

VARIABILIDADE ESPACIAL DE PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA ANUAL EM DIFERENTE TEMPO DE RETORNO NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

JEFFERSON VIEIRA JOSÉ¹; BRUNO MARÇAL ALMEIDA¹; ACÁCIO PERBONI¹; RAFAEL DREUX MIRANDA FERNANDES²; SERGIO NASCIMENTO DUARTE³ E PATRICIA ANGÉLICA ALVES MARQUES³

¹ Doutorando em Ciências, Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, jfvieira@usp.br; brunomarc@usp.br; acacioperboni@usp.br

² Mestrando em Ciências, Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, rafadreux@usp.br

³ Eng.(a) Agrônomo(a), Prof. Doutor(a), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, snduarte@usp.br, paamarques@usp.br

1 RESUMO

O conhecimento das precipitações máximas diárias anuais e de seu tempo de retorno em uma região são de interesse prático para gestão de recursos hídricos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição das precipitações diárias máximas anuais (Pdma) para diferentes tempos de retorno e dos dois parâmetros (α e β) da distribuição de Gumbel para o Estado de São Paulo, por meio de técnicas da geoestatística. Para isso, foram utilizados dados pluviométricos de 45 cidades distribuídas em todo Estado, com 30 anos de normais climatológicas (1977 a 2006). Para cada estação identificaram-se as Pdma e realizaram-se ajustes por meio da distribuição de probabilidade de Gumbel. Os dados foram avaliados pelo teste de aderência de Anderson-Darling ($\alpha < 0,05$) e associados aos tempos de retorno de 2 e 100 anos. Os resultados revelaram que as Pdma associadas aos seus respectivos tempo de retorno e os parâmetros de Gumbel apresentaram dependência espacial.

Palavras-chave: chuvas extremas, gumbel, geoR

2 INTRODUÇÃO

A precipitação é a variável climática com a maior variabilidade no tempo e no espaço. Por essa razão, o estudo de eventos extremos de precipitação diária máxima anual (Pdma) está relacionado com danos severos às atividades humanas em quase todas as regiões do mundo, devido a seu potencial em causar saturação hídrica do solo, escoamento superficial e erosão (IPCC, 2007; Tammets & Jaagus, 2013).

Todas as avaliações dos riscos de eventos climáticos extremos exigem métodos para estimar estatisticamente seus tempos de retorno a partir dos dados medidos (Guimarães, 2011). O tempo de retorno é o tempo médio necessário, em anos, para que um evento (Pdma) venha ser igualado ou superado, em um ano qualquer (Naghattini & Pinto, 2007). No caso de projetos de microdrenagem e macrodrenagem, os tempos de retorno recomendados são de 2 e 100 anos, respectivamente.

Sendo a Pdma uma variável aleatória contínua, pode-se representá-la por meio de alguma distribuição teórica de probabilidade que melhor se ajuste a valores extremos (Alves et al., 2013). Segundo Beijo (2002), a distribuição de Gumbel é a que tem o maior uso na

literatura, representada por dois parâmetros, um de escala (α) e outro de forma (β), os quais podem ser estimados pela metodologia da máxima verossimilhança.

Em muitas regiões, onde há falta de séries históricas pluviométricas, o uso de distribuição de Gumbel é inviabilizado. Neste caso, a krigagem é mais utilizada. Este método usa a dependência espacial expressa no semivariograma, entre amostras vizinhas, para estimar valores em qualquer posição dentro da área em estudo (Machado et al., 2010).

A utilização da geoestatística vem aumentando e seus conceitos são usados para avaliar a dependência espacial entre as observações. A geoestatística foi utilizada por Machado et al. (2010) para mapear a variabilidade espacial da Pdma para Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Os autores concluíram que o modelo de semivariograma exponencial foi suficiente para estimar os tempos de retorno no Estado. Melo & Viola (2013) aplicaram a geoestatística para mapear a variabilidade espacial de precipitações extensas no Estado de Minas Gerais (Brasil) e utilizaram também o modelo exponencial.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição das precipitações diárias máximas anuais (Pdma) para diferentes tempos de retorno e para os dois parâmetros (α e β) da distribuição de Gumbel por meio de técnicas geoestatísticas; se propõe também construir mapas para o Estado de São Paulo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo, o Estado de São Paulo, entre as coordenadas de extremo norte (19° 46' 45" S, 50° 28' 17" W), extremo sul (25° 18' 43" S, 48° 05' 56" W), extremo leste (22° 40' 40" S, 44° 09' 38" W) e extremo oeste (22° 36' 35" S, 53° 06' 35" W). A área é formada, basicamente, de uma planície litorânea estreita, limitada pela Serra do Mar, e de planaltos e depressões no resto do território. Predomina o clima tropical atlântico, na região central do território paulista, e o tropical de altitude nas regiões mais altas, como na Serra da Mantiqueira e na Serra do Mar (Setzer, 1966).

Os dados diários de precipitação pluviométrica de 45 estações representativas do Estado de São Paulo foram coletados da rede de estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com uma série mínima de 30 anos. Foram analisados dados de precipitação diária máxima anual (Pdma) nos anos de 1977 a 2006. Na Figura 1 estão dispostas as estações pluviométricas utilizadas.

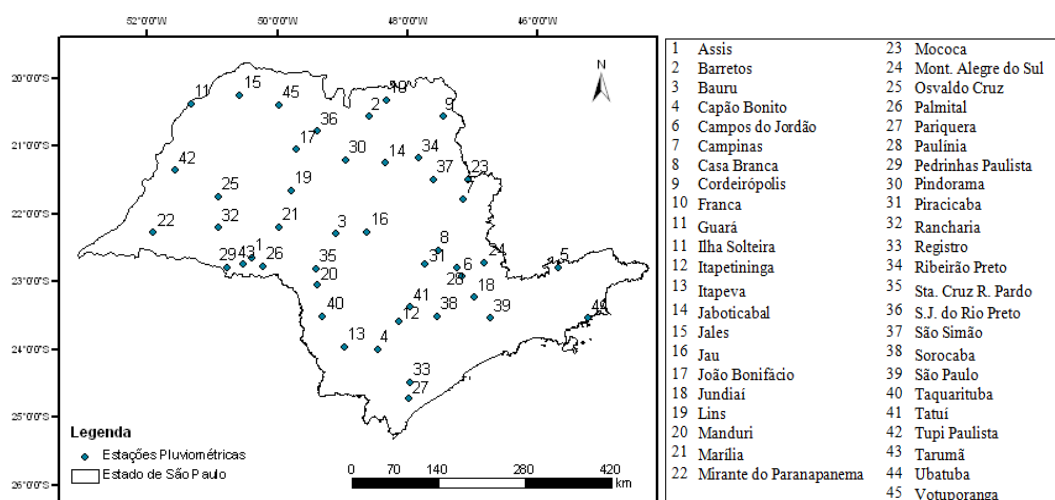


Figura 1. Localização das estações pluviométricas analisadas no Estado de São Paulo

Com as Pdmas observadas de cada estação pluviométrica, foram determinadas as estimativas dos parâmetros (α e β) da distribuição de Gumbel pelo método da máxima verossimilhança e, ao utilizar essas estimativas dos parâmetros, calculou-se a Pdma provável para os tempos de retorno de 2 e 100 anos, para cada estação pluviométrica estudada. Foi utilizado o teste aderência Anderson-Darling, em um nível de 5% de significância. As Equações 1 e 2 denotam, respectivamente, a função de probabilidade acumulada de Gumbel e a função inversa de densidade da distribuição de Gumbel (Naghetini & Pinto, 2007).

$$F_y(y) = \exp\left[-\exp\left(\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (1)$$

$$y(TR) = \beta - \alpha \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right] \quad (2)$$

em que,

$F_y(y)$ – probabilidade acumulada de ocorrência de um evento y ;

$y(TR)$ – quantil para determinado tempo de retorno TR ;

α, β – parâmetros de escala e forma, respectivamente;

TR – tempo de retorno, anos, e;

y – moda da distribuição.

Os estimadores da máxima verossimilhança para os parâmetros β e α , obtidos a partir da Equação 1, de acordo Hann (1977), são apresentados nas Equações 3 e 4. Para estimação dos parâmetros β e α de Gumbel e o teste de aderência de Anderson-Darling foi utilizado o software EasyFit®.

$$\beta = -\alpha \ln\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{-y_i}{\hat{\alpha}}\right)\right] \quad (3)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i \exp\left(\frac{-y_i}{\hat{\alpha}}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{-y_i}{\hat{\alpha}}\right)} \quad (4)$$

Os dados de Pdma prováveis para os tempos de retorno e os parâmetros do modelo de Gumbel obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva. Utilizou-se a família de transformações Box-Cox (Box & Cox, 1964), para encontrar a transformação mais adequada para alcançar o comportamento aproximadamente Gaussiano, por meio das equações (5) e (6). Para valores iguais a 1 os dados foram considerados normais, não sendo necessária a transformação.

$$y^\lambda = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}; \text{ para } \lambda \neq 0 \quad (5)$$

$$y^\lambda = \ln(y); \text{ para } \lambda = 0 \quad (6)$$

Os dados de Pdma prováveis para os tempos de retorno 2 e 100 anos e os parâmetros de Gumbel foram analisados sob abordagem de modelos geoestatísticos (Diggle & Ribeiro Jr.,

2007). Desta forma, buscou-se ajustar os parâmetros do modelo estatístico (equação 7) pelo método a máxima verossimilhança.

$$Y(Xi) = \beta + S(Xi) + \varepsilon i \quad (7)$$

Em que $Y(Xi)$ são os dados em estudo na linha i da matriz de coordenadas X ; β é a média geral de uma área específica; $S(Xi)$ é um processo gaussiano com função de modelo exponencial e parâmetro de variância e de alcance σ^2 e ϕ , respectivamente; e εi é o ruído aleatório normalmente distribuído com média zero e variância τ^2 . Utilizou-se o modelo exponencial devido a baixa suavidade do processo espacial isso ocorre devido os dados em estudo tenderem a variar bruscamente.

A classificação do grau da dependência espacial (GDE) foi feita por meio da razão entre o efeito pepita e o patamar $\left\{ \left[\frac{\tau^2}{(\sigma^2 + \tau^2)} \right] - 1 \right\}$, sendo considerada forte se a razão for $\geq 0,75$, moderada quando estiver entre 0,74 e 0,26 e fraca se $\leq 0,25$ (Cambardella et al. 1994). Os métodos geoestatísticos foram implementados mediante uso de funções disponíveis nas bibliotecas *geoR* (Ribeiro & Diggle, 2001), presente no software *R*, versão 2.2.1 (*R*. Development Core Team, 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de Gumbel foi avaliada pelo teste de Anderson-Darling ($p < 0,05$); os valores obtidos para o teste de ajuste foram muito inferiores aos valores críticos (5,508), sendo a distribuição de Gumbel considerada adequada nas 45 estações pluviométricas. Nadarajah & Choi (2007), ao estudarem a distribuição de eventos extremos de precipitação diária, na Coreia do Sul, verificaram que a distribuição de Gumbel representou bem condições pluviométricas deste país.

Os resultados da análise descritiva das precipitações prováveis e os parâmetros da distribuição de Gumbel estão presentes na Tabela 1. Os parâmetros estatísticos das Pdma aumentaram proporcionalmente, de acordo com o período de retorno. Este comportamento indica que quanto maior for o período de tempo necessário para igualar ou superar uma chuva específica, pelo menos uma vez em média, maior é a variabilidade associada.

Tabela 1. Estatística descritiva dos parâmetros da função de distribuição de Gumbel (β e α) e tempo de retorno de 2 e 100 anos.

| Parâmetros Gumbel | Média | Mediana | Mínimo | Máximo | Desvio Padrão | Assi | Curt | C.V. (%) | S-W p-valor |
|-------------------|--------|---------|--------|--------|---------------|------|------|-------------|----------------|
| | | | | | | | | | |
| β | 19,88 | 18,67 | 10,33 | 43,94 | 6,61 | 1,32 | 2,95 | 32,90 | 0,0021 |
| α | 77,62 | 74,36 | 63,61 | 128,84 | 11,77 | 2,13 | 6,83 | 15,16 | 0,001 |
| Tempo de retorno | | | | | | | | | |
| 2 anos | 84,92 | 83,46 | 69,34 | 142,61 | 13,55 | 2,02 | 6,37 | 15,96 | 0,001 |
| 100 anos | 169,27 | 163,86 | 116,97 | 301,60 | 39,01 | 1,38 | 2,96 | 23,04 | 0,006 |

Assi – Assimetria; Curt – Curtose; C.V. – Coeficiente de Variação; S-W – Shapiro-Wilk.

Os valores de assimetria, superior a 0,5 ou menor do que -0,5, bem como curtose, superior a 3, indica que os dados não seguem distribuição normal, o que foi confirmado pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) (Tabela 1). A não normalidade dos dados pode ser explicada pela característica intrínseca da variável avaliada, o que é considerado um evento extremo na natureza, sendo semelhante a outros tipos de distribuição, por exemplo, a distribuição de Gumbel (Machado et al. 2010).

Com base no critério de Warrick & Nielsen (1980), para classificar o coeficiente de variação – CV (baixo – $CV < 12\%$, médio – $12\% < CV < 60\%$, alto – $CV \geq 60\%$), verificou-se que os valores foram classificados como médios. Valores semelhantes foram observados por Vieira & Lombardi Neto (1995), que analisaram a variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas para o Estado de São Paulo.

Os modelos foram ajustados aos semivariogramas; na Tabela 2 são apresentados os resultados das estimativas dos parâmetros (τ^2 , σ^2 e ϕ) da função de verossimilhança. Assim como classificação do grau da dependência espacial (GDE). Para atender a hipótese de estacionariedade, cujos dados têm média e variância considerados como constantes, foram usadas transformações. O expoente λ , da transformação Box-Cox para todos os parâmetros estudados, encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros do semivariograma no modelo exponencial para os parâmetros da função de distribuição de Gumbel e tempo de retorno 2 e 100 anos.

| Parâmetros | Parâmetros do modelo Gumbel | | Tempo de Retorno | |
|---------------------------------|-----------------------------|----------|------------------|----------|
| | β | α | 2 anos | 100 anos |
| Efeito pepita (τ^2) | 0,0708 | 0,0002 | 0,0025 | 0,0254 |
| Patamar ($\sigma^2 + \tau^2$) | 0,096 | 0,002 | 0,0251 | 0,8012 |
| Alcance (ϕ) | 0,5906 | 0,05877 | 0,8975 | 0,7758 |
| β_0 | 2,9538 | 0,4999 | 4,4793 | 5,1340 |
| GDE | 0,262 | 0,900 | 0,900 | 0,1988 |
| λ | -0,222 | -2,0 | -2,0 | -0,949 |

λ – é o expoente da transformação Box-Cox; GDE – é o grau da dependência espacial.

De acordo com o critério de Cambardella et al. (1994), o parâmetro β e a Pdma no tempo de retorno de 100 anos apresentou fraca dependência espacial, enquanto que o parâmetro α e a Pdma no tempo de retorno de 2 anos apresentou forte dependência espacial (Tabela 2). O efeito pepita da Pdma no tempo de retorno de 2 anos apresentou baixos valores quando relacionados ao tempo de retorno de 100 anos. Segundo Mello & Viola (2012), essa situação possivelmente está associada ao fato de que os eventos de chuvas intensas com menor tempo de retorno ocorrem com mais frequência e, portanto, são captados pela série histórica. A Pdma, bem como os parâmetros de Gumbel, apresentou dependência espacial, o que implica que a geoestatística foi apropriada para gerar mapas de variabilidade espacial dessas variáveis no Estado de São Paulo.

Para estimativa dos parâmetros de Gumbel e da Pdma, no tempo de retorno de 2 e 100 anos, em locais não amostrados, foram gerados mapas de distribuição espacial (Figuras 2 e 3), obtidos por interpolação por meio de krigagem, a partir dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas (Tabela 2). Os mapas dos tempos de retorno de 100 anos e β , quando escalonados, sobrepõem-se e indicam que as suas variabilidades espaciais são semelhantes; o mesmo acontece com o tempo de retorno de 2 anos e o parâmetro α .

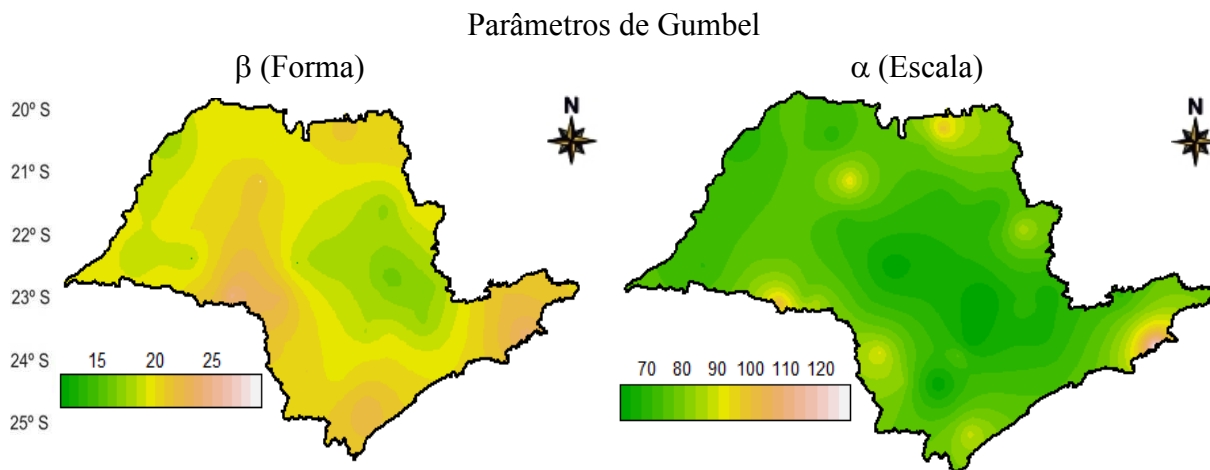


Figura 2. Mapas de precipitação diária máxima anual (mm) para os parâmetros da função de distribuição de Gumbel (β e α).

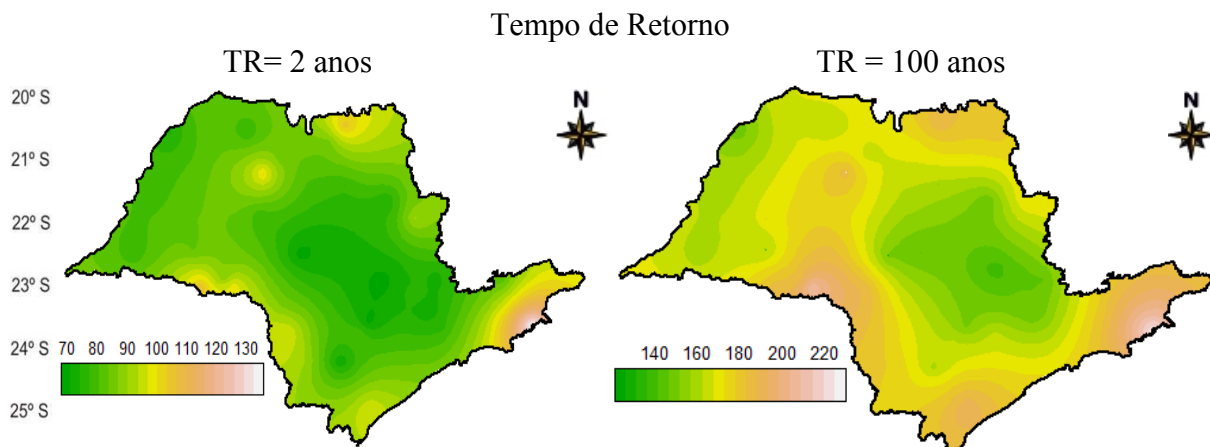


Figura 3. Mapas de precipitação diária máxima anual (mm) para os tempos de retorno de 2 e 100 anos.

Há uma tendência de elevação da altura de precipitação pluviométrica na região do litoral Sul e Norte do Estado de São Paulo. Devido a esta tendência, as estações de Ubatuba e Pariquera, localizadas ao longo da região litorânea, apresentaram os valores mais altos de precipitação pluviométrica. Esta tendência pode ser explicada pelo efeito orográfico causado pela orientação da Serra do Mar, faixa ao longo da linha de costa brasileira. De acordo com Smith & Barstad (2004), lugares com efeito orográfico apresentam maior umidade na massa de ar e, conseqüentemente, maior probabilidade de produzir chuvas com maior intensidade. As regiões Oeste e Norte apresentaram precipitações mais elevadas no Estado, quando comparadas com as regiões Central e Noroeste.

Ao analisar os mapas da Figura 2, em conjunto é possível distinguir três regiões. A primeira região está localizada a partir da Serra do Mar (litoral sul e litoral norte) até o litoral. A segunda está entre a Serra do Mar e o Oeste de São Paulo (Pedrinhas Paulista) estendida até a região Noroeste (cidade de Jaú). Já a terceira região está localizada na região Norte do Estado (cidades de Franca e Barretos).

É possível notar uma grande variação na magnitude das precipitações, com sensíveis alterações nos períodos de retorno. Segundo Machado et al. (2010), estes resultados indicam que uma seleção arbitrária de um evento específico de chuva em uma região, ou a utilização de um valor pertencente a outra região, durante um planejamento do projeto, é um procedimento inadequado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados revelaram que as Pdma, associadas aos seus respectivos tempos de retorno e os parâmetros de Gumbel, apresentam dependência espacial, do qual gerou mapas de Pdma para o no Estado de São Paulo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. V. P. et al. Análise dos métodos de estimação para os parâmetros das distribuições de Gumbel e GEV em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiana, v. 6, n. 1, fev. p. 32-43, 2013.
- BEIJO, L. A. **Distribuição de Gumbel: estudo de métodos de estimação dos parâmetros e ajuste aos dados de precipitação máxima de Lavras, MG**. 2002. 91f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Universidade Federal de Lavras, 2002.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**; Series B (Methodological), v.26, p.211-252, 1964.
- CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. **Model based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 230p.
- GUIMARÃES, R. C. **Probabilidade e estatística aplicada à hidrologia**. Universidade de Évora, Portugal 2011.
- HAAN, C. T. **Statistical methods in hidrology**. Ames: The Iowa State University, 1977. 377 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., **Cambridge Univ. Press**, Cambridge, U. K.
- MACHADO, R.L. et al. Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro state, Brazil. **Bragantia**, v.69, p.77-84, 2010.

MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R.. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, Feb. 2013.

NADARAJAH, S.; CHOI, D. Maximum daily rainfall in South Korea. **J. Earth Syst. Sci.**, v. 116, n. 4, p. 311-320, 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo horizonte: CRPM, 2007. 552p

R DEVELOPMENT CORE TEAM R, A language and environment for statistical computing, Vienna, **R Foundation for Statistical Computing**, 2013, URL [http://www,R-project.org](http://www.R-project.org).

RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. The geoR package functions for geostatistical data analysis: **R.News**, v.1, n.2, p.15-18, 2001.

SETZER, J. **Atlas climático e ecológico do estado de São Paulo**. São Paulo: CIBPU, 1966. 122 p.

SMITH, R.B.; BARSTAD, I. A linear theory of orographic precipitation. **Journal Atmospheric Sciences**. v.61 p.1377-1391. 2004.

TAMMETS, T; JAAGUS, J. Climatology of precipitation extremes in Estonia using the method of moving precipitation totals. **Theoretical and Applied Climatology** v.111, n.3-4 , p.623-639. 2013.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 405-412, 1995.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Application of soil physics**. New York, Academic Press, p.319-344. 1980.