



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S.
KRIGAGEM E INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA PARA INTERPOLAÇÃO DOS
PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 27, núm. 5, 2003, pp. 925-933
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214025017>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

KRIGAGEM E INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA PARA INTERPOLAÇÃO DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS⁽¹⁾

**C. R. MELLO⁽²⁾, J. M. LIMA⁽³⁾, A. M. SILVA⁽⁴⁾,
J. M. MELLO⁽⁵⁾ & M. S. OLIVEIRA⁽⁶⁾**

RESUMO

Em projetos de obras hidráulicas, é necessária a estimativa da chuva intensa adequada à realidade técnico-financeira dos projetos, para posterior cálculo de vazões máximas. O uso da equação de chuvas intensas é a forma mais usual para estimativa da chuva de projeto. No entanto, há dificuldade em obtê-la para locais desprovidos de dados pluviométricos, o que pode ser superado mediante técnicas computacionais para a espacialização dos seus parâmetros. Para isto, pode-se trabalhar com procedimentos estatísticos para interpolação dos parâmetros com base em estações meteorológicas vizinhas ao local. Objetivou-se, neste trabalho, comparar os dois procedimentos estatísticos mais exatos, conforme já constatado em outras aplicações físicas, que são a krigagem (interpolador geoestatístico) e o inverso do quadrado da distância, para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Utilizaram-se 140 estações meteorológicas do estado de São Paulo, as quais dispõem da respectiva equação de chuvas intensas estimada com base em dados pluviométricos, consideradas como ideais. Destas, 126 foram utilizadas para estudo da dependência espacial dos parâmetros e 14 para comparação de erros nas estimativas da chuva intensa. Constatou-se que ambos os métodos apresentaram boa precisão, mas a krigagem produziu menores erros médios para 11 estações, verificando-se melhorias consideráveis em especial para tempos de retorno e tempos de duração da precipitação usuais em projetos em pequenas bacias hidrográficas, podendo-se sugerir este método como o mais adequado.

Termos de indexação: chuva intensa, espacialização, geoestatística, hidrologia.

⁽¹⁾ Trabalho financiado pela FAPEMIG. Recebido para publicação em novembro de 2002 e aprovado em julho de 2003.

⁽²⁾ Doutorando do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: crmello@ufla.br.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Bolsista do CNPq. E-mail: jmlima@ufla.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Engenharia, UFLA. Bolsista do CNPq. E-mail: marciano@ufla.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Ciências Florestais, UFLA. E-mail: jmmello@esalq.usp.br

⁽⁶⁾ Professor do Departamento de Ciências Exatas, UFLA. E-mail: marcelso@ufla.br

SUMMARY: KRIGING AND INVERSE-SQUARE-DISTANCE FOR THE INTERPOLATION OF RAINFALL EQUATION PARAMETERS

To design hydraulic structures, a sound estimation of rainfall parameters is necessary, in order to ensure the technical and economical feasibility of the project. Equations to predict intense rainfall are widely used to estimate runoff peak discharge. The difficulty to obtain estimates for sites where no rainfall data are available can be overcome by the interpolation of precipitation data, based on neighboring meteorological stations, through statistical procedures. The objective of this work was to compare the two most accurate statistical methods, previously confirmed in other applications, to interpolate rainfall parameters: kriging (geostatistical interpolator) and the inverse-square-distance, for the interpolation of equation parameters of intense rainfall. Data from 140 meteorological stations in Sao Paulo State, Brazil, were used. Each station has its estimated equation of intense rainfall, which is considered ideal, based on historical data series. Spatial dependence of the parameters was tested for 126 of the stations, whereas the other 14 were used to compare the mean errors of the two methods. Both allowed a satisfactory estimation of rainfall parameters. The kriging method can be indicated as the most appropriate since it produced lower mean errors at 11 stations, especially for the return period and duration time commonly applied to estimate rainfall parameters for projects in small watersheds.

Index terms: intense rainfall, regionalization, geostatistics, hydrology.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da chuva de áreas do projeto é essencial para o êxito de um projeto de engenharia ligado a obras hidráulicas. Para o bom dimensionamento de barragens para contenção do excesso de água e, ou, represamento para fins múltiplos, terraços e bacias de contenção de erosão, drenagem rural e urbana, pontes, canais e outras estruturas hidráulicas, a estimativa mais precisa possível de uma chuva intensa é extremamente importante para que um projeto seja viável tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

A utilização de equações de chuvas intensas é a forma mais usual para estimar uma intensidade de chuva a ser aplicada na determinação de vazões de cheia (Tucci, 1998; Chow et al., 1988; Genovez, 2001). Para estimar os parâmetros de chuvas intensas, trabalha-se com regressão múltipla não-linear utilizando-se séries históricas de dados de chuvas máximas com vários tempos de duração, extraídos de pluviogramas cotados. Quando não se dispõe deste instrumento, pode-se trabalhar com dados pluviométricos de chuvas máximas diárias anuais aplicando-se o processo de desagregação de chuvas, que é bastante comum (Mello et al., 2001; Cardoso et al., 1998).

Na ausência de informações, tanto pluviométricas quanto pluviográficas, Silva et al. (1999), Pinto (1999) e Assad et al. (1994) sugerem trabalhar com métodos que determinam uma média ponderada dos parâmetros da equação de chuvas intensas pelo inverso da distância, geralmente com o quadrado

da distância, obtendo-se, desta forma, uma equação de chuvas intensas para locais desprovidos de dados pluviométricos, utilizando dados de estações meteorológicas adjacentes. Este método tem sido empregado e sugerido atualmente, conforme os trabalhos citados, em especial os dois primeiros.

Myers (1994) e Laslett (1994) fizeram uma abordagem geral de métodos utilizados para interpolação espacial de parâmetros em áreas de pesquisa como ciência do solo, ecologia, engenharia florestal, hidrologia e meteorologia, destacando-se a krigagem (ou interpolação geostatística) como um preditor em potencial de inúmeros parâmetros nestas áreas. Dirks et al. (1998) trabalharam com alguns interpoladores espaciais para chuvas anuais, mensais, diárias e horárias para a Ilha de Norfolk na Nova Zelândia. Os pesquisadores concluíram que os métodos krigagem e inverso do quadrado da distância sobressaíram em relação a polígonos de Thiessen, splines cúbicas e inverso da distância com expoentes 1, 3 e 4. Contudo, os autores não estabeleceram qual dos dois métodos citados poderia produzir maior precisão.

Trabalhando com atributos de solo, Voltz & Webster (1990) e Gotway et al. (1996) concluíram que a krigagem proporcionou os melhores resultados, quando comparada, respectivamente, a splines cúbicas e métodos de inverso da distância, dentre eles o de expoente 2.

Segundo Vieira (2000) e Thompson (1992), a krigagem tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolação, porque está embasada em duas premissas: não-tendenciosidade

do estimador e variância mínima das estimativas. Além disto, quando se trabalha considerando a dependência espacial, podem-se reduzir os erros aleatórios pelo controle de parcela deste erro associada à dependência espacial. Deve-se ressaltar que a krigagem mostra uma ótima qualidade estatística explícita, exatamente as propriedades descritas anteriormente, enquanto o inverso do quadrado da distância não tem tal qualidade objetiva. A única base teórica para adoção do inverso do quadrado da distância talvez seja sua semelhança com a Lei de Gravitação Universal e Lei de Coulomb (Força e Campo Elétrico), ambas com enfraquecimento diretamente proporcional ao inverso da distância.

Em termos de variáveis hidrológicas, em especial chuvas máximas diárias, Vieira et al. (1991) trabalharam com 232 estações meteorológicas do estado de São Paulo, empregando interpolação geoestatística, graças à estrutura de dependência espacial detectada para esta variável hidrológica. Como os parâmetros da equação de chuvas intensas são estimados com base em dados de chuvas máximas diárias, acredita-se haver estrutura de dependência espacial dos dados. Assim, a krigagem pode permitir uma melhor estimativa destas que outros métodos de interpolação, inclusive o inverso do quadrado da distância, que vem sendo proposto.

Os objetivos deste trabalho são: (a) determinar a existência de dependência espacial dos parâmetros da equação de chuvas intensas; (b) no caso de dependência espacial, comparar as interpolações pelos métodos: krigagem geoestatística e inverso do quadrado da distância.

MATERIAL E MÉTODOS

A equação de chuvas intensas apresenta a seguinte forma geral (Righetto, 1998):

$$I = \frac{K \cdot TR^a}{(td + B)^C} \quad (1)$$

em que I: intensidade da precipitação ($L \cdot T^{-1}$); TR: tempo de retorno (anos); td: tempo de duração da chuva (T); K, a, B e C: parâmetros de ajuste, adimensional. Trabalhando com dados de precipitação máxima em diferentes tempos de duração, constituindo-se séries históricas, ajustam-se os parâmetros citados por meio de regressão múltipla não-linear (Haan, 1979; Froehlich, 1993).

Foram empregadas informações de equações de chuvas intensas e respectiva localização geográfica de 140 estações meteorológicas do estado de São Paulo, ajustadas com base em série histórica de dados pluviográficos, por meio do programa Plúvio 1.3, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de

Viçosa, o qual foi baseado em trabalho de Silva et al. (1999) e Pinto (1999).

Destas 140 estações, 126 foram empregadas para o estudo de dependência espacial dos parâmetros por meio de semivariograma experimental isotrópico a partir da expressão (Journel, 1989):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(s+h) - Z(s)]^2 \quad (2)$$

em que $Z(s)$ e $Z(s+h)$ são pares de valores medidos em locais afastados entre si da distância h e $N(h)$, o número desses pares para cada h . O uso desse estimador pressupõe que a propriedade atenda a uma condição de estacionaridade, segundo a qual, no mínimo a hipótese intrínseca é atendida (Journel & Huijbregts, 1978).

Ao semivariograma experimental foram ajustados o modelo exponencial (K, B e C) e esférico (a), respectivamente definidos por McBratney & Webster (1986), como se segue:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-3 \cdot h}{a}\right) \right] \quad \text{para } 0 < h < a \quad (3)$$

e

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[1.5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right) - 0.5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \quad \text{para } 0 < h < a \quad (4)$$

sendo $\gamma(h)$: semivariância; h : distância máxima em que o semivariograma é definido; C_0 : efeito pepita (ponto de interseção da curva com o eixo y); C_1 : patamar - C_0 ; a : alcance do semivariograma (distância na qual se detecta dependência espacial). Estes modelos foram ajustados por meio do programa Variowin, desenvolvido por Pannatier (1994).

O interpolador geoestatístico, conhecido como krigagem, apresenta a seguinte seqüência de cálculos, segundo Thompson (1992):

$$[A]^{-1} \cdot [b] = [\lambda] \quad (5)$$

$[A]^{-1}$: matriz inversa de semivariância entre as localidades da vizinhança de um ponto, determinada pelo modelo de semivariograma com base nas distâncias euclidianas entre as localidades; $[b]$: matriz de semivariância entre as localidades vizinhas (com a variável estimada) e o ponto para o qual a variável será interpolada, também determinado pelo modelo de semivariograma, com base nas distâncias entre as localidades vizinhas e o ponto a ser interpolado; $[\lambda]$: matriz de pesos de krigagem.

$$X_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot X_i \quad (6)$$

X_p : variável interpolada; λ_i : peso da i -ésima localidade vizinha; X_i : valor da variável para a i -ésima localidade; n : número de localidades vizinhas empregadas para interpolação do ponto.

A interpolação por meio do inverso do quadrado da distância foi feita da seguinte forma:

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \cdot X_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (7)$$

X_p : variável interpolada; X_i : valor da variável da i -ésima localidade vizinha; d_i : distância euclidiana entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

No presente estudo, trabalhou-se com as 6 estações mais próximas da localidade a ser interpolada, conforme método adotado por Silva et al. (1999), levando em consideração apenas as localidades que estivessem dentro do raio do alcance espacial obtido por cada parâmetro.

Para análise de erros, foram utilizadas as 14 estações meteorológicas restantes (das 140 iniciais) com os valores dos parâmetros da equação de chuvas intensas estimados com base em série histórica de dados pluviográficos. Assim, foi possível comparar os métodos, calculando-se as chuvas intensas com base nas equações ajustadas pelas interpolações com os valores determinados pelos parâmetros reais. Desta forma, foram estimadas chuvas intensas para o tempo de retorno de 5, 10, 15, 20, 50, 75 e 100 anos e tempos de duração de 10, 30, 60, 120, 240, 360, 720, 1.440, 2.160 e 2.880 minutos (48 horas). Os erros foram calculados da seguinte forma, segundo Dirks et al. (1998) e Mello et al. (2001):

$$e = \frac{|V_R - V_P|}{V_P} \cdot 100 \quad (8)$$

$$e_m = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (9)$$

em que V_R : valor da variável real; V_P : valor da variável predita; e : erro da i -ésima observação (%); e_m : erro médio (%); n : número de situações avaliadas (os 10 tempos de duração e 7 tempos de retorno, listados anteriormente, totalizando 70 observações).

Objetivando também determinar sobre quais condições de tempo de duração e tempo de retorno um método pode ser mais exato que outro, foi feita uma abordagem comparativa mais completa do comportamento dos erros proporcionados pelos métodos, considerando os intervalos destacados anteriormente para estas variáveis (tempo de duração e tempo de retorno).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da dependência espacial dos parâmetros da equação de chuvas intensas

No quadro 1, são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação (CV) para os quatro parâmetros da equação de chuvas intensas. Observa-se que os parâmetros K e B apresentaram elevados CV, acima de 30 %, mostrando alta variabilidade. Para os parâmetros a e C , os coeficientes de variação encontrados foram consideravelmente menores, sendo de 16,1 e 10,9 %, respectivamente. Vieira et al. (1991) encontraram coeficientes de variação semelhantes para o estado de São Paulo, estudando a dependência espacial de chuvas máximas diárias, mostrando a possibilidade de haver estrutura de dependência espacial destes parâmetros.

Na figura 1, são mostrados os semivariogramas ajustados para cada um dos parâmetros e, na sequência, os respectivos modelos.

$$\gamma(h) = 140.000 + 120.000 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-3 \cdot h}{93.074}\right) \right] \quad (10)$$

$$\gamma(h) = 15,37 + 29,15 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-3 \cdot h}{92.400}\right) \right] \quad (11)$$

$$\gamma(h) = 0,004 + 0,0034 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-3 \cdot h}{92.400}\right) \right] \quad (12)$$

$$\gamma(h) = 0,0006 \cdot \left[1,5 \cdot \left(\frac{h}{103.600} \right) - 0,5 \cdot \left(\frac{h}{103.600} \right)^3 \right] \quad (13)$$

Observa-se que os parâmetros K e B apresentaram os melhores ajustes, com um patamar elevado, garantindo boa dependência espacial dos citados parâmetros, especialmente o parâmetro B , que, além disto, apresenta um baixo efeito pepita. Os parâmetros C e a também apresentaram bons ajustes dos respectivos modelos, com baixos efeitos pepita e patamares suficientemente elevados para produzir uma boa estrutura de dependência espacial.

Quadro 1. Valores médios e coeficientes de variação dos parâmetros da equação de chuvas intensas para as 126 estações meteorológicas avaliadas

| Parâmetro | CV | Média (adimensional) |
|-----------|------|----------------------|
| | % | |
| K | 32,9 | 1520,328 |
| a | 16,1 | 0,136 |
| B | 32,3 | 19,048 |
| C | 10,9 | 0,793 |

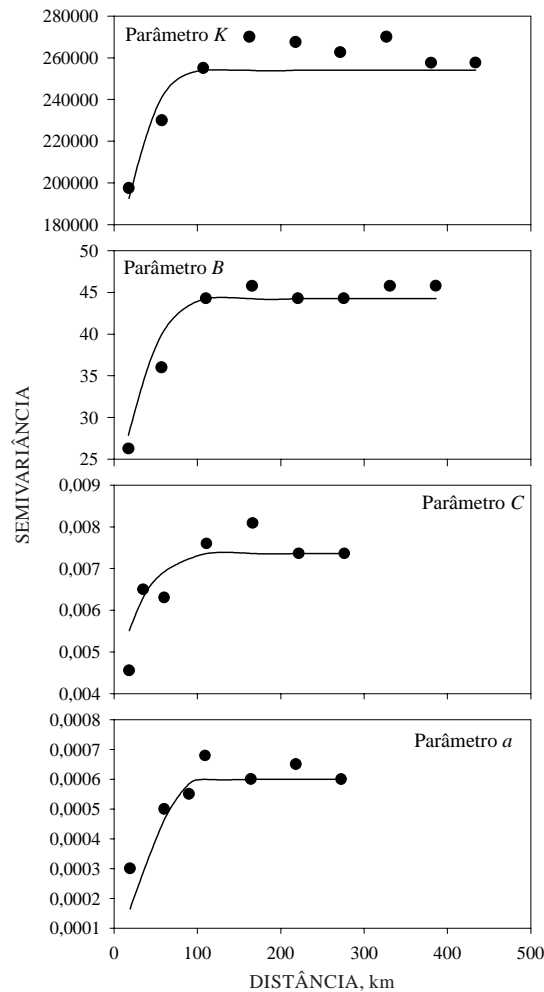


Figura 1. Semivariogramas dos parâmetros K , B , C e a da equação de chuvas intensas.

Desta forma, o uso do interpolador geoestatístico pode perfeitamente ser aplicado. Pode-se observar também que os alcances encontrados ficaram próximos uns dos outros, na faixa de 90 a 100 km. Vieira et al. (1991) também trabalharam com o modelo exponencial para chuvas máximas diárias, concluindo o melhor ajuste deste modelo, e encontraram alcance para esta variável hidrológica próximo a 100 km. Esta situação reforça ainda mais a estrutura de dependência espacial que há para os parâmetros estudados, haja vista a forte relação entre eles e a chuva máxima diária.

Avaliação dos erros produzidos pelos métodos de interpolação

No quadro 2, são mostrados os valores interpolados pelos métodos inverso do quadrado da distância e krigagem para os quatro parâmetros da equação de chuvas intensas, bem como o valor estimado com base em séries históricas de precipitação máxima diária, para efeito de comparação. A análise individual dos parâmetros não tem significado físico, uma vez que a aplicação da equação de chuvas intensas é uma combinação de todos os parâmetros, interessando, portanto, a chuva intensa gerada pela equação como um todo. Além disso, determinado parâmetro pode ser interpolado com maior precisão por um dos métodos, enquanto outro parâmetro interpolado pode ser mais bem interpolado por outro método. Esta combinação de precisões influi na estimativa final da chuva intensa.

No entanto, algumas observações importantes podem ser feitas. Pode-se observar que a interpolação do parâmetro a não apresenta grandes diferenças entre os métodos como as constatadas pelos outros parâmetros, em especial K e B . Isto está associado ao fato de que a estrutura de dependência espacial do parâmetro a não apresenta as mesmas qualidades produzidas pelos ajustes dos demais parâmetros.

Quadro 2. Valores interpolados pelos métodos estudados (K_{IQD} e K_{Krig} , a_{IQD} e a_{Krig} , B_{IQD} e B_{Krig} , C_{IQD} e C_{Krig}) e medidos (K_{Real} , a_{Real} , B_{Real} e C_{Real}) para os parâmetros de equações de chuvas intensas para as 14 estações do estado de São Paulo utilizadas para o estudo de erros

| Cidade | K_{IQD} | K_{Krig} | K_{Real} | a_{IQD} | a_{Krig} | a_{Real} | B_{IQD} | B_{Krig} | B_{Real} | C_{IQD} | C_{Krig} | C_{Real} |
|--------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| Boituva | 1609,9 | 1569,2 | 1999,6 | 0,131 | 0,128 | 0,186 | 20,56 | 20,34 | 17,79 | 0,819 | 0,810 | 0,881 |
| Botucatu | 1403,1 | 1401,0 | 1405,8 | 0,119 | 0,134 | 0,139 | 23,04 | 22,50 | 18,37 | 0,752 | 0,756 | 0,787 |
| Caçapava | 1188,7 | 1277,7 | 2000,0 | 0,134 | 0,135 | 0,115 | 10,04 | 9,46 | 24,99 | 0,799 | 0,801 | 0,852 |
| Cubatão | 776,6 | 769,7 | 695,2 | 0,153 | 0,140 | 0,126 | 22,90 | 18,56 | 8,73 | 0,639 | 0,633 | 0,607 |
| Dourado | 1800,4 | 1815,7 | 1999,7 | 0,122 | 0,126 | 0,149 | 21,98 | 22,35 | 22,48 | 0,835 | 0,836 | 0,849 |
| Guarujá | 1112,3 | 1123,0 | 1349,3 | 0,135 | 0,130 | 0,155 | 18,84 | 20,23 | 23,95 | 0,696 | 0,695 | 0,757 |
| Itanhaém | 1467,6 | 1457,6 | 1733,3 | 0,123 | 0,114 | 0,124 | 17,41 | 17,50 | 25,00 | 0,786 | 0,783 | 0,816 |
| Itaporanga | 1220,9 | 1208,4 | 500,02 | 0,139 | 0,132 | 0,155 | 18,06 | 18,88 | 16,91 | 0,720 | 0,701 | 0,525 |
| Itirapina | 1928,8 | 1898,7 | 1999,6 | 0,169 | 0,175 | 0,152 | 13,93 | 15,39 | 24,34 | 0,877 | 0,867 | 0,850 |
| Lins | 1385,2 | 1429,3 | 2000,0 | 0,131 | 0,131 | 0,108 | 20,38 | 20,41 | 21,02 | 0,752 | 0,762 | 0,860 |
| Martinópolis | 1409,9 | 1410,1 | 2000,0 | 0,132 | 0,132 | 0,136 | 23,41 | 23,16 | 24,66 | 0,760 | 0,765 | 0,856 |
| Paranapanema | 1572,5 | 1661,9 | 1232,7 | 0,126 | 0,134 | 0,130 | 19,16 | 19,79 | 16,87 | 0,799 | 0,817 | 0,768 |
| Pedro Toledo | 1520,4 | 1348,0 | 1215,6 | 0,136 | 0,129 | 0,166 | 21,03 | 20,17 | 25,00 | 0,776 | 0,737 | 0,709 |
| Piacatu | 1390,8 | 1347,5 | 1995,4 | 0,141 | 0,135 | 0,099 | 20,98 | 20,96 | 25,00 | 0,758 | 0,753 | 0,818 |

IQD = Inverso do Quadrado da Distância; Krig. = Krigagem.

No quadro 3, encontram-se as 14 estações meteorológicas testadas com suas respectivas vizinhanças e os erros médios gerados para chuvas intensas pelos métodos de interpolação. Observa-se que, para as estações de Lins, Itaporanga e Botucatu 2, os erros médios foram elevados, acima de 23 %, proporcionados por ambos os métodos, em especial para Lins, com a krigagem apresentando o menor valor para as duas primeiras estações. Para as demais, os erros proporcionados pelos métodos foram baixos o suficiente para avaliar que ambos os métodos apresentam boa exatidão. Deve-se ressaltar que a krigagem promoveu menores erros em 11 das 14 estações avaliadas e, em alguns casos, como Pedro de Toledo, a melhoria na interpolação foi substancial. Dirks et al. (1998) encontraram erros médios na interpolação de precipitações diárias de até 77 % para o inverso do quadrado da distância e 73 % para a krigagem. Isto mostra que os erros encontrados na estimativa de chuvas intensas pelo presente trabalho estão dentro da margem de aceitação.

Na figura 2, destacam-se a relação entre erros de estimativa da chuva intensa e os tempos de duração e retorno das chuvas proporcionados pelos métodos de interpolação para as estações climatológicas de Botucatu 2, Boituva e Paranapanema. Apesar de ser o erro médio proporcionado pelo IQD menor que o proporcionado pela krigagem, há situações em que esta proporciona erros menores.

Para Boituva, os erros aumentam com o aumento do tempo de retorno para durações da precipitação até 100 min, independentemente do método. Para tempos de retorno superiores a cinco anos, este comportamento se estende até próximo a 1.000 min de duração da precipitação. A krigagem proporciona erros menores que o IQD para tempos de duração da precipitação inferiores a 100 min e tempo de

retorno de cinco anos. Tal comportamento ocorre para tempos de duração cada vez maiores, à medida que o tempo de retorno aumenta. Considerando tempos de duração e de retorno normalmente utilizados em projetos em pequenas bacias rurais, a krigagem foi o método que proporcionou os menores erros de interpolação.

Apesar de os erros médios serem superiores, o comportamento dos erros para a estação climatológica de Botucatu 2 foi semelhante ao de Boituva; valendo

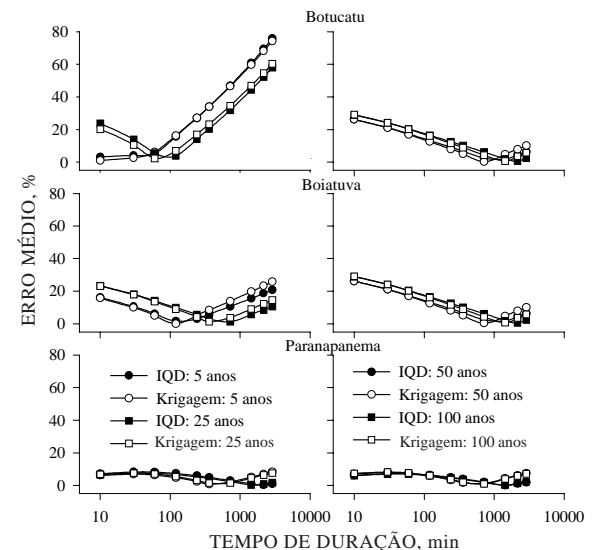


Figura 2. Relação entre erro das interpolações dos parâmetros de equações de chuvas intensas por krigagem e IQD com tempos de duração e de retorno para as localidades de Botucatu, Boituva e Paranapanema.

Quadro 3. Estações meteorológicas (coluna Cidade) testadas, bem como as vizinhanças empregadas em cada uma delas, e erros médios proporcionados pelos métodos de interpolação

| Cidade | Estação 1 | Estação 2 | Estação 3 | Estação 4 | Estação 5 | Estação 6 | E _{IQD} | E _{Krig} |
|--------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|------------------|-------------------|
| | | | | | | | — % — | |
| Boituva | Itú | Elias Fausto | Piracicaba | Vinhedo | Tapiraí | Cosmópolis | 10,5 | 11,5 |
| Botucatu 2 | Botucatu 1 | Itatinga | Santa M. Serra | Guareí | Barra Bonita | Tatui | 27,8 | 28,4 |
| Caçapava | Taubaté | Santa Branca | S. José dos Campos | São Bento do Sapucaí | Salesópolis | Aparecida | 8,4 | 6,4 |
| Cubatão 2 | Santo André | Cubatão 1 | Mauá | S. Bernardo do Campo | Mogi das Cruzes | Biritiba Mirim | 6,9 | 6,0 |
| Dourado | Araraquara | Boracéia | Barra Bonita | Santa M. Serra | Itajú | Matão | 9,7 | 8,6 |
| Guarujá | Cubatão | Santo André | S. Bernardo do Campo | Mauá | Mogi das Cruzes | Biritiba Mirim | 13,9 | 13,1 |
| Itanhaém | Itariri | Juquitiba | Itapeçica da Serra | Cubatão | S. Bernardo do Campo | Santo André | 5,5 | 3,8 |
| Itaporanga | Itararé | Timburi | Pirajú | Buri | Águas Santa Bárbara | Apiáí | 26,7 | 23,1 |
| Itirapina 2 | Itirapina 1 | Piracicaba | Leme | São Carlos | Mogi Guaçu | Cosmópolis | 12,9 | 9,1 |
| Lins | Júlio Mesquita | Reginópolis | Barbosa | Queirós | Mundo Novo (Graça) | Ibitinga | 41,0 | 37,0 |
| Martinópolis | Rancharia | Pres. Bernardes | Lutécia | Queirós | Guarapetes | Barbosa | 23,6 | 20,2 |
| Paranapanema | Itatinga | Buri | Guareí | Botucatu 1 | Pirajú | Tatui | 4,4 | 5,2 |
| Pedro Toledo | Juquitiba | Itariri | Itapeçica da Serra | Cotia | Tapiraí | Ibiúna | 20,2 | 13,4 |
| Piçatu | Guarapetes | Queirós | Rancharia | Lavinia | Barbosa | Lutécia | 15,3 | 13,0 |

IQD = Inverso do Quadrado da Distância; Krig. = krigagem; Botucatu 1 = Estação Botucatu; Botucatu 2 = Estação Bairro Anhúmas; Cubatão 1 = Estação Piaçaguera; Cubatão 2 = Estação Terceiro Plano da Serra Nova; Itirapina 1 = Estação Visconde de Rio Claro; Itirapina 2 = Estação Graúna; a distância entre as estações e a respectiva cidade aumenta no sentido de 1 para 6.

das mesmas observações anteriores, foram encontrados erros máximos altos, em especial para tempos de retorno mais baixos, chegando-se próximo a 80 %, para tempos de duração acima de 1.000 min, para ambos os métodos, e tempo de retorno de cinco anos. Contudo, dificilmente estes valores são aplicados a projetos em pequenas bacias.

Para a estação de Paranapanema, o comportamento dos erros mostrou-se semelhante ao das estações anteriores, constatando-se, no entanto, erros consideravelmente inferiores, verificando-se melhor desempenho da krigagem para tempos de retorno inferiores a 25 anos e tempos de duração inferiores a 1.000 min e, para tempos de duração entre 100 e 1.000 min, para todos os tempos de retorno. Os erros máximos encontrados ficaram em torno de 9 % para ambos os métodos, porém para a krigagem isto ocorreu para tempos de duração muito altos.

Na figura 3, podem-se avaliar os erros proporcionados pelos métodos de interpolação para as estações de Cubatão e Itaporanga. Para ambas as localidades, a krigagem proporcionou os menores erros médios (Quadro 2). No entanto, para a cidade de Itaporanga, foram constatadas maiores diferenças entre os métodos para tempos de duração da precipitação inferiores a 100 min, especialmente para tempos de retorno menores que 25 anos. A partir deste ponto, pode-se observar que os métodos praticamente se igualam, com ambos gerando maiores erros. Os erros máximos encontrados ficaram próximos a 50 %, para ambos os métodos, em qualquer tempo de retorno. Para Cubatão, observa-se comportamento semelhante ao de Itaporanga. No entanto, para os tempos de retorno acima de 25 anos, percebe-se melhora proporcionada pela interpolação via krigagem, observando-se diferenças bem superiores àquelas encontradas para Itaporanga.

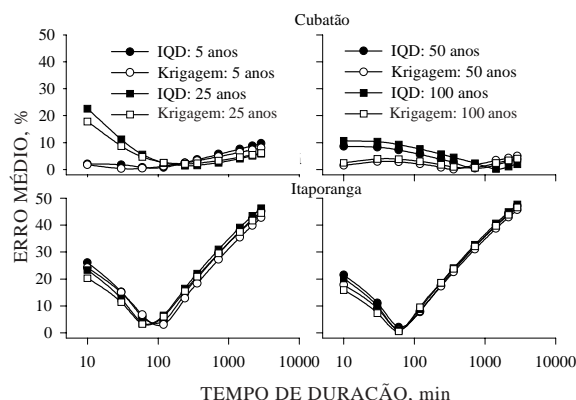


Figura 3. Relação entre erro das interpolações dos parâmetros de equações de chuvas intensas por krigagem e IQD com tempos de duração e de retorno para as localidades de Cubatão e Itaporanga.

A figura 4 apresenta o comportamento dos erros para as estações das cidades de Itirapina e Caçapava. Observa-se semelhança entre os erros para ambas as localidades, com desempenho superior da krigagem para tempos de duração da precipitação superiores a 100 min, para Itirapina, e superiores a 60 min para Caçapava. Nesta situação, a diferença proporcionada pela krigagem foi consideravelmente superior, em especial para Itirapina, onde os erros máximos foram de cerca de 30 %, para o IQD, em todos os tempos de retorno, e, para a krigagem, este percentual apenas para os tempos 50 e 100 anos. Já para Caçapava, os valores máximos foram de 35 % para krigagem no tempo de retorno 100 anos e 22 % para o IQD, também neste tempo de retorno. Contudo, verifica-se que os erros proporcionados pela krigagem foram inferiores para tempos de duração acima de 60 min, o que, na média, resultou em erro inferior para esse método.

Na figura 5, são apresentados os erros para as estações de Dourado e Itanhaém, que geraram duas situações distintas, apesar de ambas terem produzido um erro menor na krigagem em relação a IQD para todas as situações de tempo de duração e tempo de retorno. Na primeira, os erros diminuem com o aumento do tempo de duração em todos os tempos de retorno. À medida que, para um mesmo tempo de duração, aumenta-se o tempo de retorno, verifica-se um aumento dos erros. Para a estação de Itanhaém, verifica-se um ponto de mínimo erro em cada tempo de retorno. Notam-se, ainda, para as duas localidades, erros máximos semelhantes, em torno de 15 %, para o IQD, e 13 %, para krigagem; no entanto, para Itanhaém, os erros mínimos foram menores, proporcionando erro médio menor (Quadro 2).

Pela figura 6, pode-se verificar o comportamento dos erros para as demais estações testadas. Estas

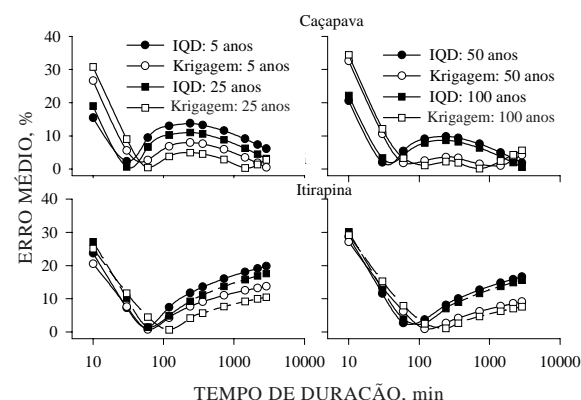


Figura 4. Relação entre erro das interpolações dos parâmetros de equações de chuvas intensas por krigagem e IQD com tempos de duração e de retorno para as localidades de Itirapina e Caçapava.

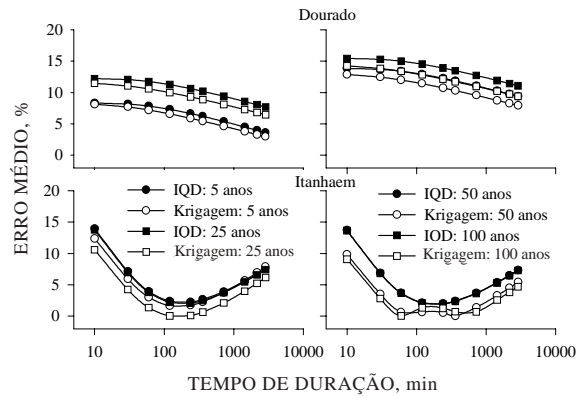


Figura 5. Relação entre erro das interpolações de parâmetros de equações de chuvas intensas por krigagem e IQD com tempos de duração e de retorno para as localidades de Dourado e Itanhaém.

estão compondo a mesma figura por terem apresentado, como características comuns: a krigagem sempre com os menores erros, independentemente de tempo de duração e tempo de retorno e tendência de aumento dos erros à medida que o tempo de duração aumenta. No entanto, para as estações de Lins, Martinópolis e Pedro de Toledo, observa-se o melhor desempenho da krigagem à medida que aumenta o tempo de duração, aumentando as diferenças entre os métodos. Para as estações de Piacatu e Guarujá, o desempenho da krigagem é superior para os menores tempos de duração. Conforme já comentado com base apenas em erros médios, pode-se, por meio desta figura, visualizar o melhor desempenho da krigagem para as estações de Martinópolis e Pedro de Toledo, onde se observa uma diferença considerável de erros em todas as situações. Da mesma forma, para a estação de Lins, foram verificados erros médios muito superiores aos observados para as demais localidades, por ambos os métodos, em especial o IQD. A figura 6 revela ainda que os erros máximos ficaram em torno de 80 %, para IQD, e 70 %, para krigagem, muito superiores aos observados para as outras estações.

De maneira geral, com base nos resultados obtidos, o método de interpolação geoestatístico mostrou melhor desempenho, haja vista a predominância de menores erros produzidos por ele, mesmo em situações em que o inverso do quadrado da distância propiciou menores erros médios. Observou-se a predominância da krigagem, em especial para intervalos de tempo de retorno e tempo de duração típicos de projetos hidráulicos em pequenas bacias. Com o advento de técnicas de programação computacional, pode-se superar facilmente o principal obstáculo prático imposto pela krigagem, que é a necessidade de cálculos mais

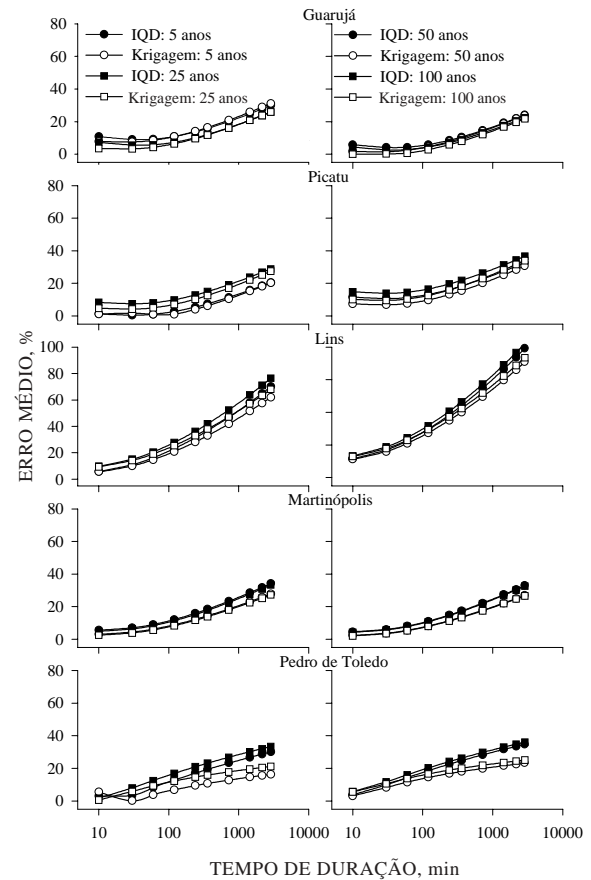


Figura 6. Relação entre erro das interpolações dos parâmetros de equações de chuvas intensas por krigagem e IQD com tempos de duração e de retorno para as localidades de Guarujá, Piacatu, Lins, Martinópolis e Pedro de Toledo.

complexos. Isto ajudará implementar programas computacionais de mapeamento da chuva intensa como aqueles baseados nos Sistemas de Informação Geográfica, a fim de proporcionar espacialização destes parâmetros com maior exatidão, reduzindo substancialmente os erros de estimativa.

CONCLUSÕES

1. Os parâmetros da equação de chuvas intensas apresentaram dependência espacial, com bom ajuste dos modelos exponencial (K , B e C) e esférico (a).
2. Embora ambos os métodos testados tenham apresentado baixos erros médios, a krigagem foi o método que propiciou os menores erros de interpolação dos parâmetros.

LITERATURA CITADA

- ASSAD, M.L.L.; ASSAD, E.D. & EVANGELHISTA, B.A. Chuvas extremas na região dos cerrados. In: ASSAD, C.D., coord. Chuva no cerrado: análise e espacialização. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1994. p.49-54.
- CARDOSO, C.O.; ULLMANN, M.N. & BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). R. Bras. Ci. Solo, 22:131-140, 1998.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W. Applied hydrology. New York, McGraw-Hill, 1988. 572p.
- DIRKS, K.N.; HAY, J.E.; STOW, C.D. & HARRIS, D. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data. J. Hydrol., 208:187-193, 1998.
- FROELICH, D.C. Short-duration-rainfall intensity equations for drainage design. J. Irrig. Drainage Eng., 119:814-828, 1993.
- GENOVEZ, A.B. Vazões máximas. In: PAIVA, J.B.D. & PAIVA, E.M.C.D., orgs. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. p.33-112.
- GOTWAY, C.A.; FERGUSON, R.B.; HERGERT, G.W. & PETERSON, T.A. Comparison of Kriging and Inverse-distance methods for mapping soil parameters. Soil Sci. Soc. Am. J., 60:1237-1247, 1996.
- HAAN, C.T. Statistical methods in hidrology. 2.ed. Ames, The Iowa State University Press, 1979. 377p.
- JOURNEL, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington, American Geophysical Union, 1989. 40p.
- JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, Ch.J. Mining geostatistics. London, Academic Press, 1978. 600p.
- LASLETT, G.M. Kriging and splines: an empirical comparison of their predictive performance in some applications. J. Am. Stat. Assoc., 89:391-400, 1994.
- McBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. J. Soil Sci., 37:617-639, 1986.
- MELLO, C.R.; FERREIRA, D.F.; SILVA, A.M. & LIMA, J.M. Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas. R. Bras. Ci. Solo, 25:693-698, 2001.
- MYERS, D.E. Spatial interpolation: an overview. Geoderma, 62:17-28, 1994.
- PANNATIER, Y. "MS-WINDOWS Programs for exploratory variography and variogram modeling in 2D". In: CAPASSO, V.; GIRONE, G. & POSA, D., eds. Statistic of spatial processes: theory and applications. Bari, Istituto per Ricerche de Mathematica Applicata (IRMA), 1994. p.165-170.
- PINTO, F.R.L. Equações de intensidade-duração-freqüência da precipitação para os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo: estimativa e espacialização. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 70p. (Tese de Mestrado)
- RIGHETTO, A.M. Hidrologia e recursos hídricos. São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998. 840p.
- SILVA, D.D.; VALVERDE, A.E.L.; PRUSKI, F.F. & GONÇALVES, R.A.B. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para o Estado de São Paulo. R. Eng. Agric., 7:70-87, 1999.
- THOMPSON, S.K. Sampling. New York, Wiley-Interscience Publication, 1992. 343p.
- TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 669p.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-54.
- VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. & BURROWS, I.T. Mapeamento da chuva diária máxima provável para o estado de São Paulo. R. Bras. Ci. Solo, 15:93-98, 1991.
- VOLTZ, M. & WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. J. Soil Sci., 41:473-490, 1990.

