eventos mensais de chuva com mais de 5 mm de chuva acumulada e com intervalo de mais de duas horas. O número máximo de eventos registrados foi de 13 no mês de agosto. O evento mais longo registrado (1045 minutos) também foi no mês de agosto e também foi com maior precipitação em torno de 53 mm.

A divisão do evento em termos de intensidade de chuva (mm h<sup>-1</sup>) e duração é dada na Fig. 2. Esta análise será útil no cálculo do tempo total de interrupção, um parâmetro importante para o engenheiro de comunicação.

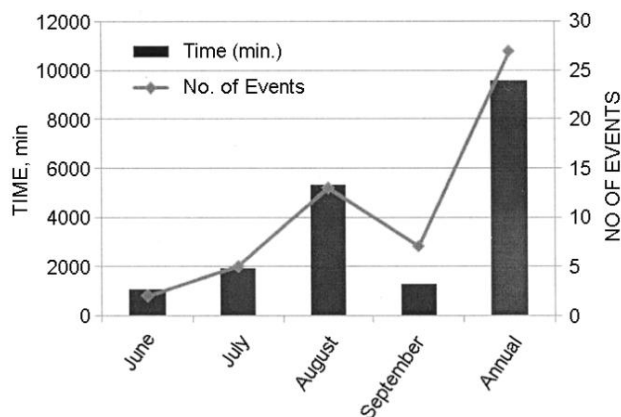


Fig. 1 — Estatísticas de eventos de chuva em Ahmedabad (2007)

### 3 Análise dos dados

#### 3.1 Calculando

a média do DSD Para obter uma estimativa significativa dos parâmetros que descrevem os DSDs, os DSDs instantâneos foram calculados em base mensal e anual para eliminar componentes de variação aleatória e obter distribuições estáveis. Os DSDs instantâneos de cada

amostra foram coletados em quatorze classes de chuva conforme mostrado na Tabela 1. Muitas pesquisas<sup>14,15</sup> sugeriram aumento exponencial na largura das classes de chuva porque a duração da chuva é máxima nas baixas taxas de chuva e diminui exponencialmente com o aumento da chuva a avaliar. As taxas mínimas e máximas de chuva são tomadas como inferiores a 0,005 e 100 mm h<sup>-1</sup> respectivamente. A Tokay & Short<sup>19</sup> classificou a chuva como muito leve (menos de 1 mm h<sup>-1</sup>), leve (1 - 2 mm h<sup>-1</sup>), moderada (2 - 5 mm h<sup>-1</sup>), forte (5 - 10 mm h<sup>-1</sup>), muito pesado (10 - 20 mm h<sup>-1</sup>) e extremo (mais de 20 mm h<sup>-1</sup>) para classificação dos regimes de precipitação, convectivo e estratiforme, com base em dados de distribuição de tamanho de gotas coletados com disdrômetro RD-69.

No entanto, na presente análise, os limites são tomados como 1 mm h<sup>-1</sup> e 140 mm h<sup>-1</sup> e divididos em 14 faixas de 10 mm h<sup>-1</sup> de duração cada. Isso ocorre porque é a taxa de chuva mais alta ocorrendo, digamos, 0,01% do tempo, que é de interesse do engenheiro de comunicação para cálculos de margem de desvanecimento induzido pela chuva. Os DSDs médios foram obtidos em base mensal (junho, julho, agosto, setembro e outubro) e anual.

#### 3.2 Formatação e Análise dos

Dados Primeiramente, os dados foram organizados em ordem crescente de taxa de chuva e depois agrupados de acordo com as classes de taxa de chuva conforme mencionado na Tabela 1. Para cada faixa de taxa de chuva, o número médio de gotas caindo em cada uma das 20 gotas classes de tamanho ( $n_1, n_2, n_3, \dots, n_{20}$ ) foram calculadas. Os dados do número de gotas, assim, obtidos foram convertidos em número de gotas por m<sup>3</sup> por mm em cada classe de tamanho de gota<sup>21</sup> usando a relação:  $N(D_i) = \frac{1}{\Delta D_i} \left[ \frac{dN}{dD} \right]_{D_i}$

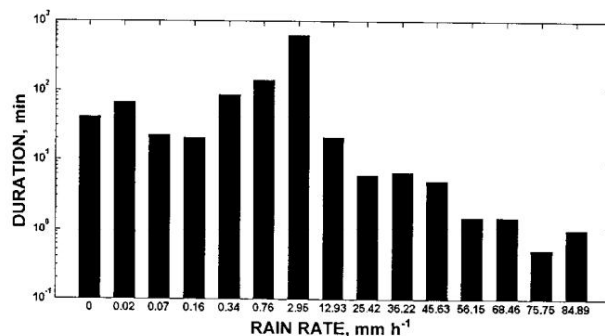


Fig. 2 — Análise dos eventos de chuva mais intensos ocorridos em 08 de agosto de 2007

Tabela 1 — Parâmetros de DSD médio para o ano de 2007

Compartmento de taxa de chuva	Classe de taxa de chuva, mm h <sup>-1</sup> N° de DSDs	Taxa média de chuva, mm h <sup>-1</sup> NT, m-3	ln Dg	ln $\bar{y}$
1	1 $\bar{y}$ R < 10 10	5795	3,12	263
2	$\bar{y}$ R < 20 20 $\bar{y}$	655	14,01	548
3	R < 30 30 $\bar{y}$ R	281	24,69	601
4	< 40 40 $\bar{y}$ R <	191	34,90	652
5	50 50 $\bar{y}$ R < 60	151	44,55	733
6	60 $\bar{y}$ R < 70 70	98	54,33	812
7	$\bar{y}$ R < 80 80 $\bar{y}$ R	77	64,74	794
8	< 90 90 $\bar{y}$ R <	44	74,66	979
9	100 100 $\bar{y}$ R <	28	84,29	953
10	110 110 $\bar{y}$ R <	16	95,20	684
11	120 120 $\bar{y}$ R < 130	11	104,40	1054
12	130 $\bar{y}$ R < 140	7	114,73	1038
13		7	125,59	1291
14		1	136,95	1151

onde,  $N(D_i)$ , é o número de gotas de chuva por unidade de volume por unidade de intervalo de diâmetro, com diâmetro médio  $D_i$ ; A, a área de superfície do sensor (50 cm<sup>2</sup> no presente caso); T, o intervalo de tempo de  $v_i$ , amostragem (0,5 min.); a velocidade terminal das gotas de chuva;  $\bar{y}$  é o diâmetro médio, a concentração numérica de gotas por unidade de volume de chuva, a concentração numérica de gotas por unidade de volume de chuva, a concentração numérica de gotas por unidade de volume de chuva.

O número de gotas m-3 ( $N_i$ ) em cada classe de diâmetro de gota, que é igual a  $N(D_i) \times \bar{y} D_i$  também foram calculados a cada taxa de chuva para cálculo de NT, o número total de gotas m-3. NT é a soma dos valores de  $N_i$  para as vinte classes de intervalo de diâmetro de gota em cada taxa de chuva.

#### 4 Modelagem de DSD

##### 4.1 Comparação entre a distribuição Lognormal e

Gamma A distribuição dos valores experimentais de  $N(D_i)$  como chegou acima, em base anual, foi analisada ajustando as distribuições lognormal e gama usando o software Table Curve. O software Table Curve usa o procedimento de ajuste linear baseado na opção Fast Std onde polinômios e racionais de ordem superior são ajustados pelo método de eliminação de Gauss.

Os coeficientes de correlação obtidos em diferentes taxas de chuva foram plotados na Fig. 3. A comparação mostra que os valores dos coeficientes de correlação são melhores no caso de distribuição lognormal do que aqueles com distribuição gama. Na maioria das taxas de chuva, os valores são melhores que 0,95 no caso de distribuição lognormal. Na taxa de chuva superior a 0,01% do tempo, que está em torno de 76 mm h<sup>-1</sup> no presente caso e é de interesse para o projeto de link de comunicação, o valor está quase chegando a um. Assim, a análise adicional apresentada é baseada na distribuição lognormal.

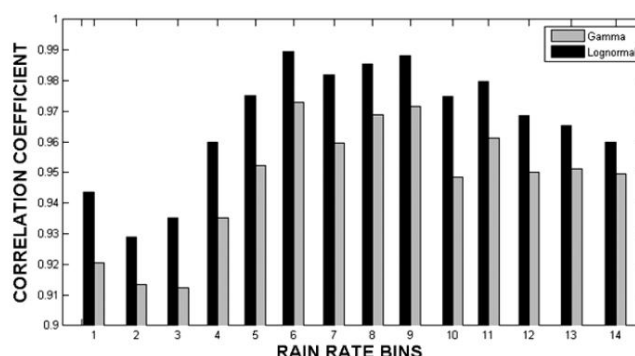


Fig. 3 — Comparações dos coeficientes de correlação das distribuições lognormal e gama de melhor ajuste obtidos para dados DSD anuais coletados em Ahmedabad (2007)

4.2 Distribuição baseada em parâmetros de ajuste derivados experimentalmente O ano de 2007 contém dados disdrometros para o período de junho a outubro de 2007. Devido aos escassos dados de chuva no mês de outubro, o mesmo não foi analisado, pois não afetará a determinação geral das características DSD. Os parâmetros de ajuste da distribuição lognormal foram derivados conforme explicado abaixo:

Parâmetros da distribuição lognormal [Eq. (3)] podem ser deduzidos, conforme suas definições, dos dados do disdrometro usando as seguintes relações:

$$\ln D_g = (1/NT) \sum_{i=1}^{20} N_i \ln D_i \quad \dots (5)$$

$$NT = \sum_{i=1}^{20} N_i \ln D_i \quad \dots (6)$$

onde, NT, é a concentração numérica (m-3) no espectro observado; e  $N_i$ , o número de gotas na categoria de

Expressão para distribuição lognormal [Eq. (3)] é reproduzido como:  $N(D) = (\exp A/D) \exp\{-0,5[(\ln D - B)/C]^2\}$

... (7)

Onde,

$$A = \ln[NT/\bar{y}(2\bar{y})\ln\bar{y}] \quad \dots (8)$$

$$B = \ln D_g \quad \dots (9)$$

$$C = \ln \bar{y} \quad \dots (10)$$

A, B e C nas Eqs (8-10) são parâmetros de ajuste da distribuição lognormal.

Os valores da média geométrica dos diâmetros das gotas ( $\ln D_g$ ) e desvio padrão dos diâmetros das gotas ( $\ln \bar{y}$ ) foram calculados usando as Eqs (5 e 6) em bases mensais e anuais para cada taxa de chuva. O valor de NT,  $\ln D_g$  e  $\ln \bar{y}$  para distribuição anual também são dados na Tabela 1. Os valores dos parâmetros de ajuste A, B e C da distribuição lognormal foram avaliados usando as Eqs (8), (9) e (10), respectivamente.

#### 4.2.1 Análise mensal de DSD

Os valores do parâmetro de ajuste A, B e C foram avaliados para os meses de junho, julho, agosto e setembro de 2007 a partir dos dados experimentais DSD para a taxa média de chuva correspondente a cada caixa de chuva. As curvas mensais de melhor ajuste, entre  $N(D_i)$  e diâmetro de gota  $D_i$ , em cada taxa, foram desenhadas usando os parâmetros software MATLAB. As curvas em algumas taxas de chuva selecionadas, por uma questão de clareza, são mostradas na Fig. 4. Os pontos de dados experimentais são plotados nela. As curvas foram desenhadas para as taxas médias de chuva entre 1 e 100 mm h<sup>-1</sup>. Observa-se pelas curvas que à medida que a taxa de chuva aumenta, o número de gotas com diâmetros diferentes também aumenta e, ao mesmo tempo, o modo de distribuição se desloca para um diâmetro de gota maior. O diâmetro da maior gota que cai também aumenta com o aumento da taxa de chuva. A curva DSD na menor taxa de chuva (14,01 mm h<sup>-1</sup>) no mês de setembro apresenta comportamento diferente quando comparado com as curvas de chuvas semelhantes para os demais meses. Este achado precisa ser analisado mais a fundo, pois nenhuma explicação definitiva pode ser encontrada neste momento.

#### 4.2.2 Análise DSD anual

As curvas de distribuição de tamanho de gotas anuais em diferentes taxas de chuva, derivadas dos parâmetros de ajuste experimentais A, B e C juntamente com os pontos de dados experimentais são mostrados na Fig. 5. O comportamento das curvas de distribuição anual é o mesmo que em distribuição mensal.

**4.3 Variabilidade dos parâmetros de ajuste anual com o número de amostras** Os valores dos parâmetros de ajuste A, B e C para distribuição lognormal também foram avaliados por 30 segundos (uma amostra de dados de disdrômetro), 1 min (duas amostras de dados de disdrômetro) e 5 min (dez disdrômetros) amostras de dados) para cada compartimento de taxa de chuva e comparados com valores anuais, conforme mostrado pelos histogramas na Fig. 6. Os histogramas foram plotados em taxas de chuva 24,69, 54,33, 74,66 e 95,20 mm h<sup>-1</sup>, cobrindo assim quase todo o espectro de chuva. Não foi notada muita variação no parâmetro A com a mudança no

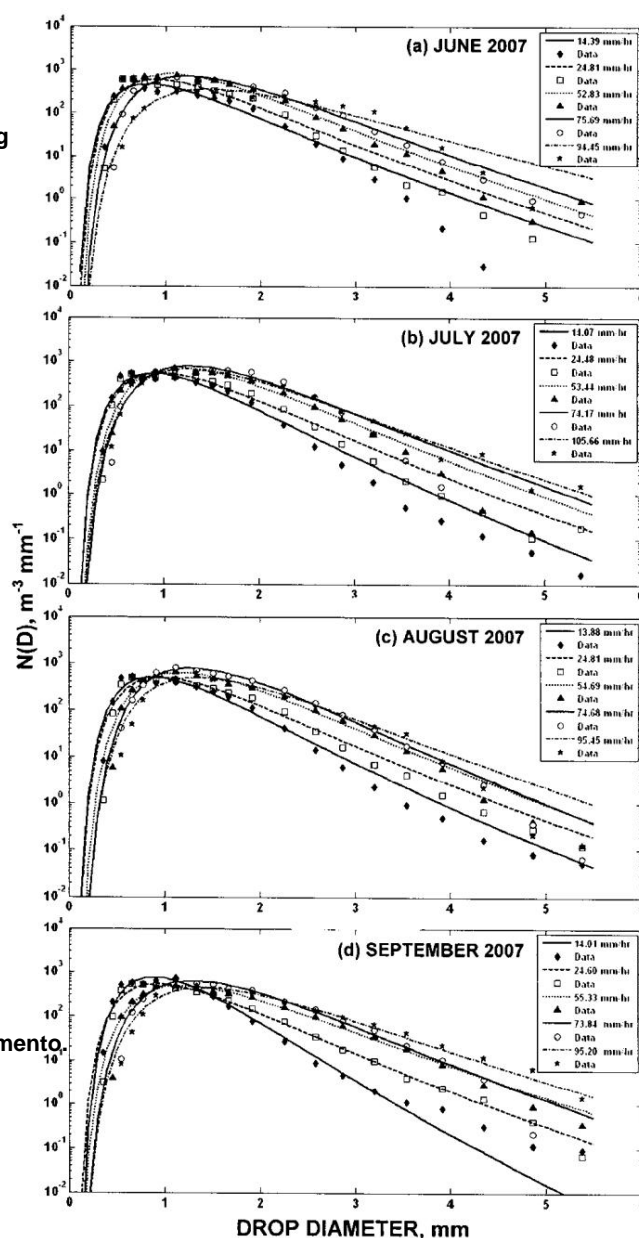


Fig. 4 – Espectro de distribuição do tamanho das gotas de chuva para: (a) Junho de 2007; (b) julho de 2007; (c) agosto de 2007; e (d) setembro de 2007

**Número de amostras.** No parâmetro B, embora a variabilidade com o número de amostras seja visível, nenhuma tendência definida pode ser prevista. O parâmetro C é quase constante em 0,4, independentemente do número de amostras e da taxa de chuva.

#### 4.4 Modelagem dos parâmetros

**de ajuste anual** Os valores dos parâmetros de ajuste A, B e C para distribuição de tamanho de gota anual, em cada taxa de chuva, foram plotados na Fig. 7. Os valores dos parâmetros de ajuste A e B variam quase linearmente com aumento exponencial da taxa de chuva em taxa de chuva superior a 10 mm h<sup>-1</sup>, enquanto o parâmetro C é quase constante no valor 0,4 em todas as taxas de chuva. Esse achado sobre o parâmetro de ajuste C também foi relatado por Hari Kumar et al.14. A variação dos parâmetros de ajuste A, B e C com a taxa de chuva foi estudada usando o software Table Curve. As equações de melhor ajuste foram encontradas como:

$$A = A_0 + A_1(\ln R)^2 \quad \dots (11)$$

$$B = B_0 + B_1(\ln R)^2 \quad \dots (12)$$

$$C = \text{constante} (0,4) \quad \dots (13)$$

onde, os coeficientes A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, B<sub>0</sub> e B<sub>1</sub> são os parâmetros de ajuste; e R, é a taxa de chuva. Inserção das Eqs (11-13) na Eq. (3) fornece o modelo empírico necessário para DSD. Os valores dos coeficientes A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, B<sub>0</sub> e B<sub>1</sub>, seus coeficientes de correlação e erro padrão de ajuste são dados como abaixo:

* Ajuste o parâmetro A	B	
* Coeficientes	A <sub>0</sub> : 5,561, A <sub>1</sub> : 0,063	B <sub>0</sub> : -0,183, B <sub>1</sub> : 0,031
* Coeficiente de correlação	0,883	0,992
* Ajuste de erro padrão	0,160	0,018

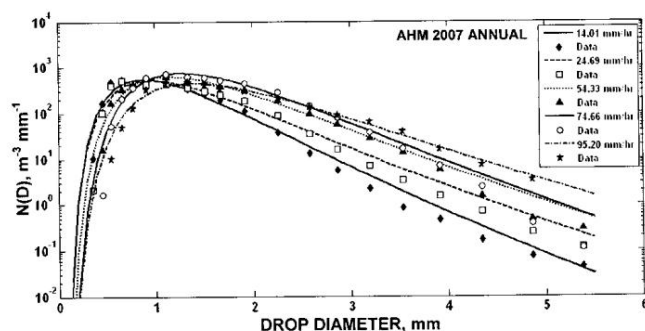


Fig. 5 — Espectro de distribuição anual do tamanho das gotas de chuva 2007

#### 4.4.1 Comparação dos parâmetros de ajuste com outros modelos

Os valores dos parâmetros de ajuste A, B e C foram comparados, em diferentes taxas de chuva, com os relatados por Hari Kumar et al.14 por histogramas na Fig. 8. Modelos relatados na ref. 14 são baseados em dados disdrômetros coletados em Thiruvananthapuram, Kochi, Munnar e Sriharikota, que são áreas costeiras da Índia. Não há muita diferença no valor do parâmetro A, mas há variação considerável no parâmetro B. O parâmetro B basicamente representa a média geométrica do diâmetro da gota e seu valor é alto no caso do modelo desenvolvido na ref. 14. A partir dessa comparação, uma inferência pode ser

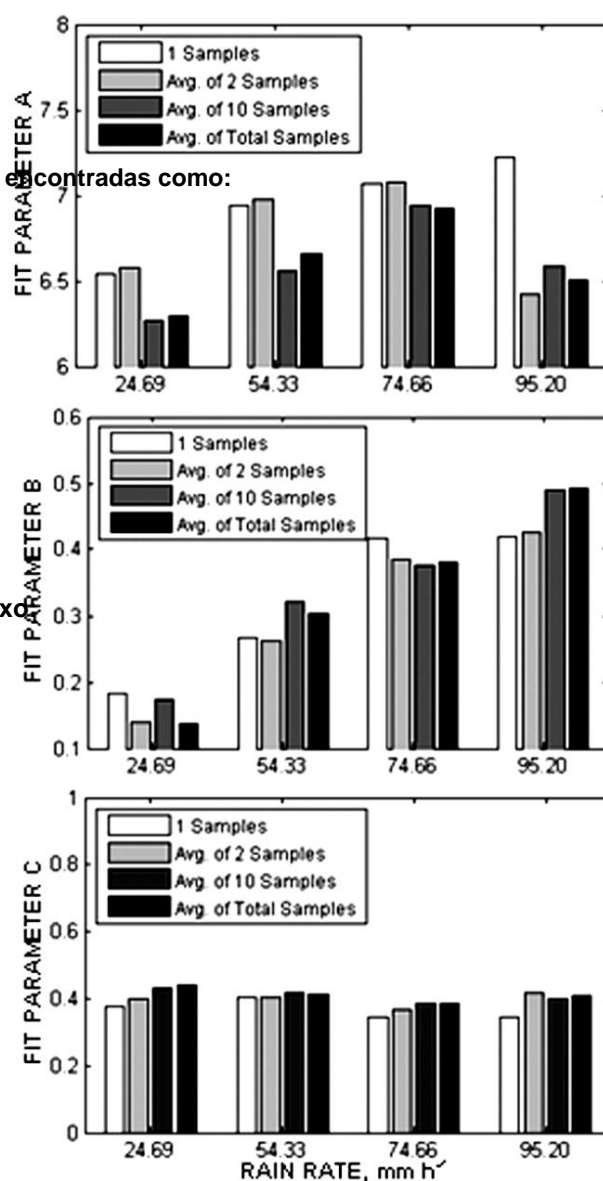


Fig. 6 — Variação do parâmetro de ajuste A, B e C com o número de amostras de chuva

desenhado que há mais concentração das gotas com maior diâmetro no caso de chuvas costeiras em comparação com as chuvas em área plana como Ahmedabad. Este fato é muito importante do ponto de vista de atenuação em frequências de ondas milimétricas. Isso dá força à filosofia de coleta de dados, em DSD, em vários lugares que representam diferentes condições meteorológicas na Índia.

O parâmetro C que representa o desvio padrão dos tamanhos das gotas é quase o mesmo em 0,4 em ambos os casos. A partir da discussão acima, pode-se inferir que a distribuição do tamanho das gotas não pode ser generalizada e depende do tipo de chuva. Nas áreas costeiras, as características das chuvas são diferentes daquelas observadas em Ahmedabad. Análise semelhante também foi relatada por Feng e Chen<sup>22</sup> e Ajwa<sup>23</sup> para dados coletados em clima

temperado e Nigéria. Os valores dos parâmetros  $A$ ,  $B$  e  $C$ , para distribuição lognormal, aqui relatados estão em variância quando comparados com os da Índia apresentados no presente trabalho e dados por Hari Kumar *et al.* em ref. 14.

### 5 Validação do modelo empírico

Para validar o modelo empírico anual, os pontos de dados experimentais, na taxa de chuva média correspondente a todos os quatorze compartimentos de taxa de chuva, foram plotados sobre as curvas derivadas do modelo na Fig. 9 usando valores de  $A$ ,  $B$  e  $C$  obtidos de Eqs (11-13). Curvas derivadas do modelo relatado na ref. 14 também são plotados para comparação, entre os valores

derivados do modelo e os valores experimentais de  $N(D)$ , foram plotados na Fig. 10 para cada taxa de chuva. Os valores dos coeficientes de correlação encontram-se entre 0,932 e 0,994, o que mostra uma correlação muito boa entre o modelo e os dados experimentais. Pode-se observar na Fig. 9 que para as taxas de chuva até 74,66 mm h<sup>-1</sup>, nenhuma gota caiu no último compartimento do disdrometro correspondente ao diâmetro de 5,5 mm. Com taxas de 95,20 mm h<sup>-1</sup>, as gotas foram registradas no silo de 5,5 mm de diâmetro e o número de gotas registradas é maior do que as quedas registradas no silo inferior seguinte correspondente a 4,86 mm de diâmetro, o que vai contra a tendência normal observada nos silos de menor diâmetro. A possível razão para isso pode ser a presença das gotas com diâmetro maior que 5,37 mm (as gotas registradas no silo com diâmetro 5,35 também foram

consideradas no desenvolvimento do modelo empírico). A razão para a ausência de gotas na última caixa em taxas de chuva de 104,40 mm h<sup>-1</sup> e superiores

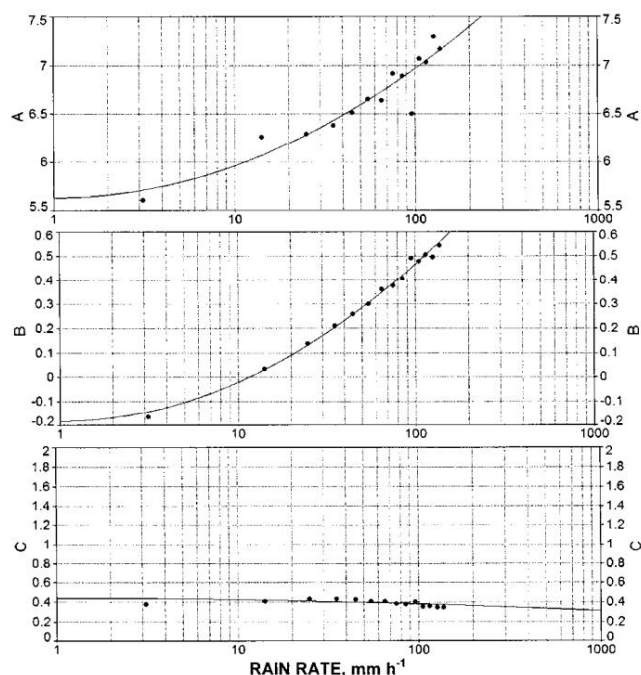


Fig. 7 — Variação do parâmetro de ajuste A, B e C com taxa de chuva

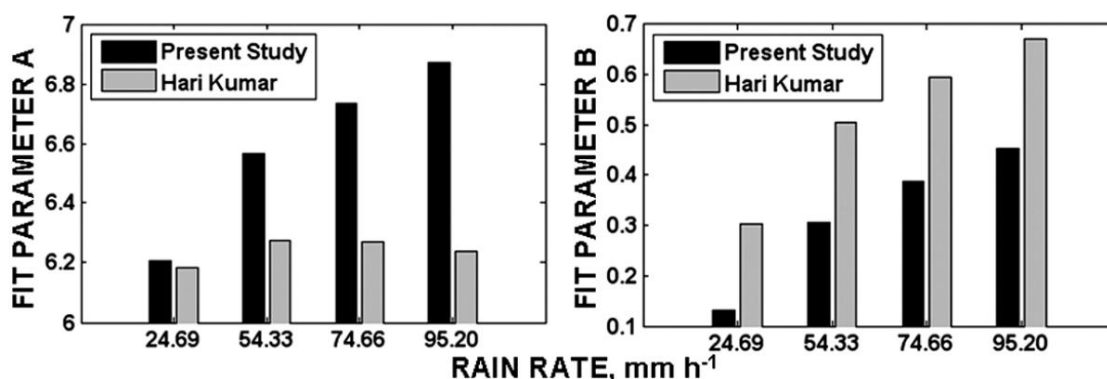


Fig. 8 — Comparação dos parâmetros de ajuste modelados A e B com outros

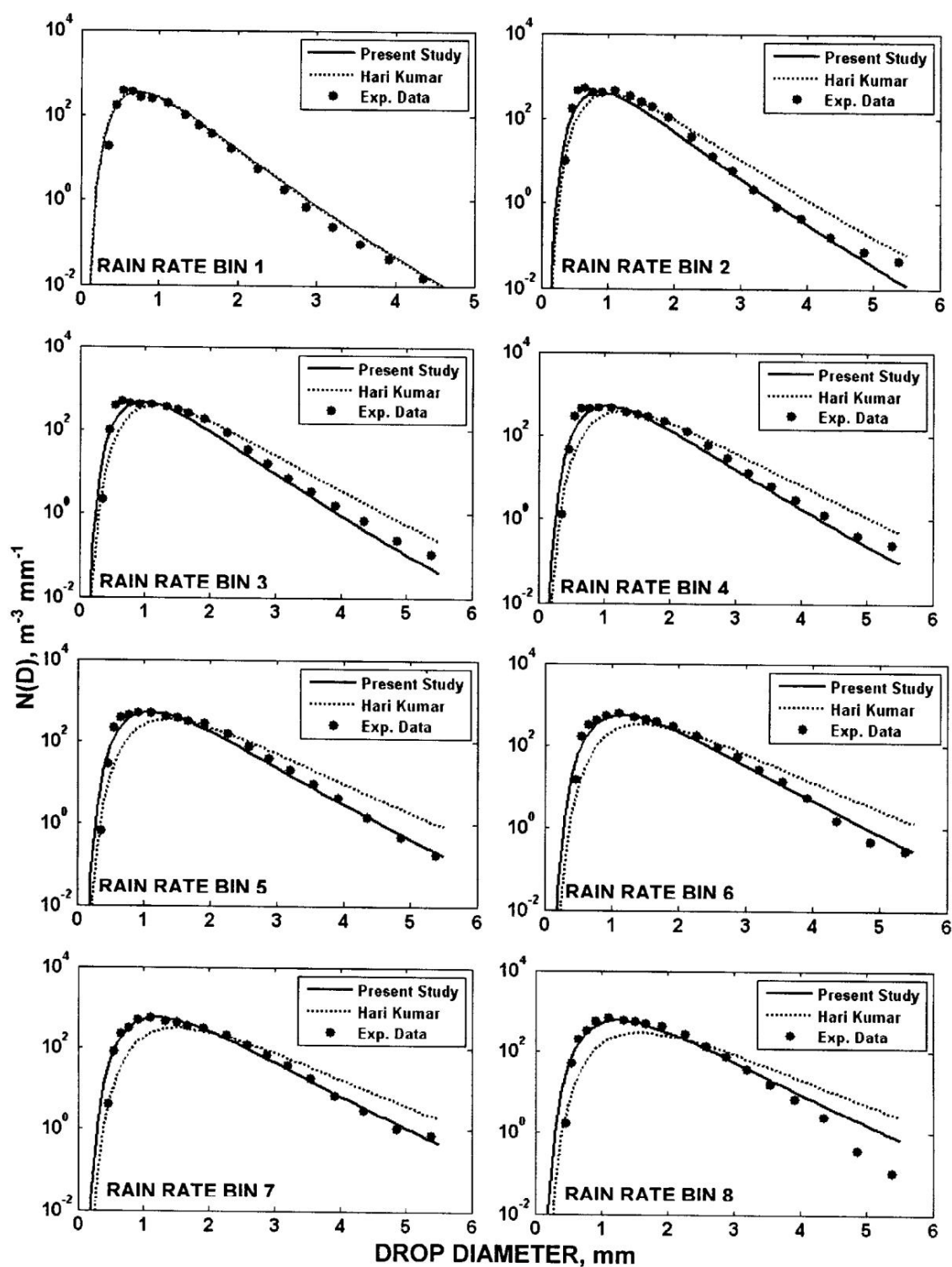


Fig. 9 — Validação do modelo empírico desenvolvido com dados experimentais e comparação com o modelo desenvolvido por Hari Kumar



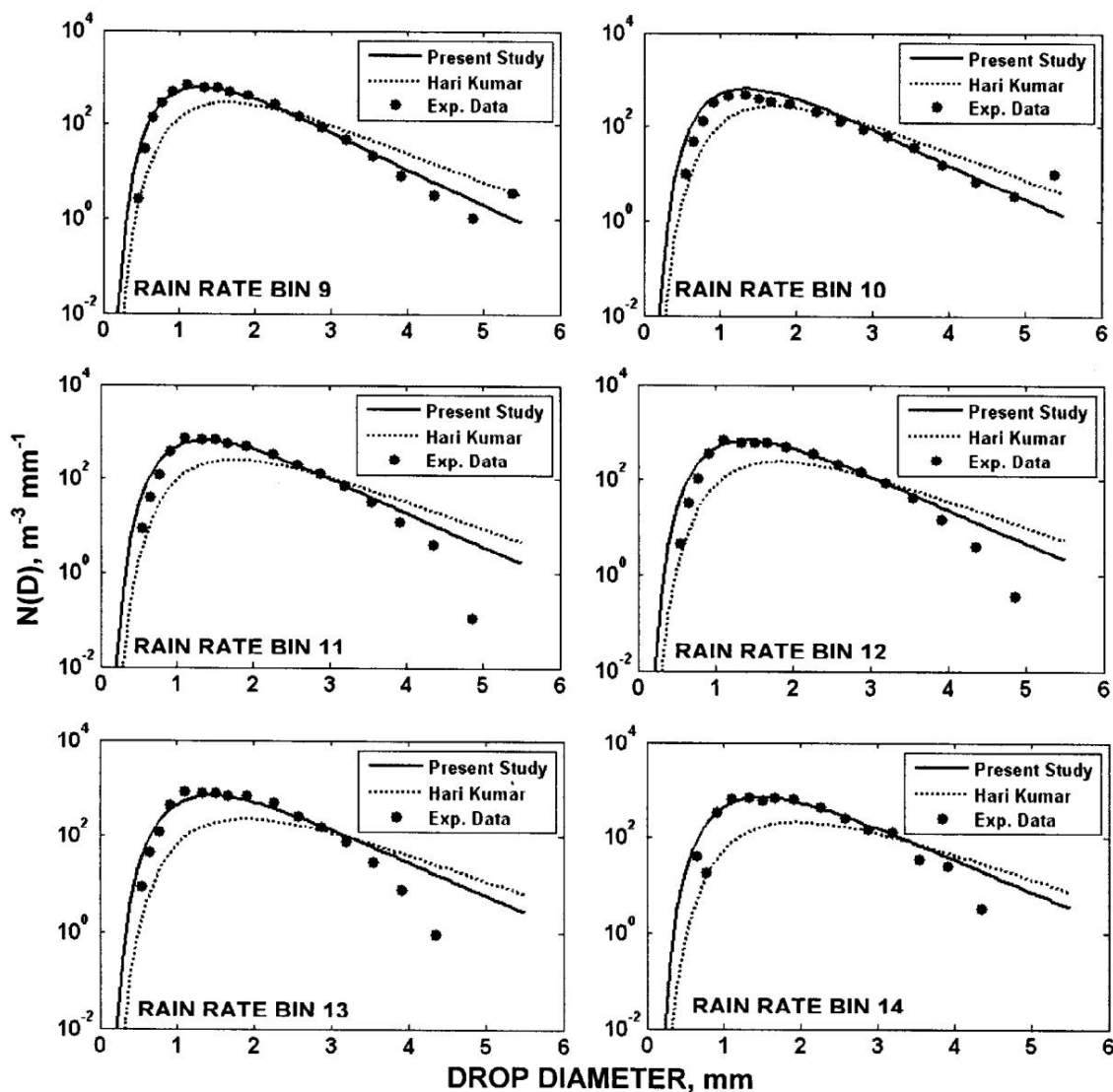


Fig. 9 (Cont.)—Validação do modelo empírico desenvolvido com dados experimentais e comparação com o modelo desenvolvido por Hari Kumar

de gotas maiores em gotas menores em taxas de chuva mais altas. A outra razão possível poderia ser a mudança de chuva estratiforme para chuva convectiva em que o número de gotas menores é relatado como maior e o número de gotas maiores é menor<sup>19</sup>. O número de eventos de chuva, de 30 segundos cada, registrados em 104, 114, 125 e 136 mm h<sup>-1</sup> foram 26, 21, 8 e 1, respectivamente. Tem sido geralmente observado que as chuvas acima de 100 mm h<sup>-1</sup> são eventos isolados e não representam as chuvas normais de monção que caem de junho a setembro. Para um engenheiro de comunicação, taxas de chuva superiores a 0,01% do tempo, em longo prazo (um ano ou mais), são de interesse.

no presente caso é 74,66 mm h<sup>-1</sup> em base anual.

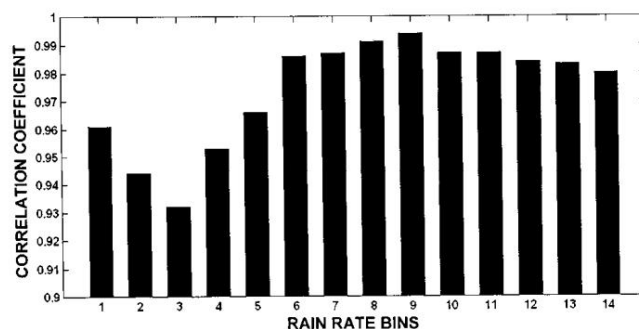


Fig. 10 — Coeficientes de correlação entre DSD modelado e experimental para diferentes compartimentos de taxa de chuva

## 6. conclusões

O modelo de distribuição de tamanho de gota é desenvolvido para um local tropical Ahmedabad, Índia. A boa correlação obtida entre os resultados experimentais e o modelo, autentica o achado relatado por outros pesquisadores de que a distribuição lognormal é mais adequada para regiões tropicais. No entanto, a partir do presente estudo, é evidente que os valores dos parâmetros de ajuste diferem de lugar para lugar, como encontrado para Ahmedabad no presente estudo e relatado por outros para áreas costeiras da Índia. Além disso, a taxa de precipitação (mm h<sup>-1</sup>) e a duração também dependem das condições climáticas. Estudo semelhante também deve ser realizado para as regiões central e norte da Índia. Tais dados são essenciais para projetar os links de comunicação de ondas milimétricas confiáveis, atendendo ao critério de confiabilidade percentual desejado, para difere

## Agradecimentos Os

autores agradecem à Organização Indiana de Pesquisa Espacial (ISRO), Bangalore e Centro de Aplicação Espacial (SAC), Ahmedabad por fornecer os dados brutos e apoio financeiro para a atividade do projeto.

## Referências

- Crane Robert K, *Propagação de ondas eletromagnéticas através chuva* (John Wiley, Nova York), 1996.
- Davarian Famaz, *Uma atualização sobre medições de propagação da banda Ka da NASA* (Jet Propulsion Lab, Califórnia), 1994, 91109.
- Hari Kumar R, Sasi Kumar V, Sampath S & Vinayak PVSSK, Comparação da distribuição do tamanho da gota entre estações nas costas oriental e ocidental da Índia, *J Indian Geophys Union*, 11 (2) (2007) pp 111-116.
- Kozu T, Reddy KK, Mori S, Thurai M, Ong JT, Rao DN & Shimomai Toyoshi, Variações sazonais e diurnas da distribuição do tamanho das gotas de chuva, *J Meteorol Soc Jpn (Japão)*, 84A (2006) pp 195-209.
- Lakshmi SK, Lee YH & Ong JT, modelos de distribuição de tamanho de gota gama truncados para atenuação de chuva em Cingapura, *IEEE Trans Antenas Propag (EUA)*, 58 (4) (2010) pp 1325-1335.
- Ajayi GO & Olsen RL, Medição e análise da distribuição do tamanho das gotas de chuva no sudoeste da Nigéria, *Proceeding International Radio Science Union, Comissão para Simpósio sobre Propagação de Ondas e Sensoriamento Remoto, ESA SP-194* (Louvain, Bélgica), 1983, pp 173 -184.
- Marshall JS & Palmer WM, A distribuição de gotas de chuva com tamanho, *J Atmos Sci (EUA)*, 5 (1948) pp 165-166.
- Joss J & Waldvogel A, Ein spektrograph für neider schlagestrophen mit automatischer auswertung, *Pure Appl Geophys (Suíça)*, 68 (1967) pp 240-246.
- Joss J & Gori E, Formas de distribuições de tamanho de chuva, *J Appl Meteorol (EUA)*, 17 (1978) 1054.
- Takeuchi DM, Caracterização de distribuições de tamanho de gotas de chuva, *Conf on Cloud Physics e eletricidade atmosférica, Issaquah* (Am Meteorol Soc, Boston), 1978, pp 154-161.
- Ulbrich CW, Variações naturais na forma analítica da distribuição do tamanho das gotas de chuva, *J Clim Appl Meteorol (EUA)*, 22 (1983) pp 1764-1775.
- Willis PT & Tattelman P, Distribuição do tamanho da gota associada a chuvas intensas, *J Appl Meteorol (EUA)*, 28 (1989) pp 3-15.
- Feingold G & Levin Z, O ajuste lognormal aos espectros de gotas de chuva de nuvens convectivas frontais em Israel, *J Clim Appl Meteorol (EUA)*, 25 (1986) pp 1346-1363.
- Harikumar R, Sampath S & Sasi Kumar V, Um modelo empírico para a variação da distribuição do tamanho da gota de chuva com a taxa de chuva em alguns locais no sul da Índia, *Adv Space Res (Reino Unido)*, 43 (2009) pp 837-844.
- Sauvageot H & Lacaux JP, The shape of average drop size distribution, *J Atmos Sci (EUA)*, 52 (1995) pp 1070-1083.
- Das S, Mitra A & Shukla AK, Modelagem de atenuação de chuva na frequência de 10-100 GHz usando distribuições de tamanho de gota para diferentes zonas climáticas na Índia tropical, *Prog Electromagn Res (Hong Kong)*, 25 B (2010) pp 211-224.
- Odedina MO & Afullo TJ, *Modelagem analítica da atenuação da chuva e sua aplicação a links LOS terrestres*, Southern Africa Telecommunication Networks and Application Conference (SATNAC) (Royal Swazi Spa, Suazilândia), 2009.
- Gunn R & Kinzer GD, A velocidade terminal de queda para gotas de água em ar estagnado, *J Atmos Sci (EUA)*, 6 (4) (1949) pp 243-248.
- Tokay A & Short DA, Evidência de espectros de gotas de chuva tropicais da origem da chuva de nuvens estratiformes versus nuvens convectivas, *J Appl Meteorol (EUA)*, 35 (1996) pp 355-371.
- Shukla AK, Roy B, Das S, Charania AR, Kavaiya KS, Bandyopadhyay K & Dasgupta KS, Medições de micro células de chuva na Índia tropical para estimativa de mitigação de desvanecimento da diversidade de locais, *Radio Sci (EUA)*, 45 (2010) RS1002.
- Jassal BS, Verma AK & Lal Singh, distribuição do tamanho da gota de chuva e atenuação para o clima indiano, *Indian J Radio Space Phys*, 23 (3) (1994) pp 193-196.
- Fang DJ & Chen CH, Propagação de ondas centímetro/milímetro ao longo de um caminho inclinado através da precipitação, *Radio Sci (EUA)*, 17 (5) (1982) pp 989-1005.
- Ajayi GO & Olsen RL, Modelagem de uma distribuição de tamanho de gota de chuva tropical para aplicações de microondas e ondas milimétricas, *Radio Sci (EUA)*, 20 (2) (1985) pp 193-202.