

AVALIAÇÃO DO MODELO MULTIQUADRIC PARA OBTENÇÃO DO VALOR DA CHUVA MÉDIA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA

Fernando Duarte Barbalho¹, Klebber Teodomiro Martins Formiga² & Lidiane de Fátima Vilela³

RESUMO --- A necessidade de determinar a precipitação real em uma bacia tem impulsionado o desenvolvimento de modelos distribuídos de chuva que forneçam resultados espacializados da precipitação permitindo um melhor estudo da distribuição. Neste contexto, este trabalho vem avaliar uma nova metodologia, o modelo Multiquadric, baseado em funções cônicas, para o cálculo da precipitação média e sua funcionalidade como modelo distribuído. Para tal análise, o método foi comparado a metodologias já conhecidas, o Método dos Quadrados das Distâncias, o Método de Thiessen, o Trend Surface Area e o Método de Thiessen que foram aplicados a uma em uma bacia hidrográfica da região Centro-Oeste. Os resultados demonstram que o Multiquadric atende as expectativas quanto a obtenção de precipitações espacializadas tanto quanto apresenta resultados de chuva média compatíveis com os dos demais métodos, apesar de mostrar uma concepção diferente.

ABSTRACT --- The need to determine real precipitation in a certain watershed has stimulated the development of distributed rain models which give specialized results of precipitation. This allows for a better study of the distribution. In this context, this paper evaluates a new technology, the Multiquadric model, based on conic functions to calculate average precipitation and its functionality as a distributed model. In order to undertake this analysis, the method was compared to already known methodologies: The squared distance method, Thiessen's method and the trend surface area method. Those methods were applied to the hydrographic watershed of the Midwest. The results show that the Multiquadric reaches expectations both in relation to obtaining specialized precipitations and to giving results of average rain compatible with the other methods, despite presenting a different conception.

Palavras-chave: modelos de precipitação, chuva média, precipitação espacializada.

¹ Bolsista de Iniciação Científica CTHidro/FINEP. Aluno do Curso de Engenharia Civil. Escola de Engenharia Civil, Praça Universitária s/n, Setor Universitário Goiânia-GO CEP 74605-220. e-mail: fd.baralho@gmail.com

² Professor Adjunto da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. e-mail: klebber.formiga@gmail.com

³ Mestranda em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Praça Universitária s/n, Setor Universitário, Cep 74605-220, Goiânia-GO, e-mail. e-mail: lidivilela@yahoo.com.br

1 - INTRODUÇÃO

A Hidrologia é uma ciência de grande aplicação em áreas como: agricultura, sistemas de drenagem, sistemas de abastecimento e outras diversas atividades, que necessitem de uma análise quantitativa das diversas fases do ciclo da água, em especial a precipitação.

Um dos parâmetros mais importantes e que serve como base de diversos estudos é a chuva média. Entende-se por chuva média, o volume total precipitado em uma bacia hidrográfica dividido pela área da mesma. Este valor permite avaliar de forma quantitativa e representativa, a precipitação em uma bacia como um todo.

Devido ao custo e à dificuldade, na maioria das situações usuais, de uma medição espacializada da altura de precipitação em uma bacia, o volume total precipitado é um valor estimado com base em observações em pontos internos ou próximos à bacia.

A busca por métodos eficazes e confiáveis na determinação, por meio de precipitações conhecidas em alguns pontos, da altura precipitada em um certo período de tempo em uma região tem levado ao emprego de diversos modelos, tais como: Método de Thiessen (THIESSEN, 1911), Média Aritmética, Método dos Elementos Finitos (HUTCHINSON e WALLEY, 1972), Método do Inverso do Quadrado da Distância - MIQD (WEI & MCGUINNES, 1973), Kriging (BASTIN et al., 1984), Trend Surface Area – TSA (SANDERSON e AHMED, 1979), e Multiquadric (BALASCIO, 2001).

O Multiquadric para determinação da chuva média é um método que está sendo aplicado com bons resultados (BALASCIO, 2001). Este trabalho tem por objetivo avaliar o método por meio de uma aplicação prática em uma bacia da região Centro-Oeste e comparar seus resultados com outros métodos empregados no cálculo da chuva média: o Trend Surface Area (TSA), Inverso do Quadrado da Distância (MIQD), e Thiessen.

2 - MÉTODOS DE CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA

Como citado anteriormente, serão utilizados quatro métodos para a determinação da chuva média na bacia: Multiquadric, TSA e MIQD que são descritos a seguir além do método de Thiessen.

2.1 - Multiquadric

O método multiquadric consiste na determinação dos coeficientes de ponderação que serão utilizados na interpolação dos dados reais medidos nos postos pluviométricos, partindo da premissa que a superfície total precipitada pode ser resultante de diversas superfícies quadricas ou funções de kernel, cada uma com origem em um ponto onde se conhece o valor de $f(x, y)$. Ajustando uma

superfície que passe por todos os pontos conhecidos podemos encontrar os coeficientes de cada posto pluviométrico para a determinação da precipitação em qualquer ponto. Essas superfícies individuais podem ser de natureza parabólica (Eq 1) ou hiperbólica (Eq 2):

$$z(x, y) = \sum_j^N c_j [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2] \quad (1)$$

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

Neste trabalho, optou-se pelo uso de hiperbolóides circulares com $a^2 = 0$, que descrevem uma superfície cônica. Dessa forma o ajuste da superfície supracitada se dá pelo ajuste de diversos cones, cada um com origem em um determinado posto com altura de precipitação local nula.

Analisando um caso simples de apenas um cone (Figura 1), verifica-se que abaixo do mesmo a altura precipitada em cada ponto é dada pela altura do ponto da superfície cônica que está logo acima do mesmo. Para a determinação deste cone, calibra-se com outros pontos com altura de precipitação conhecida, de forma que sua superfície coincida com a nova altura conhecida situada a uma distância também conhecida. Os parâmetros de um cone independe da precipitação medida em sua origem, portanto a altura precipitada na origem seria nula. Assim, para a determinação da chuva média pelo método multiquadric são necessários no mínimo dois postos, uma vez que a utilização de apenas um posto implicará em uma situação de apenas um cone que não terá como ser ajustado.

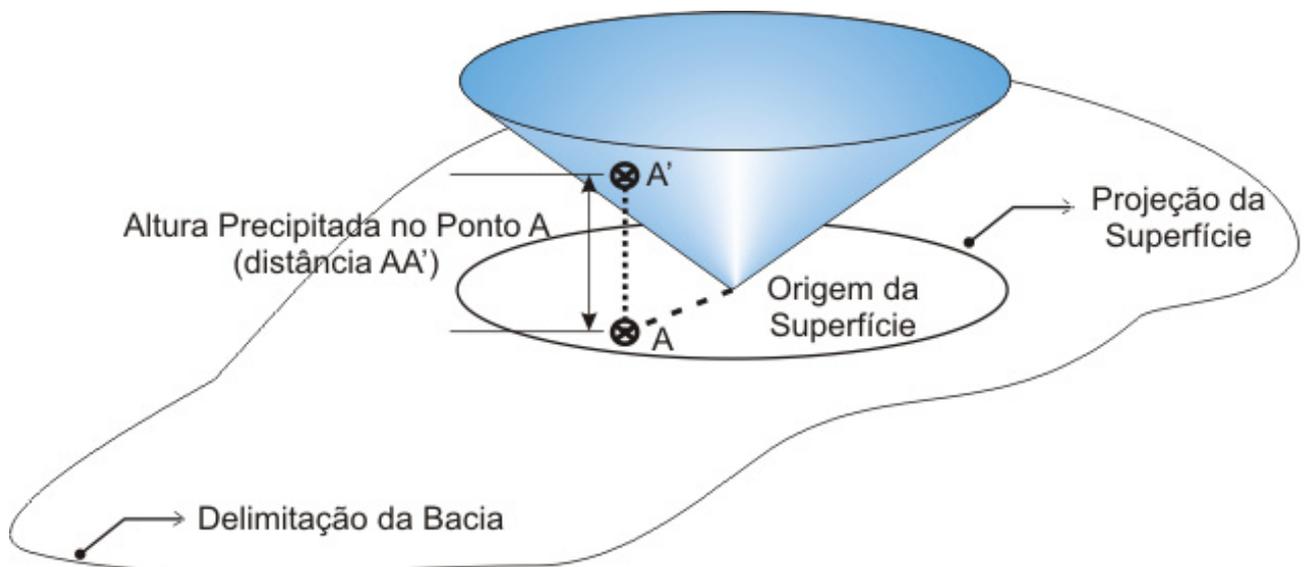


FIGURA 1 – Representação esquemática de uma superfície cônica simples de precipitação.

Ao utilizar dois ou mais postos, cada cone será calibrado tendo em vista os dados conhecidos nos demais postos, porém a altura precipitada em qualquer ponto da bacia não será mais a altura entre o ponto e a superfície de um cone e sim a distancia vertical entre o mesmo ponto e uma nova superfície, que se aproxima da superfície precipitada, formada pela superposição de todas as

superfícies cônicas encontradas, que podem ser individualmente côncavas para cima ou para baixo, conforme o melhor ajuste. Deve-se salientar que as precipitações devem ser consideradas nulas quando a superfície tem valores nulos ou negativos de altura. Desta maneira a precipitação em um ponto qualquer é influenciada por todas as medidas conhecidas (Figura 2). Este procedimento, evita um enviezamento do cálculo permitindo uma melhor estimativa da chuva em diferentes pontos.

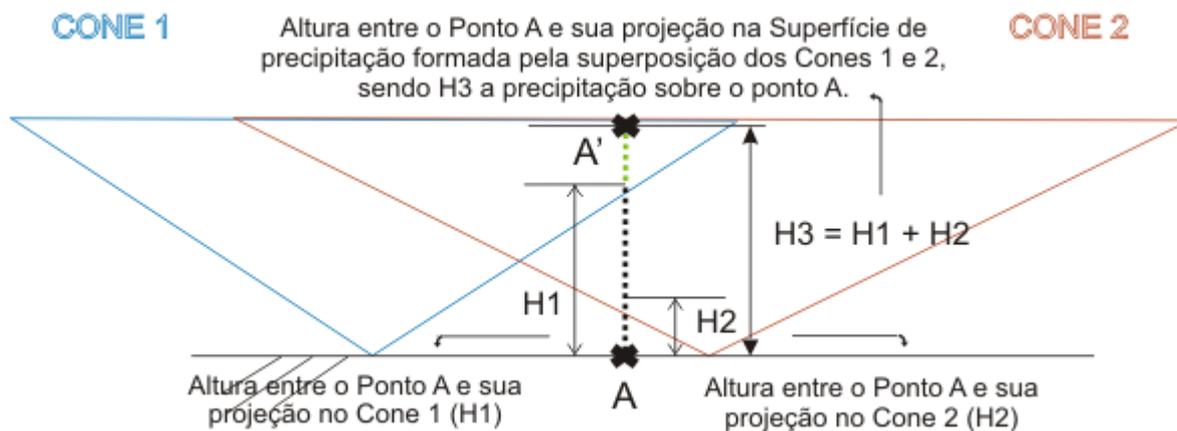


FIGURA 2 – Representação esquemática do efeito da superposição de cones para formação da superfície total de precipitação.

A calibração de cada cone depende de todos os demais pontos medidos, o que faz necessário a resolução de um sistema de equações. No caso do uso de um número de cones igual ao número de postos de medição resultando em um sistema com uma única solução em que se encontra os coeficientes da equação de cada cone, no caso a inclinação c . Para o uso de mais pontos com medição conhecida do que o número de cones a ser gerado haverá um sistema com infinitas soluções que pode ser resolvido, por exemplo, pelo método dos mínimos quadrados.

Tendo todos estes aspectos em vista, o método multiquadric foi implementado da seguinte maneira: seja $f(x, y)$ a altura precipitada em cada ponto (x, y) de uma bacia hidrográfica definida pela região \mathbf{R} com uma área superficial a , a função $f(x, y)$ é considerada uma variável aleatória para qualquer ponto da região \mathbf{R} . Os valores de $f(x, y)$ estão correlacionados para pontos vizinhos e a função $f(x, y)$ representa uma superfície contínua e aleatória. Desta maneira, a altura média de precipitação P sobre a região \mathbf{R} é dada por:

$$P = \frac{1}{a} \int \int_r f(x, y) dx dy , \quad (3)$$

$$\text{onde } a = \int \int_r dx dy \quad (4)$$

Como visto a função $f(x, y)$ só é conhecida em alguns pontos, onde existe a coleta de dados por pluviômetros. Para se determinar a altura precipitada nos demais pontos da bacia e assim encontrar o valor da precipitação média é necessária a interpolação dos valores conhecidos.

Sendo x e y conhecidos para todos os postos, ajustar a superfície que passa por estes pontos envolve a determinação dos N coeficientes c (equação do hiperbolóide). Arranjando de forma conveniente estes coeficientes com um vetor $c = (c_1, \dots, c_N)$ e sendo z o vetor com os valores observados nos N postos, monta-se a matriz $D = \{d_{ij}\}$ ($N \times N$) de funções de kernel avaliadas nos postos:

$$d_{ij} = c_j [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2} \quad (5)$$

Desta maneira se pode encontrar os valores dos coeficientes c pela solução do sistema:

$$D\mathbf{c} = \mathbf{z}, \text{ que implica em } \mathbf{c} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{z}. \quad (6)$$

O método foi implementado em plataforma MATLAB. O programa criado lê os dados diários de precipitação para os N postos observados e define a precipitação mensal para os mesmos, com estes dados são determinados os coeficientes do sistema. Após a determinação destes para cada mês em particular é feita a interpolação para determinação da precipitação em cada ponto da bacia, de acordo com uma discretização escolhida.

2.2 - Trend Surface Analysis - TSA

Tal modelo foi proposto por Kruizinga e Yperlaan (1978) e consiste de um interpolador linear, em que uma função f hipotética é empregada para ajustar às precipitações observadas. Consiste em um dos modelos distribuídos mais empregados no cálculo da chuva média em uma bacia (Singh, 1988). Considerando uma forma numérica para (3) dada da seguinte maneira:

$$P = \sum_{i=1}^n a_i p_i \quad (7)$$

em que n é o número de estações, e a_i é o peso associado à estação i , devendo atender às seguintes restrições:

$$a = \sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (8)$$

e

$$0 \leq a_i < 1 \quad i=1, 2, 3, \dots, n$$

Seja p o valor da precipitação em um determinado ponto da bacia, que pode ser expresso por:

$$p = \sum_{i=1}^n a_i f_i \quad (9)$$

em que a_i são os coeficientes a serem determinados, f_i , são os valores da função hipotética em algum ponto do espaço.

Pode-se ter uma aproximação polinomial para f , freqüentemente empregada para equação (7), obtida por:

$$p(x, y) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{1i} x^i + \sum_{i=1}^n a_{2i} y^i + \sum_{i=1}^n a_{3i} x^i y^{n-i} \quad (10)$$

onde a_0 , a_1 , a_2 e a_3 coeficientes do polinômio de ordem n ; e x e y as coordenadas do ponto em relação a um referencial comum qualquer.

Considerando que o comportamento da função é linear pode-se escrever:

$$p(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (11)$$

Por sua facilidade de implementação, bem como por apresentar mais estabilidade numérica, quando comparada com polinômios de ordem superior, será empregada a forma simplificada (equação 11) neste trabalho. Comparando a equação (11) com a equação (7) pode-se determinar os valores dos coeficientes a_0 , a_1 e a_2 , empregando a minimização do erro absoluto, ou seja:

$$\min_A e = \sum_{i=1}^m |P_i - p_i| \quad (12)$$

em que m é o número de postos de observação e A é o vetor dos coeficientes.

Resolvendo a derivada da equação com respeito ao vetor A , e igualando os coeficientes à zero, obtêm-se as seguintes expressões:

$$\sum_{i=1}^m [P_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i)] = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m [P_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i)] x_i = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m [P_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i)] y_i = 0 \quad (15)$$

Desenvolvendo as equações, e aplicando algumas manipulações matemáticas, obtêm-se o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} m & z_1 & z_2 \\ z_1 & z_3 & z_5 \\ z_2 & z_5 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_6 \\ z_7 \\ z_8 \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde:

$$z_1 = \sum_{i=1}^m x_i \quad (17)$$

$$z_2 = \sum_{i=1}^m y_i \quad (18)$$

$$z_3 = \sum_{i=1}^m x_i^2 \quad (19)$$

$$z_4 = \sum_{i=1}^m y_i^2 \quad (20)$$

$$z_5 = \sum_{i=1}^m x_i y_i \quad (21)$$

$$z_6 = \sum_{i=1}^m P_i \quad (22)$$

$$z_7 = \sum_{i=1}^m x_i P_i \quad (23)$$

$$z_8 = \sum_{i=1}^m y_i P_i$$

Analisando, pode-se verificar com base em (16) que a matriz dos coeficientes é constante, dependendo apenas dos postos empregados, pois, ao se tratar com a determinação a média da precipitação de vários eventos, considerando que não haverá alteração nos postos de medição, não haverá alteração da localização dos mesmos.

A fatoração LU é uma técnica de solução de sistemas de equações lineares que considera essa característica. Sendo assim, dado um sistema:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (24)$$

Encontra-se duas matrizes \mathbf{L} e \mathbf{U} , em que \mathbf{L} é uma matriz triangular inferior e \mathbf{U} é uma matriz triangular superior de modo que:

$$(\mathbf{LU})\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (25)$$

Com isto o sistema (24) pode ser resolvido com dois passos:

$$\mathbf{Ly} = \mathbf{b} \quad (26)$$

e

$$\mathbf{Ux} = \mathbf{y} \quad (27)$$

2.3 - Método do Inverso Quadrado da Distância

Wei e McGuinness (1973) propuseram o Método do Inverso do Quadrado da Distância para determinação da chuva. 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.

Para o cálculo da precipitação por este método 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:

$$p(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \quad (28)$$

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

Como na maioria dos casos os postos pluviométricos estão localizados em locais fixos, que não sofrem mudanças durante anos, a expressão (12) pode ser escrita como:

$$p(x,y) = \sum_{i=1}^n w_i p_i$$

sendo:

$$w_i = \frac{\frac{1}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \quad (29)$$

3 - ÁREA DE ESTUDO

Para a avaliação dos métodos apresentados, foi escolhido como área de aplicação a bacia de contribuição da Rochedo, pertencente à CELG. Esta Bacia está situada no estado de Goiás, possui uma região de 6156,6 Km² e tem o comprimento do rio principal igual a 250,1 km.

No estudo foram considerados vinte e um postos pluviométricos próximos à bacia, sendo que seus dados foram extraídos do sitio Hidroweb da Agencia Nacional das Águas (ANA). A série analisada compreende trinta e um anos hidrológicos, de setembro de 1973 até agosto de 2004. Foram utilizados 21 postos (TABELA 1) que têm sua localização apresentados na Figura 3.



Figura 3 - Localização dos postos pluviométricos na região da bacia hidrográfica da UHE de Rochedo

Tabela 1 – Dados de Latitude e Longitude dos Postos pluviométricos utilizados na análise.

Postos	Longitude	Latitude
PIRENÓPOLIS	-48.95	-15.85
JARAGUÁ	-49.33	-15.72
ITABERAÍ	-49.80	-16.03
PONTE ANÁPOLIS - BRASÍLIA	-48.51	-16.08
VIANÓPOLIS	-48.52	-16.75
ANICUNS	-49.94	-16.47
ARAGOIÂNIA	-49.45	-16.91
GOIANÁPOLIS	-49.02	-16.52
INHUMAS	-49.49	-16.35
OURO VERDE DE GOIÁS	-49.14	-16.23
PALMEIRAS DE GOIÁS	-49.93	-16.80
TRINDADE	-49.49	-16.66
TURVÂNIA	-50.13	-16.61
CRISTIANÓPOLIS	-48.71	-17.19
PIRES DO RIO I	-48.27	-17.30
EDÉIA (ALEGRETE)	-49.93	-17.34
FAZENDA BOA VISTA	-49.69	-17.11
JOVIÂNIA	-49.62	-17.81
MORRINHOS	-49.12	-17.73
PONTALINA	-49.44	-17.52
PIRACANJUBA	-49.03	-17.31

Os dados obtidos da ANA são listados diariamente, sendo que para o estudo presente foram utilizados os totais mensais de cada posto para reconstituição dos totais anuais, que consistem no resultado para avaliação. Abaixo seguem todos os postos utilizados com suas respectivas precipitações anuais (TABELA 2), obtidas pela soma das precipitações mensais obtidas.

Tabela 2 – Dados da precipitação anual de cada posto durante o período estudado.

ANO HIDROLÓGICO	Precipitação Anual (mm)					
	PIRENÓPOLIS	JARAGUÁ	ITABERAÍ	PONTE ANÁPOLIS - BRASÍLIA	VIANÓPOLIS	ANICUNS
1973	1701,47	1678,30	1480,10	1390,60	2021,60	1248,30
1974	1326,70	1215,40	1284,80	1151,70	1247,40	1055,60
1975	1335,20	1513,70	1313,00	1441,70	1341,00	1115,30
1976	1576,40	1765,50	1999,10	1498,80	1717,30	1765,30
1977	1567,50	1954,10	1510,00	1433,40	1532,00	1691,90
1978	1630,20	2020,90	1668,80	1669,00	1212,20	1577,80
1979	2122,20	1855,70	2125,37	1630,40	2201,60	1505,60
1980	1773,30	1446,60	1677,00	1629,40	2400,60	1268,90
1981	1904,60	2534,80	1814,40	1941,60	2733,80	1739,40
1982	2118,00	2189,50	1862,00	1893,70	3134,00	1720,30
1983	1613,00	1610,40	1800,80	1374,70	2084,80	1992,36
1984	1810,70	1916,00	1989,20	1238,60	1780,30	1638,00
1985	1721,10	1501,90	1459,00	1205,20	1634,30	1265,28
1986	1531,90	1386,30	1779,50	1411,00	1431,60	1051,80
1987	2088,11	2115,10	1930,79	1767,30	2003,20	1016,33
1988	970,40	1699,70	1388,20	1638,60	1726,02	821,35
1989	782,60	1945,60	1921,20	1115,40	2378,00	1114,67
1990	705,10	1585,10	1787,10	1190,10	1404,80	1191,25
1991	1800,80	1830,20	2255,60	1916,90	1657,83	1637,69
1992	2270,80	1870,30	2394,20	1885,80	2034,00	1531,02
1993	1588,20	1660,20	3000,00	1824,80	1791,30	1377,30
1994	1495,70	1803,10	2771,30	1401,90	1500,30	1178,08
1995	1687,60	1686,30	1787,30	1244,70	1186,70	1589,00
1996	1798,50	1791,80	2249,70	1557,40	1863,50	1860,25
1997	865,53	1171,00	1204,90	981,70	1153,30	1111,64
1998	1322,15	1508,00	1234,50	962,80	1456,60	1506,50
1999	1637,25	1552,00	2155,90	1464,50	1301,80	2355,84
2000	1649,00	1328,70	1612,20	1904,50	1409,90	1519,51
2001	1420,80	1648,00	1604,50	1538,90	1539,10	1374,80
2002	1684,60	1742,50	1619,40	1462,70	1299,40	1124,00
2003	1688,80	1784,40	1886,00	1359,70	1981,70	1353,00

Tabela 2 – Dados da precipitação anual de cada posto durante o período estudado (continuação).

ANO HIDROLÓGICO	Precipitação Anual (mm)					
	ARAGOIÂNIA	GOIANÁPOLIS	INHUMAS	OURO VERDE	PALMEIRAS	TRINDADE
				DE GOIÁS	DE GOIÁS	
1973	1863,90	2471,80	1641,30	1624,45	1752,41	1530,10
1974	1305,60	1403,90	1245,50	1398,30	1007,30	1276,90
1975	1290,10	1360,00	1249,09	1463,50	1261,10	1214,40
1976	1713,00	1912,00	1553,90	1773,30	1941,90	1707,60
1977	1536,60	1313,00	1518,20	1593,80	1686,40	1617,00
1978	1690,40	1985,40	1528,10	2191,60	1273,60	1710,00
1979	1617,90	1733,10	1723,30	1939,70	1427,70	1539,30
1980	1439,60	1275,80	1293,80	1275,50	1134,90	1637,50
1981	1992,00	2407,00	1681,90	2000,40	2551,30	2113,80
1982	1643,70	1502,30	1583,70	1981,60	1526,80	1685,20
1983	1399,30	1635,80	994,90	1572,60	1667,10	1668,70
1984	1584,20	1508,50	1344,50	1673,10	1542,10	1789,70
1985	1814,00	1207,90	1275,30	1419,80	1735,50	1582,10
1986	1397,90	1475,90	1323,30	1420,20	1303,89	1512,90
1987	1629,00	1939,30	1790,50	2173,49	236,90	1822,30
1988	1484,50	1309,20	1177,11	1318,10	951,00	1366,70
1989	1402,90	59,90	1682,40	1591,80	354,80	1769,20
1990	1397,80	411,20	1151,54	1716,20	245,68	1376,10
1991	1540,50	1773,67	1519,37	1764,60	997,02	1862,57
1992	1854,40	1487,10	792,40	1666,28	585,40	1512,50
1993	1686,10	1604,66	1222,36	1913,40	1164,10	2074,00
1994	1299,80	1419,70	1130,20	1501,80	1609,60	1408,20
1995	1409,70	1018,80	477,80	1494,80	1152,10	1397,00
1996	1898,79	1711,40	816,90	1584,25	1867,66	1798,84
1997	1438,20	1329,80	416,30	1303,70	1386,00	1316,70
1998	1467,40	1089,60	1079,20	1470,70	1253,09	968,30
1999	1575,90	1656,17	1441,66	1595,72	1807,70	1641,40
2000	1640,60	1596,50	1625,30	1816,80	1299,20	1343,94
2001	1536,00	1573,20	1435,49	1642,60	1379,20	1450,30
2002	1471,10	1550,50	1141,05	1640,50	970,50	1386,10
2003	1240,80	1726,00	1050,60	1788,43	1338,28	1638,26

Tabela 2 – Dados da precipitação anual de cada posto durante o período estudado (continuação).

ANO HIDROLÓGICO	Precipitação Anual (mm)					
	TURVÂNIA	CRISTIANÓPOLIS	PIRES DO RIO I	EDÉIA (ALEGRETE)	FAZENDA BOA VISTA	JOVIÂNIA
1973	1823,30	1467,85	1907,36	1188,10	1608,50	1991,30
1974	1260,20	1242,40	1489,77	1220,90	1190,40	1478,90
1975	1047,80	1260,00	1609,79	1245,50	1244,30	1347,60
1976	1576,40	1344,50	1701,57	1738,50	1524,40	1812,90
1977	1498,30	1443,50	1493,10	1255,60	1276,90	1603,80
1978	1329,80	1407,00	1764,90	1505,70	1313,70	2043,20
1979	1628,20	1640,70	1970,00	1403,20	1604,60	1627,30
1980	1000,20	1205,10	1397,50	1390,70	1412,10	1540,10
1981	2414,60	1671,40	1900,60	2560,60	1935,50	1646,30
1982	2020,90	1298,00	1817,83	1926,70	1635,58	1773,60
1983	1774,00	1317,60	1300,54	1535,40	1408,70	1280,40
1984	1547,60	1237,40	1287,71	1249,40	1618,20	1749,40
1985	1388,80	1201,50	1374,50	776,10	1592,50	1491,70
1986	1423,00	1308,40	1464,20	1192,10	1335,40	1645,90
1987	1651,20	1488,40	1779,70	1193,00	1413,80	1724,90
1988	1381,60	938,95	1615,00	925,50	1690,50	1401,30
1989	1784,00	582,00	1557,20	1494,40	1407,60	1055,87
1990	1260,60	998,36	1340,71	1040,91	1441,16	1570,50
1991	1553,60	1044,70	1440,33	1162,00	1367,90	1592,80
1992	1776,60	1897,60	1614,90	1287,50	1303,50	1459,10
1993	1589,50	1789,40	1793,40	1913,50	1836,40	1639,80
1994	1370,08	1328,60	1111,90	1071,70	1688,10	1223,10
1995	1426,40	1196,80	1326,10	1226,60	1370,70	1452,90
1996	1934,39	1494,40	1845,48	1691,99	1738,59	1854,48
1997	1069,90	1336,40	1205,40	1235,50	1385,10	1510,67
1998	1226,60	1527,40	1363,70	1374,60	1342,76	1158,00
1999	1387,71	1791,30	1665,80	1105,48	1427,94	1249,00
2000	1482,80	1477,00	1494,80	1275,00	1443,60	1251,30
2001	1372,40	1555,00	1662,52	1340,30	1328,00	1477,30
2002	1249,40	1347,50	1431,55	1435,20	1365,10	1281,81
2003	1504,00	1860,60	2086,35	1639,01	1724,70	1597,52

Tabela 2 – Dados da precipitação anual de cada posto durante o período estudado (continuação).

ANO HIDROLÓGICO	Precipitação Anual (mm)		
	MORRINHOS	PONTALINA	PIRACANJUBA
1973	1460,40	1735,20	1321,50
1974	1149,70	1046,70	1112,30
1975	1122,50	735,70	1227,60
1976	1750,00	1773,10	1768,70
1977	1460,20	1416,80	1655,90
1978	1807,60	1367,40	1714,00
1979	1559,10	1503,20	2351,41
1980	1263,20	1492,00	2050,12
1981	2010,00	2004,40	3307,80
1982	2041,10	1575,60	3704,80
1983	1343,70	1774,60	3495,40
1984	1589,70	1322,40	3165,60
1985	1405,43	1369,40	2319,00
1986	1538,30	1466,00	1989,10
1987	1630,00	1497,10	3171,60
1988	1697,50	1295,19	2464,40
1989	1495,20	1414,80	2707,10
1990	1360,19	1180,00	2662,80
1991	1610,51	1226,20	3069,00
1992	1719,42	1607,80	2347,68
1993	1690,95	1590,70	2257,33
1994	1445,69	1150,30	1914,80
1995	1255,76	1292,90	1474,80
1996	1629,42	1927,60	2269,31
1997	1285,10	1675,30	1647,90
1998	1370,39	1082,60	1432,30
1999	1446,72	1493,41	2159,50
2000	1210,87	1345,40	1759,80
2001	1313,76	1466,30	1698,70
2002	1298,42	1147,70	1581,70
2003	1871,87	1330,50	1833,50

4 - RESULTADOS

Os métodos acima listados e o Método de Thiessen foram aplicados a área de estudo de forma a se obter a precipitação média da bacia em cada ano hidrológico listado. Essa simulação, que depende da espacialização da chuva, utilizou uma discretização da bacia igual a três minutos 3' (aproximadamente 5 km). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. Para análise geral, seguem as superfícies geradas por cada método para a média da precipitação média anual obtida (Figura 4)

Tabela 3 – Precipitação média anual na Bacia de contribuição do Reservatório de Rochedo obtida por diversos métodos

Precipitação Anual Média (mm)						
Ano	TSA	MIQD	THISSEN	Multiquadric	Média Comparativa	Diferença
1973	1670,49	1661,68	1662,54	1837,79	1664,90	172,88
1974	1248,58	1246,69	1295,88	1284,56	1263,72	20,84
1975	1283,66	1280,27	1352,61	1284,45	1305,51	-21,06
1976	1703,95	1709,35	1716,29	1733,14	1709,86	23,28
1977	1524,53	1528,10	1529,04	1484,96	1527,22	-42,26
1978	1644,62	1643,87	1718,24	1760,99	1668,91	92,08
1979	1763,89	1754,12	1775,44	1821,59	1764,48	57,11
1980	1493,62	1481,30	1478,60	1497,04	1484,51	12,53
1981	2137,52	2131,72	2059,65	2265,69	2109,63	156,07
1982	1954,27	1943,66	1946,85	1971,54	1948,26	23,28
1983	1649,97	1641,81	1516,92	1786,09	1602,90	183,19
1984	1645,11	1641,88	1580,10	1772,87	1622,36	150,51
1985	1467,27	1457,58	1380,03	1519,76	1434,96	84,80
1986	1452,77	1450,11	1488,75	1500,64	1463,87	36,76
1987	1747,77	1723,55	1763,30	2063,67	1744,87	318,80
1988	1411,62	1399,19	1461,65	1475,25	1424,15	51,09
1989	1412,78	1414,69	1470,88	1327,19	1432,78	-105,59
1990	1292,12	1290,59	1355,00	1287,96	1312,57	-24,61
1991	1657,20	1650,43	1685,54	1862,52	1664,39	198,13
1992	1682,82	1676,50	1770,35	1635,95	1709,89	-73,94
1993	1765,61	1766,98	1860,23	1763,64	1797,61	-33,97
1994	1460,61	1468,82	1499,77	1453,00	1476,40	-23,40
1995	1335,28	1348,47	1417,23	1157,98	1366,99	-209,02
1996	1765,86	1774,38	1814,94	1668,36	1785,06	-116,71
1997	1239,40	1235,96	1200,06	1242,88	1225,14	17,74
1998	1297,10	1295,94	1266,62	1238,23	1286,56	-48,33
1999	1611,69	1609,06	1541,11	1664,35	1587,29	77,06
2000	1506,73	1497,45	1487,11	1609,37	1497,10	112,27
2001	1501,29	1495,42	1513,14	1553,22	1503,28	49,94
2002	1399,84	1396,60	1441,57	1454,01	1412,67	41,34
2003	1649,29	1643,63	1715,18	1584,77	1669,36	-84,60
Média	1560,56	1556,77	1573,05	1598,82	1563,46	35,36
Desvio Padrão	209,75	208,13	205,12	260,87	205,97	-----

A coluna descrita como Média Comparativa, indica a média entre os métodos TSA, MIQD, e Thiessen e a coluna Diferença apresenta a diferença entre esta média e o método avaliado, Multiquadric.

4.1 - Discussão

Pode-se observar que o método apresentado, Multiquadric, traz resultados próximos dos demais métodos com uma variação média.

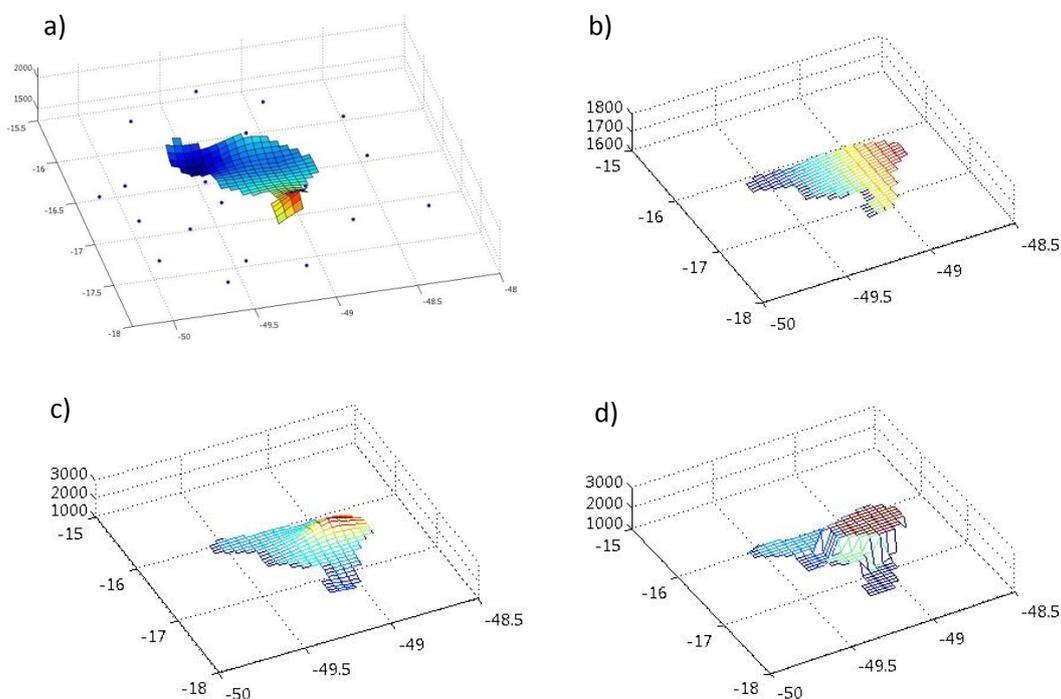


Figura 4 - Superfície média da precipitação anual sobre a bacia, a) Multiquadric, b) TSA, c) MIQD, d) Thiessen.

Observa-se que há uma semelhança maior entre a superfície formada pelo Multiquadric com a superfície formada pelo MIQD, devido a este ser o único método de comparação que gera superfícies curvas, ou seja, ambos são métodos que representam a precipitação de forma mais sinuosa, com resultados ponto a ponto de forma não linear. É interessante verificar que apesar de ambos os métodos terem esta característica, eles funcionam de forma muito diferente. O Multiquadric determina a precipitação em um ponto assim como o MIQD através de uma avaliação

dos postos ao redor e seus pesos, no entanto para o Multiquadric a determinação do peso de cada posto se dá sem avaliar a precipitação do mesmo e sim a dos demais, assim sendo no Multiquadric a precipitação em um ponto recebe interferência de todos os postos de modo mais equilibrado. Já o MIQD determina os pesos conforme a proximidade, ou seja, a precipitação em um ponto é mais influenciada pelo posto de medição mais próximo. Outra diferença entre estes métodos é que apesar de que na região interna dos postos, ambos os métodos terem comportamento semelhante na formação da superfície, no exterior desta, o MIQD apresenta uma superfície que se aproxima da média dos postos enquanto que o Multiquadric continua apresentando valores variados.

No caso do TSA, pode-se verificar que há uma grande diferença de funcionamento dos métodos. Apesar de ambos apresentarem resultados espacializados, o TSA faz um ajuste de um plano, o que pode acarretar resultados bem diferentes em uma análise espacializada dos resultados quando comparado ao Multiquadric que faz um ajuste de superfície ondulada.

Apesar das diferenças de funcionamento, todos os métodos apresentam uma elevação de sua superfície praticamente na mesma região o que indica um comportamento semelhante entre os mesmos para a região analisada, que é esperado para justificação do uso dos mesmos. Embora os resultados da média sejam semelhantes, verifica-se que o Multiquadric apresenta valores, geralmente, superiores aos outros métodos empregados. Tal diferença decorre de sua composição matemática. Nota-se que pela sua formulação, a sobreposição dos cones oriundos de cada posto pode muitas vezes superestimar o valor precipitado em áreas afastadas de postos, onde a precipitação é totalmente desconhecida.

Com isto o modelo mostra-se bem sensível a distribuição dos postos, visto que o ajuste de sua superfície é muito influenciado pelo ajuste de cada cone, podendo ser menos adequado nas regiões onde não se apresenta postos e assim apresentar resultados superestimados ou subestimados.

Para avaliar este comportamento, fez-se a análise do ano de maior diferenciação entre os modelos conhecidos e o Multiquadric, 1987. Neste ano a diferença atingiu um valor muito elevado de 317 mm. Observa-se primeiro a diferença nas superfícies geradas sobre a bacia por cada método (Figura 5).

Nesta análise observa-se que há uma diferença significativa de resultados, pois apesar do método Multiquadric assumir valores tão elevados quanto os demais métodos para a região do exutório, na região mais ao norte da, a superfície de precipitação gerada apresenta uma elevação considerável em relação aos demais, na ordem de 400 mm, justamente a região em que há uma escassez de postos. Isto pode ter gerado um mau ajuste de superfície tanto para o método Multiquadric, como também para os demais, ou seja, não se pode determinar qual dos métodos tem o melhor comportamento.

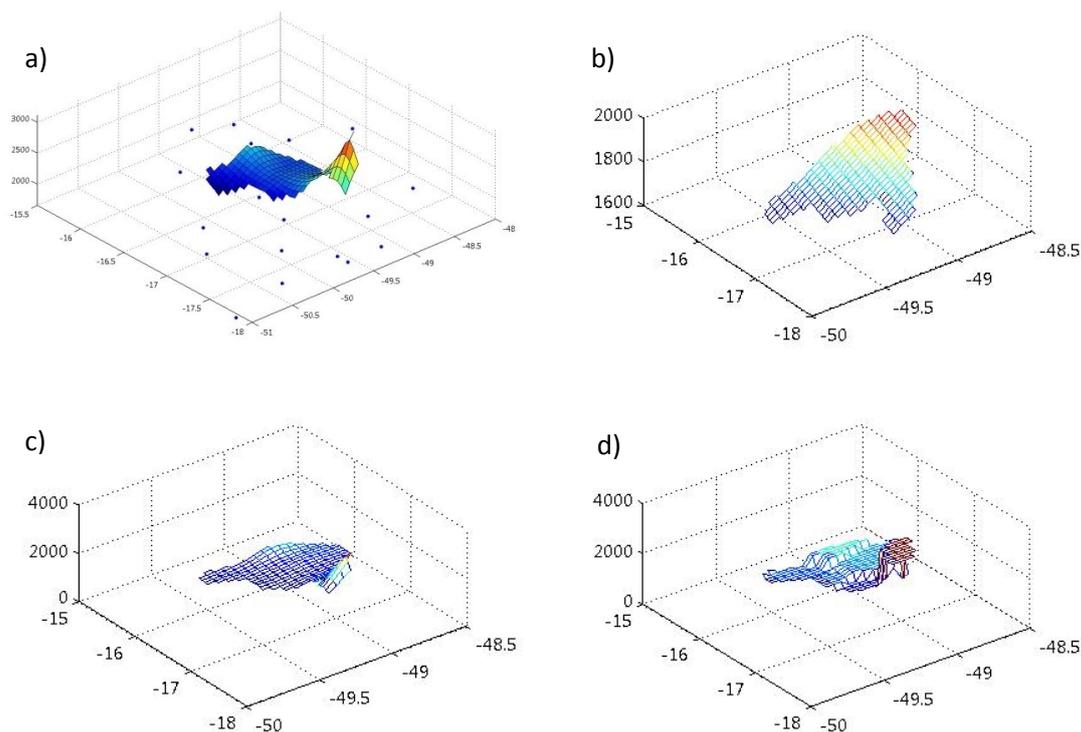


Figura 5 - Superfície da precipitação anual sobre a bacia no ano de 1987, a) Multiquadric, b) TSA, c) MIQD, d) Thiessen.

É de se esperar que a diferença entre as diversas superfícies geradas esteja mais acentuada justamente nas regiões onde a densidade de postos pluviométricos é menor. A Figura apresenta a visualização das superfícies geradas pelos métodos empregados. Todos apresentam um comportamento semelhante nas regiões onde se apresentam mais estações, principalmente o MIQD e o Multiquadric, devido ambos terem ajustes mais complexos de forma.

Apesar disto, a grande maioria dos anos analisados a proximidade entre os métodos foi boa e sinaliza positivamente para aplicação deste modelo. Além disso, uma grande vantagem proporcionada pelo o método é a possibilidade de obtenção da precipitação ponto a ponto.

Um bom exemplo de aplicação da propriedade acima citada é a possibilidade da implementação de métodos distribuídos em casos de tratamento de dados que se torna reforçada pela proximidade de resultados espacializados entre este modelo e os demais empregados, ou seja, devido sua compatibilidade para análise da precipitação de forma geral.

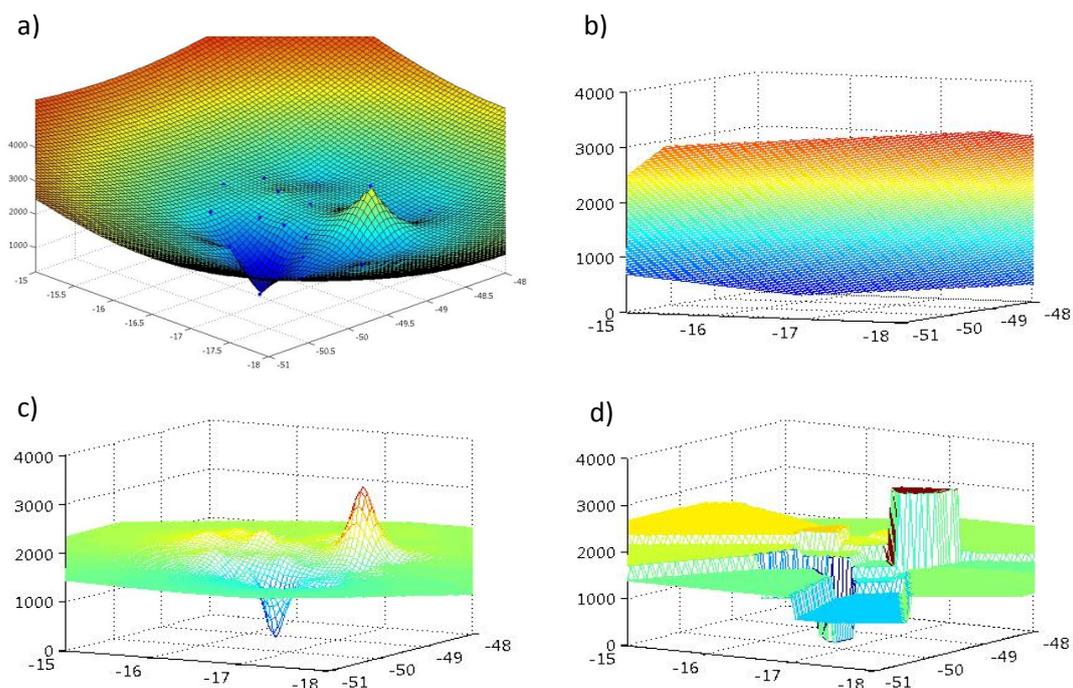


Figura 6 - Superfície da precipitação anual sobre a bacia e entorno no ano de 1987, a) Multiquadric, b) TSA, c) MIQD, d) Thiessen.

5 - CONCLUSÕES

O método Multiquadric mostrou-se um modelo de boa aplicação no caso da determinação da precipitação média em uma bacia. O modelo implementado apresenta pouco maior complexidade de programação, porém com um tempo de processamento equivalente aos demais métodos e a vantagem de possibilitar análises de precipitação ponto a ponto.

Tal modelo, no entanto, necessita de seleção criteriosa das estações pluviométricas a se utilizar tendo em vista a necessidade de reduzir a heterogeneidade de distribuição dos postos e principalmente evitar a presença de regiões de vazios. Mesmo em uma distribuição desfavorável, os resultados apresentados pouco se diferenciaram para os demais métodos.

Apesar do método ter suas particularidades matemáticas advindas do próprio modelo que devem ser analisadas, que não faz parte do objetivo deste trabalho, o uso de uma quantidade maior de equações para calibração dos cones, caso citado anteriormente, pode corroborar para melhores estimativas.

O modelo estudado apresenta-se plenamente viável à aplicação em casos práticos de análises de bacias hidrográficas quando se têm boa distribuição de dados disponíveis. Assim como também se pode verificar que o modelo se mostra eficaz na análise espacial da precipitação. No entanto

necessita-se de maiores estudos de modo a definir uma distribuição de postos de forma que os resultados obtidos sejam confiáveis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio da FINEP/CTHIDRO que subsidiou os bolsa de iniciação científica ao primeiro autor e propiciou auxílio financeiro para a execução da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTIN, G., LORENT, B, DUQUE, C. e GEVERS, M., 1984. *Optimal estimation of the average rainfall and optimal selection of rain gauge locations*. Water Resources Research, Vol. 20, No. 4, pp. 463-470.
- BALASCIO, C (2001) *Multiquadric Equations and Optimal Areal Rainfall Estimation*. Journal Hydrologic Engineering. Vol. 6, No. 6, pp. 498-505.
- HUTCHINSON, P. e WALLEY, W. J. (1972) *Calculation of areal rainfall using finite element techniques with altitudinal corrections*. International Association of Hydrological Sciences Bulletin Vol. 17 No. 3 pp. 259-72.
- KRUIZINGA, S e YPERLANN, J. (1978) *Spatial interpolation of daily totals of rainfall*. Journal of Hydrology, Vol. 36, pp 65-73.
- SANDERSON, M. e R. AHMED (1979) *Pre-monsoon rainfall and its variability in Bangladesh: a trend surface analysis*. Hydrological Sciences Bulletin, Vol. 24, No. 3, pp. 277-87.
- SINGH, V. P. (1988) *Hydrologic Systems - Watershed Modeling*. Volume II. Prentice Hall, Englewood Clifs, NJ.
- THIESSEN, A. H. (1911) *Precipitation averages for large areas*. Monthly Weather Review. Vol. 39, pp. 1082-1084
- WEI, T. C. e MCGUINNESS, L. (1973) *Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation*. U.S. Department of Agriculture, USDA-ARS-NC-8. Washington, DC.