

# COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO NO CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA DE EVENTOS EXTREMOS

*Fernando Duarte Barbalho<sup>1</sup>; Klebber T. Martins Formiga<sup>2</sup>; Mariana Marquês Teixeira<sup>3</sup>*

**Resumo** --- Tendo em vista a necessidade do emprego de medidas de precipitação obtidas pontualmente para obtenção dos valores de chuva média sobre uma área, parâmetro fundamental em estudos hidrológicos, este trabalho objetivou a comparação de três técnicas de interpolação espacial de dados: o Método do Inverso do Quadrado das Distâncias; o Método Multiquadric; e uma variante do mesmo para eliminação de erros de tendência. A comparação foi realizada empregando-se dados de oito pluviógrafos instalados recentemente na Bacia do Córrego Botafogo, zona urbana de Goiânia-GO. Foi avaliada a convergência de resultados conforme o aumento da densidade espacial de dados disponibilizada para cada técnica, sendo empregados três cenários e um de referência. Também se avaliou a variação nos resultados de chuva média quando do incremento da área de interesse, também testando-se três situações em comparação com uma de referência. O Multiquadric apresentou os melhores resultados no primeiro caso, sendo a técnica que convergiu melhor para o cenário de referência, enquanto o Inverso do Quadrado das Distâncias teve menor variação em função do aumento de área. Concluiu-se positivamente pelo emprego do Multiquadric quando as regiões de borda apresentam boa cobertura, e de sua versão alterada nestes casos.

**Abstract** --- In view of the needs on applying point measures of rain to estimate the mean areal rainfall, an important hydrologic research parameter, this work intended to compare three spatial interpolation techniques: the Reciprocal Distance Squared Methods; the Multiquadric Method; and a variant kind of this, which is unbiased. The comparison was done using a dataset obtained from a new rain gauge network, with eight pluviographs, recently installed over Córrego Botafogo's Basin, urban zone of Goiânia-GO. It was evaluated the results convergence as rising the spatial density of data employed for each technique, being used three scenario and a reference one. Also, it was evaluated the variation of mean areal rainfall results when rising the evaluation area, using three situations comparing with a reference one too. The Multiquadric showed the best results in the first case, being the technique with best convergence compared with the reference scenario, while the Reciprocal Distance Squared Method had the minor variation as increasing the evaluated area. We conclude for the Multiquadric applying when the bounds are well covered, and the applying of its variant otherwise.

**Palavras-Chave** - chuva média; multiquadric; inverso do quadrado das distâncias.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente - PPGEMA - da Universidade Federal de Goiás. Endereço: Rua R-34, Qd-33, Lote-23, Conjunto Itatiaia, Goiânia - GO, 74690-590, fone: (62) 8523-0547. e-mail: fd.baralho@gmail.com.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil pela UFCG, Mestre em Recursos Hídricos pela UFCG, Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP, Professor Adjunto da EEC/UFG. e-mail: klebber.formiga@gmail.com.

<sup>3</sup> Aluna do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Goiás. Endereço: Rua c-157, Qd-280, Lote-21, Jardim América, Goiânia- GO, 74255-160, fone: (62) 8146-2244. e-mail: marianamarquesteixeira@gmail.com.

## 1. INTRODUÇÃO

A estimativa da chuva média sobre uma bacia hidrográfica é indispensável para a modelagem hidrológica (Pegram e Pegram, 1993), principalmente quando são considerados intervalos de tempo menores na discretização temporal do fenômeno. A chuva é tida como a principal entrada de água em uma bacia, capaz de gerar escoamento, e assim sendo, sua avaliação é essencial em estudos de drenagem urbana (Tucci, 2004). Entretanto, a maior parte dos dados de precipitação, no aspecto de cobertura espacial e temporal, são encontrados na forma de registros de medidas pontuais, como os realizados por pluviômetros e pluviógrafos.

Neste contexto, diversas ferramentas tem sido desenvolvidas e aplicadas na tentativa de se estimar a chuva média sobre uma área com uso de dados pontuais. Este estudo pretende portanto, comparar três técnicas de espacialização e interpolação de dados, a fim de verificar sua adequação em eventos extremos de precipitação, aplicando dados da cidade de Goiânia, especificamente na bacia hidrográfica do Córrego Botafogo.

É razoável que a aplicação de técnicas para estimativa da chuva média seja diferente entre o caso de eventos extremos e o caso de chuvas anuais ou mensais, já que a variabilidade espacial e temporal do fenômeno pode ser mais intensa. Como tais eventos tem maior impacto sobre os sistemas de drenagem urbana, o estudo de padrões para precipitações extremas sobre bacias urbanas é necessário, bem como a avaliação de técnicas para tanto.

Os métodos a serem empregados neste estudo específico são: o Método do Inverso do Quadrado das Distâncias - MIQD, sugerido por Wei e McGuinness (1973); o Método Multiquadric, com aplicação em precipitação proposta por Shaw e Lynn (1972) e uma variação do mesmo sugerida por Balascio (2001). Todas as técnicas são de ponderação, diferindo entre si na maneira de estimar os pesos de cada posto de medição. Além disso, as três são aptas para estimativa da distribuição espacial da precipitação, através do ajuste de uma superfície continua conforme os observados na região.

Entretanto, como os valores reais desta variável são desconhecidos, uma comparação direta entre os métodos pode indicar alguns erros grosseiros, mas não a melhor entre eles. Assim, uma maneira de se avaliar as técnicas seria a observação de suas convergências para um determinado resultado, através da variação da disponibilidade de dados, reduzindo-se ou aumentando-se o número de estações empregadas.

Neste trabalho, foram testados os três métodos citados, aplicados em uma bacia urbana, utilizando uma nova rede de pluviógrafos instalada, com oito estações, avaliando-se como o número de postos influenciou os resultados obtidos para os eventos mais expressivos observados em diferentes durações.

Desta forma, o objetivo foi verificar quão rápido as técnicas melhoravam seus resultados, convergindo para um valor de referência, quando era incrementada espacialmente a disponibilidade de dados, e assim sendo inferir sobre a performance dos métodos.

Além disso, foi realizada uma análise da estabilidade dos resultados apresentados pelos métodos, quando se alterava a área abrangida no cálculo. Isso porque é desejável que técnicas de ajuste de superfície sejam capazes de ajustar uma superfície exatamente horizontal, com altura definida (BALASCIO, 2001). Essa propriedade é indicativa de menores erros de tendência em regiões de borda ou muito afastadas dos pontos de observação.

Tal análise foi realizada através da variação do raio de uma região circular fictícia, verificando-se a alteração dos valores de chuva média obtidos para os eventos extremos observados bem como o comportamento da superfície de chuva estimada.

## 2. MÉTODOS

Sendo  $p_i$ , a precipitação observada em um determinado intervalo de tempo no posto  $i$ , de coordenadas  $(x_i, y_i)$ , e considerando-se os  $n$  postos com dados disponíveis, a precipitação média  $P$  é encontrada normalmente como:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i k_i \quad (1)$$

onde  $k_i$  representa o coeficiente de ponderação de cada posto, que pode variar ou não com o tempo.

Uma forma de aplicação indireta desta ponderação consiste na interpolação de valores conhecidos de forma a estimar a precipitação pontualmente em cada ponto de um *grid* regular e denso, calculando depois a precipitação média a partir da média aritmética entre todos os pontos. Desta forma, sendo  $P_j$  a precipitação calculada em cada ponto do *grid* de interesse, a Equação 1 pode ser reescrita como:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n P_j}{n} \quad (2)$$

onde:

$$P_j = \sum_{i=1}^n p_i \times k_{ij} \quad (3)$$

Observa-se então que neste caso o coeficiente  $k$  de cada posto de observação varia conforme o ponto a ser calculado.

## 2.2. O Método do Inverso do Quadrado das Distâncias - MIQD

Wei e McGuinness (1973) propuseram o Método do Inverso do Quadrado das Distâncias - Reciprocal distance squared method - para determinação da chuva média sobre uma área. O mesmo pode ser considerado uma dentre as técnicas de interpolação baseadas na ponderação pelo inverso da distância. É um modelo largamente empregado em diversos estudos relacionados à precipitação média (BALASCIO, 2001), também citando entre outros os de Caruso e Quarta (1998), Dirks *et al* (1998) e Nicks (1982). Este método, assume que a precipitação para qualquer ponto  $(x, y)$  de uma bacia pode ser determinada a partir dos  $n$  valores observados nos postos pluviométricos, sendo o seu valor inversamente proporcional à distância do mesmo às diversas estações.

Este método, assume que a precipitação para qualquer ponto  $(x, y)$  de uma bacia pode ser determinada a partir dos  $n$  valores observados nos postos pluviométricos, sendo o seu valor inversamente proporcional à distância do mesmo às diversas outras estações.

Para o cálculo da precipitação com esta técnica é preciso impor um sistema de coordenadas de modo que toda a bacia hidrográfica fique localizada no primeiro quadrante do mesmo. Sendo assim, o total precipitado em um ponto,  $p(x, y)$ , será igual a:

$$p(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \quad (4)$$

em que  $p_i$  é o montante precipitado no posto  $i$ , e  $D$  é a distância entre o posto  $i$  e o ponto  $(x, y)$ .

Após o cálculo das precipitações pontuais é possível estimar a superfície de precipitação sobre a região apenas marcando-se os resultados e também realizar o cálculo da precipitação média a partir da aplicação da equação 2.

## 2.2. O Método Multiquádrico - MQ e sua variante sem tendências - MQB

A aplicação de superfícies quádricas para interpolação de dados pontuais foi desenvolvida inicialmente por Hardy (1971) para aplicação em ciências geofísicas. Posteriormente, Shaw e Lynn

(1972) aplicaram a técnica para ajuste de superfícies com dados de precipitação, apontando a mesma como uma boa alternativa.

De forma geral é assumido que a superfície formada pela precipitação pode ser encontrada pela superposição de diversas superfícies quádricas individuais com origem nos distintos pontos de observação. Essas superfícies individuais podem ser de natureza parabólica (5) ou hiperbólica (6):

$$z(x, y) = \sum_j^N c_j \left[ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right] \quad (5)$$

$$z(x, y) = \sum_j^N c_j \left[ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + a^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

nas quais  $c_j$  representa os coeficientes de ponderação de cada estação. No caso particular das superfícies hiperbólicas, com  $a = 0$ , as mesmas representam cones, e este será o modelo empregado neste trabalho. A aplicação de superfícies hiperbólicas tem um ajuste mais suave e no caso especial das cônicas uma implementação mais simples (LEE; LYNN; SHAW, 1974).

Os valores dos coeficientes de ponderação de cada posto podem ser encontrados pela solução de um sistema empregando-se os dados conhecidos. Como os demais métodos de interpolação, a existência de uma quantidade de postos significativa próximos aos limites da bacia permite uma melhor interpolação interna (BALASCIO, 2001). A configuração simplificada do problema torna-se:

$$D\underline{c} = \underline{z} \quad (7)$$

Onde  $\underline{c}$  representa um vetor com N coeficientes de ponderação,  $\underline{z}$  é o vetor composto pelos N valores observados em questão e  $D = \{d_{ij}\}$  é uma matriz  $N \times N$  das seguintes equações:

$$d_{ij} = \left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

No caso da opção pelas equações cônicas, se observa que essa matriz é simétrica em torno da diagonal principal e que seus valores dependem unicamente da posição dos postos empregados. Pode também ser usado um número maior de pontos observados no ajuste dos coeficientes, daí o sistema terá mais equações do que incógnitas e deverá ser resolvido por meio de técnicas de numéricas.

Borga e Vizzaccaro (1997) estabeleceram uma equivalência formal entre o MQ e o Método de Kriging. Syed *et al* (2003), ao compararem a técnica com o Método de Kriging, optaram pelo uso do MQ pela maior praticidade com resultados semelhantes.

Uma característica observada no MQ é que a determinação da precipitação em um ponto da bacia é função de todos os postos de observação empregados, isso pode contribuir para a minimização dos efeitos de erros locais de medição na determinação da precipitação média.

Balascio (2001) ainda apresentou uma maneira de reduzir os erros de tendência do MQ nas regiões de extrapolação. Ele aponta que um dos problemas genéricos dos métodos de ajuste de superfície é ajustar uma superfície horizontal, em especial no caso das equações cônicas com altura inicial nula, pode ocorrer em algumas regiões que o MQ calcule valores menores que zero para a chuva, efeito melhor observado quando as alturas de precipitação observadas são baixas. Optou-se por referir-se à tal variante como MQB.

Conforme detalhado por Balascio (2001), pode ser inserida uma restrição ao sistema de equações, que garanta o ajuste da superfície gerada pelo MQ a um valor constante. Desta forma a equação 7 pode ser reescrita como:

$$D\underline{c} + b\underline{1} = \underline{z}, \text{ com a restrição } \underline{c}'\underline{1} = 0 \quad (9)$$

O coeficiente  $b$  garante o ajuste a uma superfície constante, visto que todos os cones teriam inclinação nula, formando planos, neste caso. O valor de  $b$  pode ser obtido da seguinte maneira:

$$b = \frac{\underline{1}'D^{-1}z}{\underline{1}'D^{-1}\underline{1}} \quad (10)$$

Esta alteração na técnica permite que o método apresente variações mais suaves quando da extrapolação de seus resultados para regiões de borda, de certa maneira vindo a convergir para um valor, diferentemente da metodologia original que, por sua vez, apresenta grandes desvios com o incremento significativo da distância. Entretanto tal modificação deve ter seu efeito avaliado, ou seja, os benefícios e malefícios quando comparado ao modelo original, em situações onde haja ou não situações de extrapolação.

### 3. DADOS E METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO

Os dados empregados neste trabalho consistem de séries diárias de observações contínuas no período chuvoso, com extensão de 28 dias, sem falhas, agrupadas e valores de precipitação de

minuto em minuto para cada estação pluviográfica. Todas as séries começam no dia 10 de fevereiro de 2011 e terminam no mesmo horário do dia 10 de março de 2011, resultando em 40.321 minutos de observação. Os oito aparelhos utilizados para a coleta de dados são parte de uma rede de monitoramento instalada na cidade de Goiânia, região central do Brasil, e alocados na Bacia do Córrego Botafogo (Figura 1), um curso hídrico urbano que integra o sistema de drenagem da cidade. A área da bacia é de aproximadamente 32,2 km<sup>2</sup>, comprimento de rio principal igual a 10,7 km (Figura 1), comprimento aproximado de 10,1 km e declividade do rio de 0,0163 m/m. Foi utilizado o software de geoprocessamento ArcGIS 9.3 para delimitação da mesma.

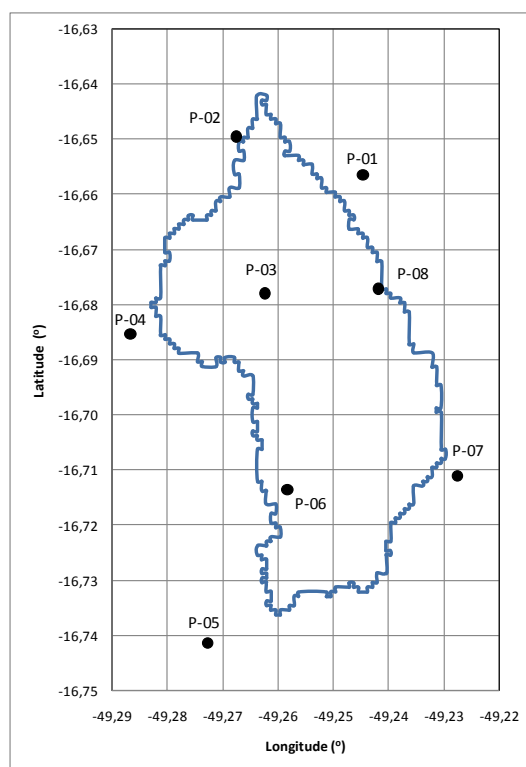


Figura 1 - Delimitação da Bacia do Córrego Botafogo e distribuição dos postos empregados.

Como já colocado anteriormente, foram realizadas duas análises acerca das metodologias empregadas. Definida como Etapa 1, foi inicialmente realizada uma análise de convergência de resultados conforme alteração da disponibilidade espacial de dados. Já a Etapa 2, consistiu na avaliação da variabilidade dos resultados ao se incrementar a área de cálculo a ser considerada, aplicando-se uma mesma disponibilidade espacial de dados para todos os métodos.

Além disso, apesar da delimitação levantada, a bacia real não foi considerada nestes estudos para o cálculo da chuva média, a fim de que a forma da mesma não interferisse nos resultados. Portanto foram empregadas quatro áreas circulares, de centros coincidentes com o baricentro da rede de postos, de coordenadas 49° 15' 15,51" O e 16° 41' 34,06" S (considerando os oito

equipamentos), com raios de 5,53km, 8,29km, 12,44km e 16,59°, nomeadas respectivamente de R-00, R-01, R-02 e R-03.

Para a seleção dos eventos extremos, foram definidas as seguintes durações de interesse: 05(A), 30(B), 60(C) e 120(D) minutos, baseadas no tempo de concentração da bacia real, estimado em 71,5 minutos, conforme a metodologia proposta pelo *Federal Highway Administration* (BROWN et al, 2009), considerando-se o coeficiente de Manning igual a 0,015. Ainda, a discretização espacial adotada em todos os casos foi de 553m.

Para a Etapa 1, foi definido o cenário de referência contando com todos os oito postos disponíveis. Para este cenário foram calculadas as chuvas médias na bacia de minuto a minuto, e assim verificados os valores máximos apresentados para as durações escolhidas, em cada modelo empregado, este cenário foi nomeado REF. Identificados os períodos de abrangência de cada evento extremo no cenário REF, foram calculados os valores da chuva média por cada método, nos mesmos intervalos de tempo, variando-se o número de postos. Para tanto foram criados mais três cenários, com 6, 5 e 3 postos, nomeados respectivamente como SC-01, SC-02 e SC-03. Por fim, foram comparados em cada evento e método, os erros de cada cenário relativos aos valores de chuva média obtidos para o cenário REF.

Já para a Etapa 2, foram calculadas as precipitações médias de mesmas durações (A, B, C e D) nas áreas, R-00, R-01, R-02, R-03 e na bacia real, esta última apenas à título de comparação. Em todos os casos foram definidos como intervalos e valores de referência, os obtidos para a região R-00. Também, para todos os cálculos foram empregados dados dos oito postos, ou seja, o cenário definido anteriormente como REF. A partir de então, calculou-se a chuva média para os mesmos intervalos, alterando-se as áreas, e verificando o valor de variação no resultado da chuva média para cada método em cada evento.

A Tabela 1, disposta a seguir, apresenta a localização dos pluviógrafos empregados, bem como a composição de cada cenário:

Tabela 1 - Pluviógrafos empregados em cada cenário. Os "X" indicam os pluviógrafos empregados em cada cenário.

Pluviógrafo	Longitude	Latitude	REF	SC-3	SC-2	SC-1
P-01	-49° 14' 40,44"	-16° 39' 23,45"	X			
P-02	-49° 16' 03,05"	-16° 38' 58,42"	X	X	X	X
P-03	-49° 15' 43,99"	-16° 40' 40,87"	X	X	X	
P-04	-49° 17' 12,07"	-16° 41' 07,20"	X	X		
P-05	-49° 16' 21,64"	-16° 44' 29,27"	X			
P-06	-49° 15' 29,75"	-16° 42' 49,25"	X	X	X	X
P-08	-49° 13' 38,66"	-16° 42' 40,20"	X	X	X	X
P-010	-49° 14' 30,36"	-16° 40' 37,77"	X	X	X	



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são apresentados abaixo os resultados obtidos para a Etapa 1 deste trabalho (Tabela 2). São identificados os eventos, o minuto inicial dos mesmos (coluna ID-evento), e os valores de precipitação obtidos em cada cenário, bem como o erro quando comparados com o cenário REF.

Tabela 2 - Resultados da Etapa 1. Valores de precipitação média obtida para cada evento, utilizando os dados de cada cenário, para os cada método avaliado: a) MIQD, b) MQ, c) MQB.

a)

Evento	Duração (min)	ID-evento	Precipitação Média Calculada (mm) e Erro relativo ao cenário REF						
			REF	SC-01	Erro (%)	SC-02	Erro (%)	SC-03	Erro (%)
A	5	8.947	3,02	3,60	19,20	1,82	39,84	1,42	53,02
B	30	8.940	11,22	12,29	9,56	5,55	50,58	6,55	41,63
C	60	11.774	15,39	15,78	2,49	13,65	11,35	10,96	28,83
D	120	11.756	21,77	22,20	1,96	19,89	8,65	16,61	23,70
Média					8,30		27,61		36,79
Máximo					19,20		50,58		53,02
Desvio Padrão					6,97		18,03		11,42

b)

Evento	Duração (min)	ID-evento	Precipitação Média Calculada (mm) e Erro relativo ao cenário REF						
			REF	SC-01	Erro (%)	SC-02	Erro (%)	SC-03	Erro (%)
A	5	8.947	3,24	4,06	25,27	2,21	31,78	2,01	37,85
B	30	8.940	12,51	15,14	21,01	7,87	37,09	9,23	26,22
C	60	11.774	15,25	15,94	4,57	15,29	0,32	12,62	17,20
D	120	11.757	21,80	22,59	3,62	22,73	4,25	19,72	9,54
Média					13,62		18,36		22,70
Máximo					25,27		37,09		37,85
Desvio Padrão					9,65		16,24		10,55

c)

Evento	Duração (min)	ID-evento	Precipitação Média Calculada (mm) e Erro relativo ao cenário REF						
			REF	SC-01	Erro (%)	SC-02	Erro (%)	SC-03	Erro (%)
A	5	8.947	3,21	3,55	10,73	1,87	41,63	1,65	48,52
B	30	8.940	12,07	12,65	4,77	5,99	50,35	7,55	37,43
C	60	11.774	14,76	14,63	0,90	13,70	7,18	10,92	26,04
D	120	11.757	20,91	20,48	2,05	19,91	4,81	16,81	19,64
Média					4,62		25,99		32,90
Máximo					10,73		50,35		48,52
Desvio Padrão					3,80		20,25		11,04

Da mesma maneira, a Figura 2 sintetiza tais resultados, comparando o desempenho (valores de erro em função do número de postos empregados) entre os métodos para cada evento:

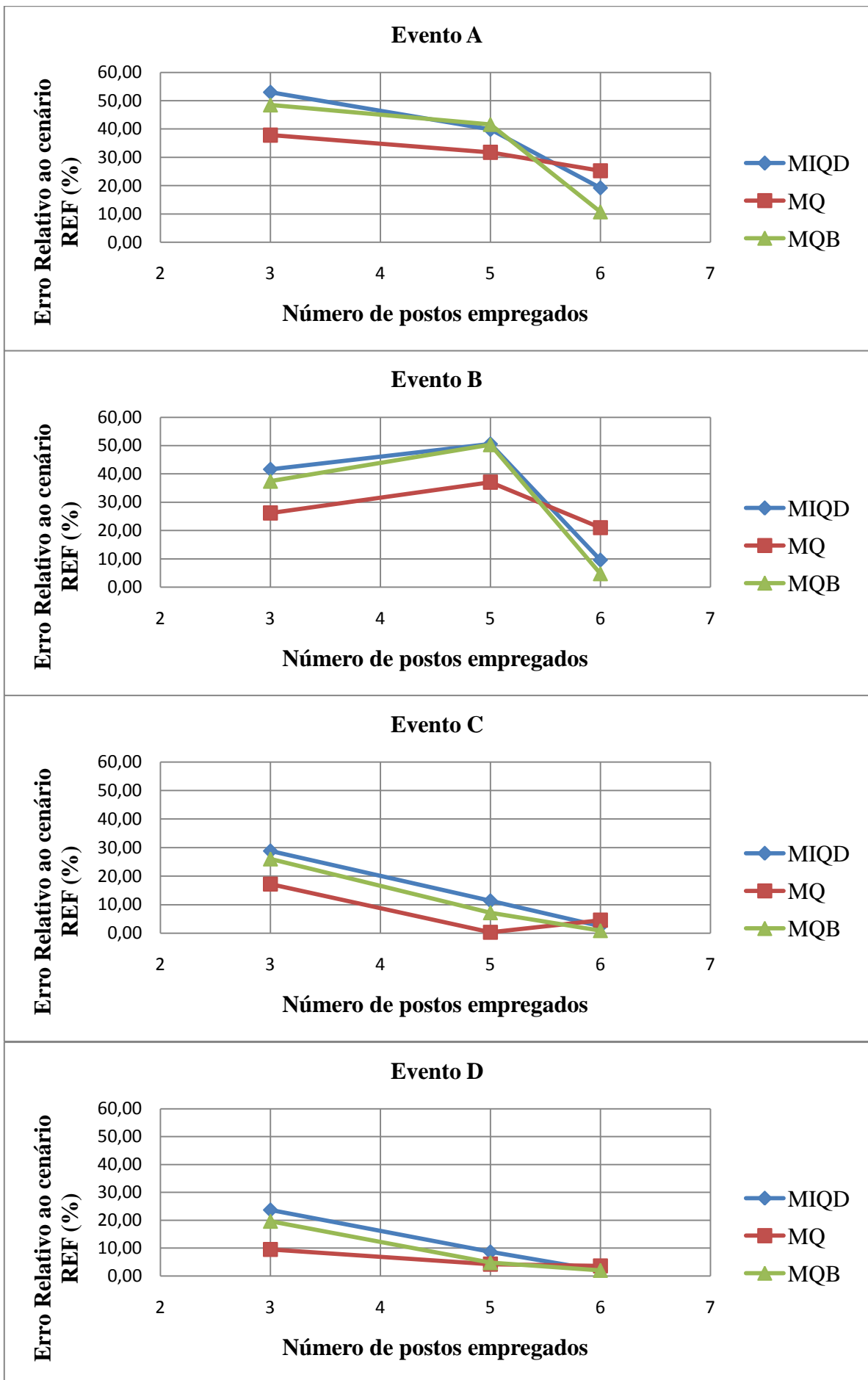


Figura 2 - Comparação dos erros relativos ao cenário REF em cada método, obtidos nos eventos.

Nota-se que para todos os eventos, existe um erro menor para os cenários SC-03 e SC-02 nos resultados do método MQ, sendo seguido em termos de performance pelo MQB. Entretanto, apesar da proximidade geral dos resultados de erro no cenário SC-01, o MQ obteve um desempenho pouco inferior aos demais, sendo que o MQB manteve no geral melhores resultados que o MIQD. A mesma análise pode ser feita para os valores de erro máximo e médio entre os eventos, bem como para a variabilidade dos erros entre eventos, que foi menor também no MQ para os cenários SC-02 e SC-03, e menor para o MQB no cenário SC-01.

Desta forma, ainda que com o pequeno desvio de qualidade para o cenário SC-01, no qual a densidade de postos está mais próxima da de referência, e portanto apresenta menores erros em todos os métodos, o MQ obteve no geral um melhor comportamento de convergência, podendo ser este ser um indicativo de vantagens em seu uso.

Na Tabela 3 verifica-se os resultados para precipitação média obtidos na Etapa 2 deste trabalho. Na mesma é possível verificar a variação dos valores da chuva média de cada evento, para cada método, quando do acréscimo do raio da área circular adotada como referência. Também encontra-se ilustrado o valor da chuva média obtido na bacia, apenas à título de curiosidade.

Tabela 3 - Resultados da Etapa 2. Valores de precipitação média obtida em cada evento, utilizando os dados do cenário REF e variando-se a área circular de interesse, para os cada método avaliado:

a) MIQD, b) MQ, c) MQB.

a)

Evento	ID-evento	Precipitação média (mm) obtida e respectiva variação em relação a área R-00 (%)							
		Bacia real	R-00	R-01	Variação	R-02	Variação	R-03	Variação
A	18.897	3,44	2,48	2,19	11,45	2,17	12,16	2,21	10,55
B	18.882	12,32	10,34	10,15	1,84	10,12	2,09	10,31	0,29
C	11.774	16,23	15,39	14,98	2,72	14,97	2,76	14,98	2,72
D	11.747	23,10	21,65	21,30	1,58	21,35	1,38	21,40	1,15

b)

Evento	ID-evento	Precipitação média (mm) obtida e respectiva variação em relação a área R-00 (%)							
		Bacia real	R-00	R-01	Variação	R-02	Variação	R-03	Variação
A	18.897	3,68	2,03	0,97	52,20	0,43	78,57	0,24	87,98
B	18.883	12,49	9,78	9,98	2,10	11,37	16,26	14,03	43,52
C	11.774	16,40	15,25	15,13	0,75	17,32	13,64	20,26	32,90
D	11.747	23,33	21,29	21,77	2,23	25,61	20,27	30,49	43,21

c)

Evento	ID-evento	Precipitação média (mm) obtida e respectiva variação em relação a área R-00 (%)							
		Bacia real	R-00	R-01	Variação	R-02	Variação	R-03	Variação
A	18.897	3,66	2,09	1,11	46,96	0,52	75,09	0,29	86,01
B	18.883	12,58	9,43	8,51	9,81	7,63	19,14	7,63	19,10
C	11.774	16,53	14,76	13,01	11,88	11,88	19,52	11,04	25,21
D	11.747	23,52	20,54	18,49	10,02	17,22	16,20	16,30	20,64

Também estas informações podem ser melhor visualizadas na Figura 3 adiante:

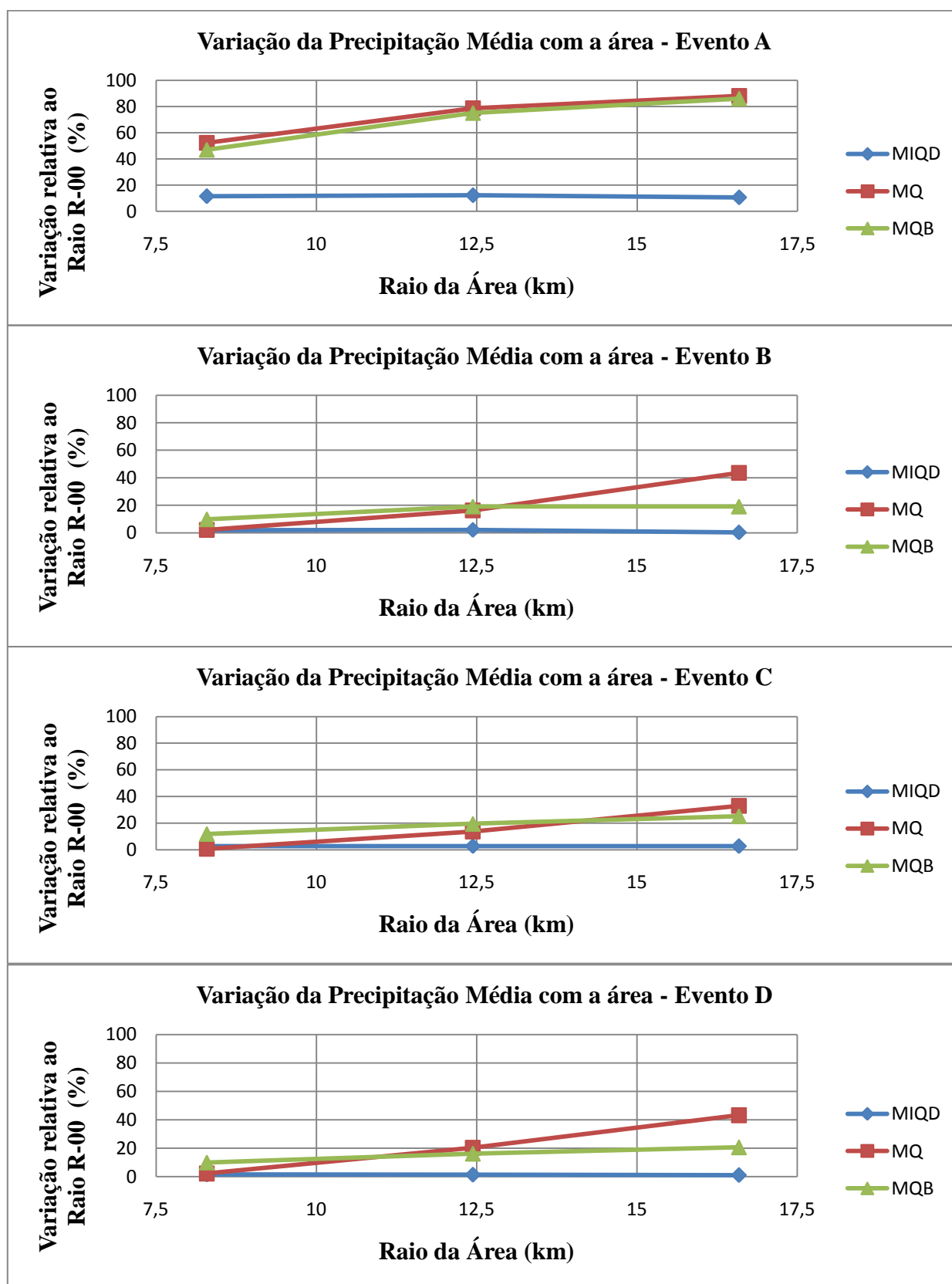


Figura 3 - Comparação das variações nos valores de chuva média calculados quando do incremento das áreas circulares de interesse.

As figuras a seguir (Figuras 4, 5, 6 e 7) ilustram a superfície de precipitação gerada por cada método, para cada evento, utilizando-se os dados do cenário REF. É possível observar que conforme o raio aumenta, o MIQD mais rapidamente estabiliza sua superfície entorno da média, já o MQB apresenta tal tendência de forma menos acentuada. Por outro lado o MQ não apresenta este comportamento, e sim, tende a ampliar os resultados (tanto para valores negativos, convertidos em chuva nula, como para valores positivos). Tais características são condizentes com as esperadas devido a formulação de cada método.

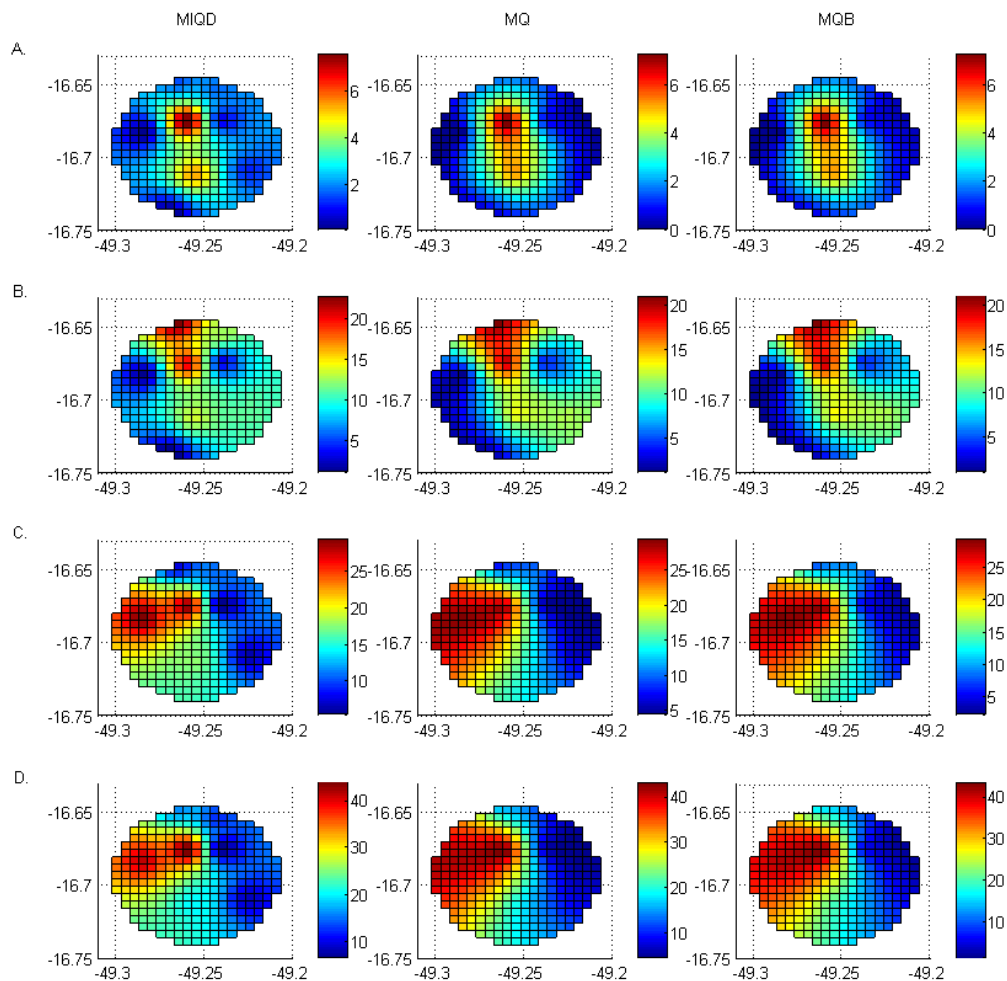


Figura 4 - Superfícies de precipitação (mm) estimadas por cada método em cada evento, para a área circular R-00 com raio de  $0,05^\circ$ , aproximadamente 5,53 km.

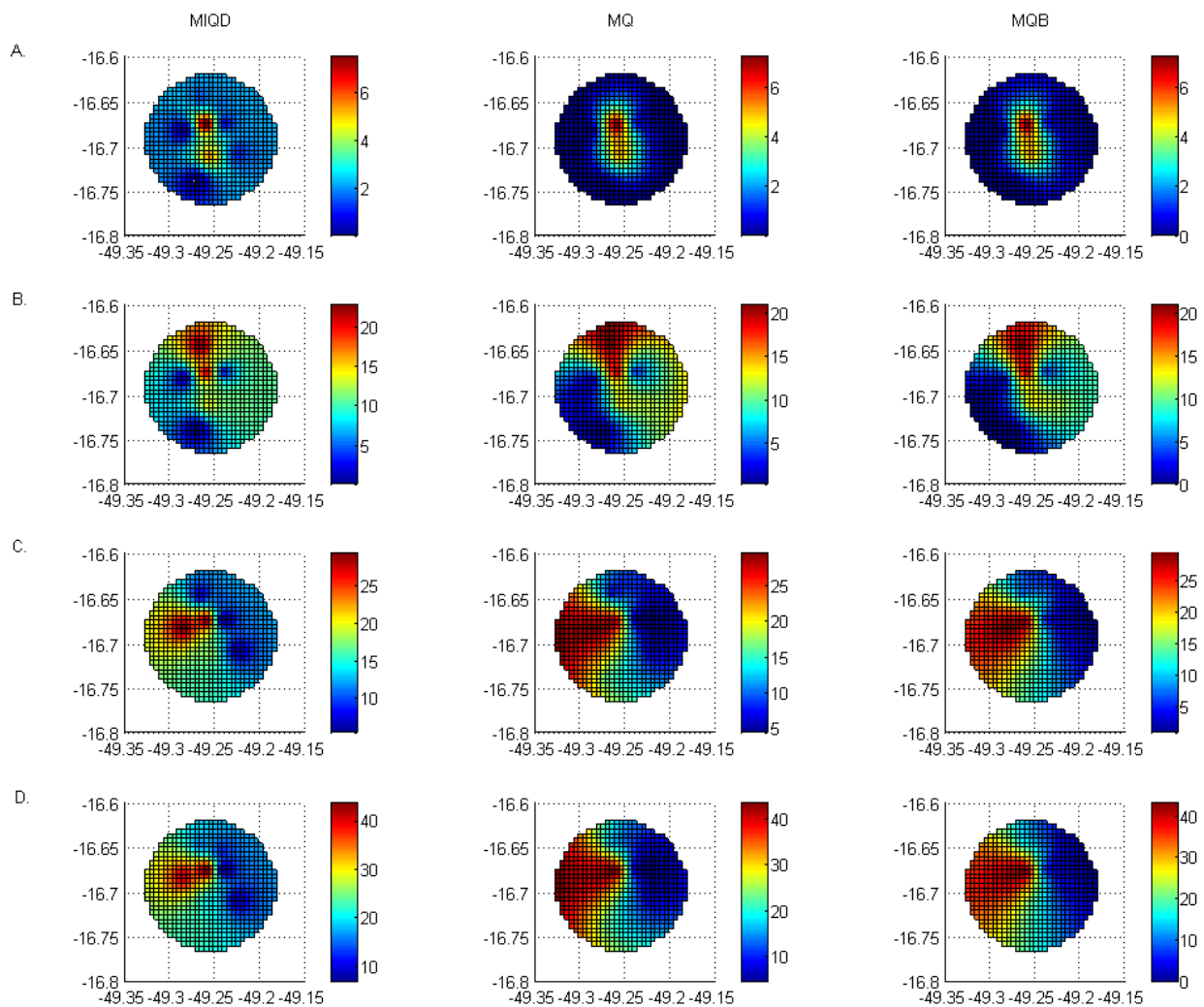


Figura 5 - Superfícies de precipitação (mm) estimadas por cada método em cada evento, para a área circular R-01 com raio de  $0,075^\circ$ , aproximadamente 8,29 km.

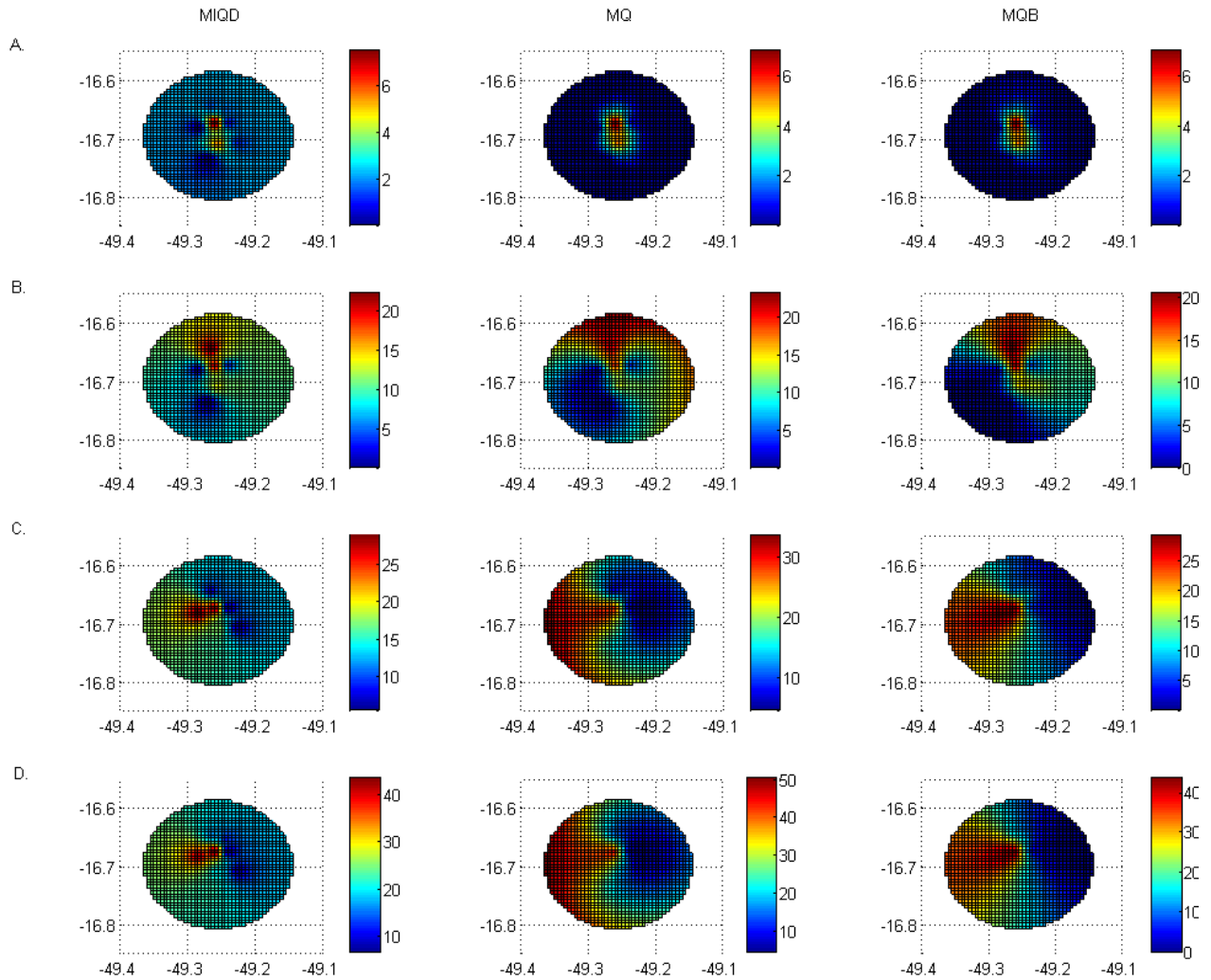


Figura 6 - Superfícies de precipitação (mm) estimadas por cada método em cada evento, para a área circular R-02 com raio de  $0,1125^\circ$ , aproximadamente 12,44 km.

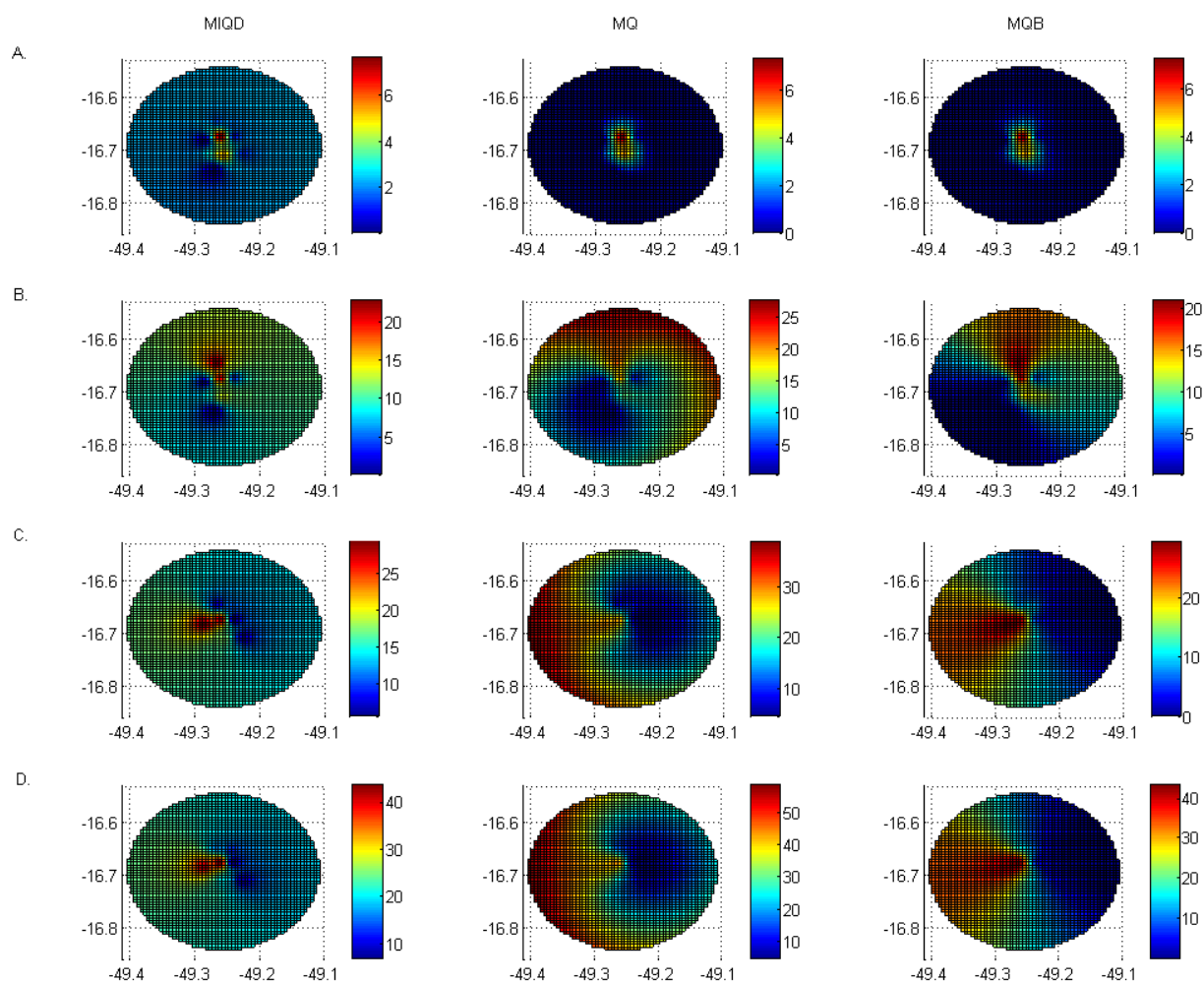


Figura 7 - Superfícies de precipitação (mm) estimadas por cada método em cada evento, para a área circular R-03 com raio de  $0,15^\circ$ , aproximadamente 16,59 km.

Como fica mais claro nos resultados dos eventos B, C e D (Figura 3), o MQB tem um comportamento de convergência inferior ao MIQD, mas que se torna mais expressivo conforme o evento assume maior homogeneidade no tempo, devido ao aumento da duração. Já o MQ não parece ter influência significativa na sua divergência devido a qualquer alteração nas durações consideradas.

Por outro lado, quando se observa os valores na região próxima dos postos, tanto MQ quanto MQB têm resultados quase idênticos, e ainda assim, muito semelhantes aos do MIQD. De forma que para regiões com cobertura satisfatória de postos, os erros de tendência do MQ, atenuados no



MQB, pouco ou nada interferem na qualidade da superfície estimada, ao compará-lo com o MIQD. Ainda, não seria indicado para qualquer método, aplicação em condições de muito afastamento dos dados utilizados, pois apesar da tendência do valor médio presente no MIQD, a validade e aplicabilidade deste valor médio pode ser questionável conforme a variabilidade espacial e temporal considerada. Ou seja, a vantagem de não se ter valores super ou subestimados, não elimina o risco de se trabalhar com resultados amplamente discrepantes em relação as verdadeiras condições locais.

É importante salientar, quem em ambas as etapas deste estudo, os métodos foram testados em condições de eventos extremos, portanto com maior variabilidade espacial e temporal. Como se observa nas figuras acima, a precipitação encontra-se muitas vezes concentrada em uma determinada área, sendo que em casos de pouca disponibilidade espacial de dados, é possível que se perca justamente a região de maior intensidade. Neste sentido, os melhores resultados do MQ na Etapa 1 ressaltam a qualidade do método.

## **5. CONCLUSÕES**

De forma sucinta, o MQ e o MQB demonstraram melhor comportamento de convergência nos resultados relativos à densidade de postos empregada, sobressaindo o MQ. Já para as condições de estabilidade quando do incremento da região de interesse, o MIQD indiscutivelmente teve melhor desempenho, sendo que o MQB aparentemente ganha estabilidade significativa também com o aumento da região de borda, não contemplada por medições, tornando ambos mais confiáveis para extrapolação, desde que em regiões de comportamento sabidamente homogêneo.

Ainda, no caso de eventos extremos, para regiões com cobertura regular nas regiões de borda das bacias, ou seja, sem necessidade de extrapolações consideráveis, o emprego do MQ pode apresentar melhores resultados para a precipitação média, considerando que o mesmo converge para seu resultado ótimo de forma mais expressiva.

Nos casos contrários, o MQB é mais recomendável, considerando a capacidade de suavizar as extrapolações do MQ e o bom comportamento de convergência mesmo com baixa densidade de dados, melhor que o do MIQD.

## **6. AGRADECIMENTOS**

À Finep, pelo apoio financeiro ao projeto Diretrizes Projetuais para Drenagem Urbana no Município de Goiânia, e ao CNPq pelo pagamento da bolsa ao 1º autor.

## BIBLIOGRAFIA

- BALASCIO, C. C. (2001). *"Multiquadric Equations and Optimal Areal Rainfall Estimation"*. Journal of Hydrology Engennering v. 6, n. 6, pp. 498-505.
- BORGA, M.; VIZZACCARO, A. (1997). *"On the interpolation of Hydrologic Variables, Formal Equivalence os Multiquadric Surface Fitting and Kriging"*. Journal of Hydrology 195 , pp. 160-171.
- CARUSO, C.; QUARTA, F. (1998). *"Interpolation Methods Comparison"*. Computer Math. Applic. vol 35, n. 12 , pp. 109-126.
- DIRKS, K. N.; HAY, J. E.; STOW, C. D.; HARRIS, D. (1998). *"High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data"*. Journal of Hydrology pp. 187-193.
- HARDY, R. L. (1971). *"Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces"*. Journal of Geophysical Research v. 76, n. 8, pp. 1905-1915.
- LEE, P. S.; LYNN, P. P.; SHAW, E. M. (1974). *"Comparison of Multiquadric Surfaces for the Estimation of Areal Rainfall"*. Hydrology Sciences Journal v. 19, n. 3, pp. 303-317.
- NICKS, A. D. (1982). *"Space-time Quantification of Rainfall Inputs for Hydrological Transport Models"*. Journal of Hydrology pp. 249-260.
- PEGRAM, G. C.; PEGRAM, G. G. S. (1993). *"Integration of Rainfall via Multiquadric Surfaces Over Polygons"*. Journal of Hydraulic Engineering v. 119, n. 2, pP. 151-163.
- SHAW, E. M.; LYNN, P. P. (1972). *"Areal Rainfall Evaluation Using Two Surface Fitting Techniques"*. Bulletin of the International Association of Hydrological Sciences v. 17, n. 4, pp. 419-433.
- SYED, K. H.; GOODRICH, D. C.; MYERS, D. E.; SOROOSHIAN, S. (2003). *"Spatial Characteristics of Thunderstorm Rainfall Fields and Their Relation to Runoff"*. Journal of Hydrology 271 , pp. 1-21.
- TUCCI, C. E. M. (2004). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. UFRGS/ABRH Porto Alegre-RS, 940 p.
- WEI, T. C.; MCGUINESS, J. L (1973). *"Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation"*. USDA-ARS-NC-8, pp. 1-23.