



Geoestatística como ferramenta para análise espacial da precipitação para o Mato Grosso e seleção de modelos semivariográficos

Vanessa Rakel de Moraes Dias 1,2

Fernando da Silva Sallo 2

Luciana Sanches 2

Rivanildo Dallacort 1

¹ Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT
Campus Universitário de Tangará da Serra-MT
Centro de Pesquisas, Estudos e Desenvolvimento Agro-Ambientais
Rodovia MT 358, km 7, Bairro Jardim Aeroporto
78300-000 - Tangará da Serra - MT, Brasil
{vanessadias, rivanildo}@unemat.br

² Universidade Federal do Mato Grosso- UFMT
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental
Av. Fernando Correa da Costa, n. 2367, Boa Esperança
78060-900 - Cuiabá - MT, Brasil
fdss88@gmail.com
lsanches@ufmt.br

Resumo. O mapeamento da distribuição espacial da precipitação pluvial torna-se importante por possibilitar analisar tendências e alterações no decorrer do tempo em escalas locais e regionais, fundamentais no desenvolvimento de projetos ambientais e agrícolas. Assim, o objetivo do presente trabalho foi ajustar e selecionar modelos matemáticos semivariográficos para análise da variabilidade espacial da precipitação pluvial para o estado de Mato Grosso, referente aos meses de outubro a março para, posteriormente, representá-la por meio de mapas por técnicas de krigagem. Utilizaram dados de 155 estações pluviométricas no estado de Mato Grosso e algumas no entorno, com dados acima de 10 anos da Agência Nacional de Águas. Os semivariogramas foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ponderados e selecionados entre os modelos esférico, exponencial e gaussiano. O modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais pelo critério do desvio padrão dos erros reduzidos obtido pela validação cruzada e grau de dependência espacial foi o exponencial. Assim, a variabilidade espacial da precipitação pluvial pode ser, posteriormente, mapeada por técnicas de krigagem gerando-se mapas úteis em projetos ambientais e agrícolas, possibilitando a compreensão da distribuição espacial dessa variável tão importante do clima.

Palavras-chave: Análise espacial, geoestatística, mínimos quadrados ponderados, semivariograma.

Abstract. The mapping of the spatial distribution of rainfall becomes important for enabling analyze of trending and changes over time in local and regional scales and is fundamental in the development of environmental and agricultural projects. The objective of this work was to adjust and select semivariogram models to analyze the spatial variability of rainfall in the state of Mato Grosso during the months October to March. Thus, represent it through maps by kriging technique. The data used from 155 rainfall stations in the state of Mato Grosso and some in surrounding area. Only measurement data above 10 years of the National Waters Agency. The semivariograms were adjusted by the method of weighted least squares and selected among the spherical models, exponential and Gaussian. The model that best fit the experimental semivariogram by the standard deviation of the criterion of reduced errors obtained by cross-validation and spatial dependence is exponential. Thus, the spatial variability of rainfall can be further mapped by kriging techniques by generating useful maps in environmental and agricultural projects, enabling the understanding of the spatial distribution of this very important variable climate.

Key-words: Spatial analysis, semivariogram, geostatistics, weighted least squares

1. Introdução

A precipitação pluvial é uma variável do clima de fundamental importância que deve ser monitorada, tanto para planejamento ambiental, projetos agrícolas, construção civil, defesa civil, entre outros. E, apesar de existirem muitos postos de coleta, estes fornecem informações pontuais, sendo necessário o mapeamento da precipitação pluvial por meio de interpoladores espaciais. Para geração de mapas utiliza-se interpoladores, sendo que o interpolador geoestatístico é considerado superior a outros métodos de interpolação. No entanto, há necessidade de modelagem do melhor semivariograma possível antes da interpolação (Mello et al., 2005; Ribeiro Junior & Diggle, 2001).

Há necessidade da seleção de métodos e modelos variográficos que melhor representem a variável em questão. Assim, há vários métodos estatísticos, entre eles: mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados ponderados, máxima verossimilhança, máxima verossimilhança restrita, assim como vários modelos disponíveis em programas computacionais para ajustes de semivariogramas, entre eles: esférico, exponencial, gaussiano, wave, entre outros (R Core Team, 2015).

2. Objetivo

Neste contexto, objetivou-se ajustar e selecionar modelos matemáticos semivariográficos para análise da variabilidade espacial da precipitação pluvial para o estado de Mato Grosso, referente aos meses de outubro a março para, posteriormente, representá-la por meio de mapas por técnicas de krigagem.

3. Material e Métodos

Dados de precipitação pluvial

Foram selecionadas 155 estações hidrológicas instaladas no Mato Grosso e entorno, com dados de precipitação pluvial diária que foram obtidos no portal da Agência Nacional de Águas-ANA (Hidroweb, 2012), com séries históricas de no mínimo 10 anos. Como os meses de maior pluviosidade são de outubro a março, esses foram selecionados para o presente estudo. Em que se trabalhou com o percentil 75% porque aumenta o grau de confiabilidade na ocorrência de precipitação (Hann, 2001).

Geoestatística

A Teoria das Variáveis Regionalizadas foi desenvolvida por Matheron, baseado nas observações

de Krige, que em sua homenagem chamou o seu método de “krigagem” (interpolador geostatístico). Uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, com variação de um local a outro com continuidade aparente, porém essas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples (Burrough & McDonnell, 1998).

Uma variável em função das coordenadas geográficas é considerada regionalizada e pode variar continuamente no espaço geográfico. Cada valor observado $Z(x_i)$ nos locais $x_i, i = 1, 2, \dots, n$, em que x_i denota a coordenada geográfica em duas dimensões, é considerada uma realização das variáveis aleatórias $Z(x)$. O conjunto de variáveis aleatórias constitui uma função aleatória ou processo estocástico (McBratney & Webster, 1986). A metade da esperança da variância entre pares de pontos separados por uma distância ‘ h ’ é definida como semivariância e representada pelo modelo clássico, segundo a equação abaixo:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

em que $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância estimada para cada distância (lag) entre pares de pontos, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $z(x_i), z(x_i + h)$, separados pela distância h (Burrough & McDonnell, 1998).

Pelo modelo variográfico ajustado pode-se descrever padrões espaciais e prever valores em locais não amostrados por meio de krigagem. Então, foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano aos semivariogramas experimentais, pelo método dos mínimos quadrados ponderados. Os três modelos estão abaixo:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 < h < a \\ C_0 + C_1, & h \geq a \end{cases} \quad (\text{esférico})$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right\} \quad (\text{exponencial})$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (\text{gaussiano})$$

em que ‘ C_0 ’ é o efeito pepita, ‘ $C_0 + C_1$ ’ o patamar, ‘ a ’ o alcance e ‘ h ’ a distância.

Para seleção do modelo matemático que melhor se ajustou ao semivariogramas experimentais foram utilizados o grau de dependência espacial (GD) e a validação cruzada.

O grau de dependência espacial foi calculado pela razão entre a variância estrutural (C_1) e o patamar ($C_0 + C_1$), sendo que valores abaixo de 25%, o semivariograma é considerado fraco; valores entre 25% e 75%, é considerado moderado; e acima de 75%, é considerado forte (Mello, 2004).

A técnica de validação cruzada foi utilizada como critério de comparação, que consiste em retirar temporariamente do conjunto de dados um valor observado e estimá-lo a partir dos outros, esse processo é feito para todos os valores observados. Posteriormente, foi calculado o

desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) (Cressie, 1993), segundo a equação:

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma_{i0}} \right)^2}$$

em que $z(x_{i0})$ é o valor observado no ponto $i0$, $\hat{z}(x_{i0})$ é o valor estimado para o ponto $i0$ e $\sigma(x_{i0})$ é o desvio padrão da krigagem no ponto $i0$. O desvio padrão dos erros reduzidos deve ser próximo de um.

Selecionado o melhor método de estimação para verificar a dependência espacial, procedeu-se a construção de mapas utilizando-se a krigagem ordinária como interpolador, possibilitando a visualização da variabilidade espacial da precipitação pluvial.

Foi utilizado o programa R (R Core Team, 2015) e o pacote de análises geoestatísticas geoR (Ribeiro & Diggle, 2016).

4. Resultados e Discussão

Os semivariogramas experimentais da precipitação pluvial decendial, de outubro a março, em Mato Grosso, foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ponderados.

Foram ajustados os modelos esféricos, exponenciais e gaussianos que estão apresentados na **Tabela 1**, assim como estão apresentados os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (a), e os valores de desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e grau de dependência espacial (GD) que são os critérios para seleção do melhor modelo selecionado.

Tabela 1. Parâmetros dos modelos dos semivariogramas esférico, exponencial e gaussiano, desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e grau de dependência espacial (GD) para os decêndios de outubro a março da precipitação pluvial no Mato Grosso.

Mês	Decêndio	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	S_{ER}	GD (%)
OUTUBRO	1º	esférico	17,75	72,40	1097316	1,100	75,48
		exponencial	18,23	109,59	1090000	1,077	83,37
		gaussiano	22,00	72,36	516575	1,205	69,60
	2º	esférico	25,88	83,38	1080000	1,084	68,95
		exponencial	25,34	125,09	1080000	1,079	79,74
		gaussiano	29,00	85,59	535209	1,150	66,12
	3º	esférico	32,92	124,62	939999	1,068	73,58
		exponencial	34,55	186,33	940000	1,042	81,46
		gaussiano	35,00	127,55	458513	1,230	72,56
NOVEMBRO	1º	esférico	45,78	95,30	1100000	1,031	51,96
		exponencial	45,32	133,55	1140000	1,028	66,07
		gaussiano	49,00	103,17	632234	1,079	52,51
	2º	esférico	57,03	108,54	600000	1,037	47,46
		exponencial	62,72	130,44	600000	1,004	51,91
		gaussiano	62,00	114,39	401186	1,075	45,80
	3º	esférico	62,09	145,89	760000	1,009	57,44
		exponencial	63,20	167,41	500022	0,985	62,25
		gaussiano	63,00	146,03	351908	1,105	56,86

DEZEMBRO	1º	esférico	68,24	175,02	950000	1,039	61,01
		exponencial	70,94	246,32	970000	1,021	71,20
		gaussiano	80,00	185,47	540103	1,051	56,87
	2º	esférico	96,64	269,63	1063621	1,061	64,16
		exponencial	96,70	367,68	950000	1,052	73,70
		gaussiano	119,00	272,26	529636	1,052	56,29
	3º	esférico	81,09	493,67	1388271	1,144	83,57
		exponencial	72,19	810,01	1390000	1,169	91,09
		gaussiano	111,00	469,35	599539	1,175	76,35
JANEIRO	1º	esférico	82,44	353,15	911371	1,064	76,66
		exponencial	93,54	551,44	990000	1,017	83,04
		gaussiano	112,00	358,21	453480	1,095	68,73
	2º	esférico	74,00	163,17	477683	1,011	54,65
		exponencial	73,00	175,95	241907	0,978	58,51
		gaussiano	76,00	159,21	187879	1,071	52,27
	3º	esférico	69,00	130,62	300000	1,089	47,18
		exponencial	65,00	143,29	181106	1,061	54,64
		gaussiano	67,00	132,16	151616	1,147	49,30
FEVEREIRO	1º	esférico	60,00	217,81	482992	1,175	72,45
		exponencial	61,00	240,35	240824	1,098	74,62
		gaussiano	64,00	204,61	175582	1,333	68,72
	2º	esférico	79,66	165,62	373984	1,102	51,90
		exponencial	80,00	166,34	130785	1,039	51,91
		gaussiano	86,00	165,68	177591	1,146	48,09
	3º	esférico	41,00	109,49	525629	1,123	62,55
		exponencial	42,00	144,15	438740	1,090	70,86
		gaussiano	43,00	107,97	235603	1,244	60,18
MARÇO	1º	esférico	73,00	237,29	522831	1,083	69,24
		exponencial	75,50	311,61	412095	1,051	75,77
		gaussiano	76,00	228,38	215931	1,245	66,72
	2º	esférico	60,00	151,73	419139	1,083	60,46
		exponencial	66,00	170,78	470001	1,022	61,35
		gaussiano	59,00	148,08	164678	1,186	60,16
	3º	esférico	68,91	127,94	300007	1,241	46,14
		exponencial	67,00	148,88	300004	1,241	55,00
		gaussiano	66,00	127,71	129999	1,241	48,32

Para selecionar um modelo variográfico não é suficiente apenas a análise do comportamento dos semivariogramas, pois essa é uma avaliação subjetiva. Assim, o desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) obtido pela validação cruzada e o grau de dependência espacial (GD) foram utilizados como uma forma de avaliação mais objetiva. Os resultados de S_{ER} para o modelo exponencial foram próximos de “um”, assim podem ser considerados acurados e precisos para todos os semivariogramas analisados.

Por estes dois critérios fica evidente a superioridade do modelo exponencial em relação aos outros modelos. Este apresentou melhor desempenho que o esférico e o gaussiano.

Nas **Figuras 1 e 2** estão apresentados os semivariogramas selecionados e ajustados pelo

modelo exponencial da precipitação pluvial para cada decêndio referente aos meses de outubro a março.

Pelo critério de dependência espacial, valores menores que 25% o grau de dependência espacial é considerado fraco, entre 25% e 75% moderado e acima de 75% forte. Dos semivariogramas ajustados pelo modelo exponencial, 67% apresentaram dependência espacial moderada e 33% forte.

O comportamento do alcance está associado à existência de estrutura de dependência espacial, ou seja, é uma distância em que há correlação espacial entre os locais da variável em questão. Como o modelo selecionado foi o exponencial, o alcance referente a este modelo variou entre 130785 a 1390000 m, no segundo decêndio de fevereiro e no terceiro decêndio de dezembro, respectivamente. Estes valores representam a extensão da estrutura de dependência espacial da precipitação pluvial no Mato Grosso e entorno, sendo que dezembro cobre praticamente todo o estado.

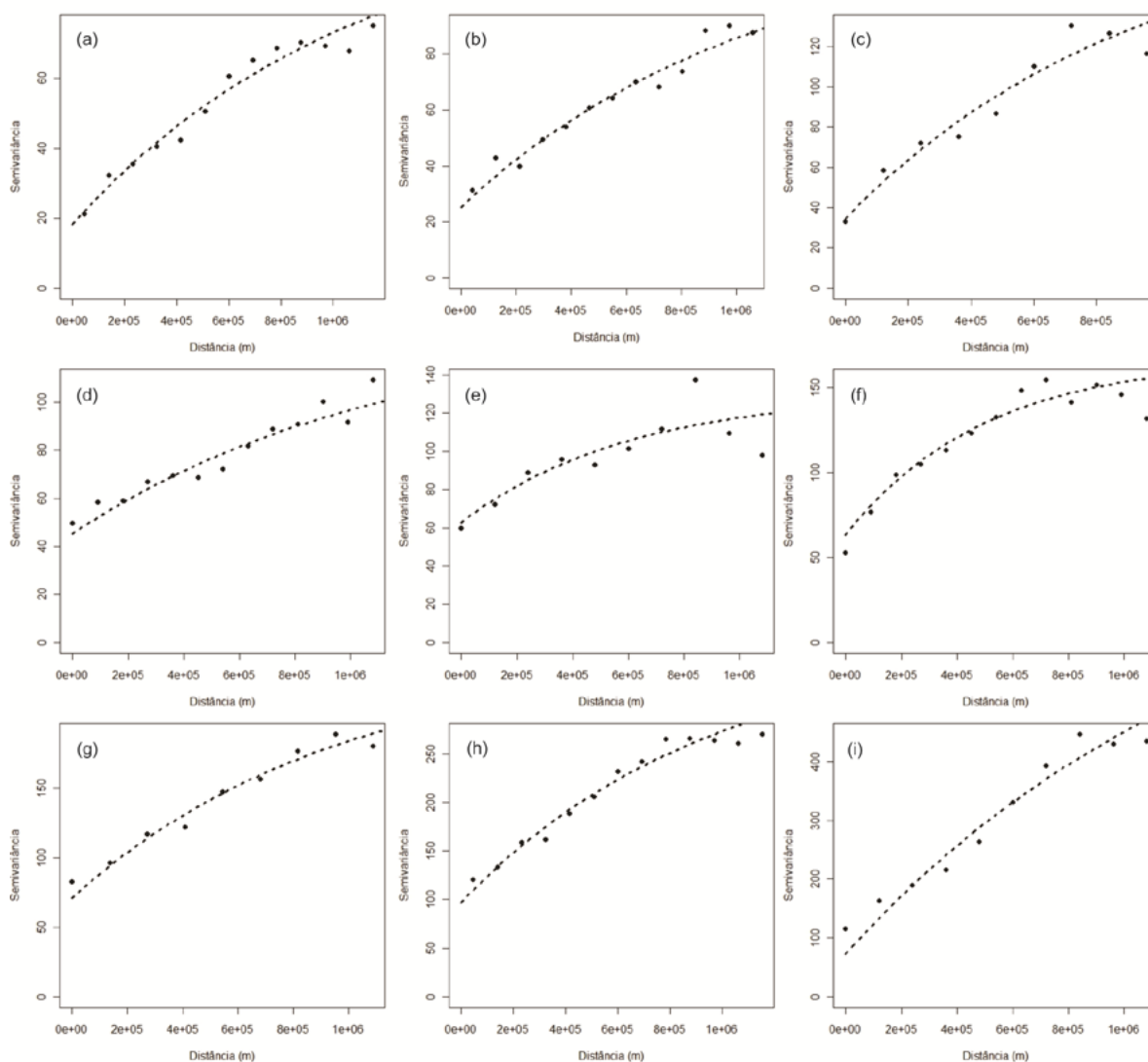


Figura 1. Semivariogramas experimentais referente à precipitação pluvial decenal no Mato Grosso, ajustados ao modelo exponencial, do 1º, 2º e 3º decêndio de outubro (a, b, c), novembro (d, e, f) e dezembro (g, h, i), respectivamente.

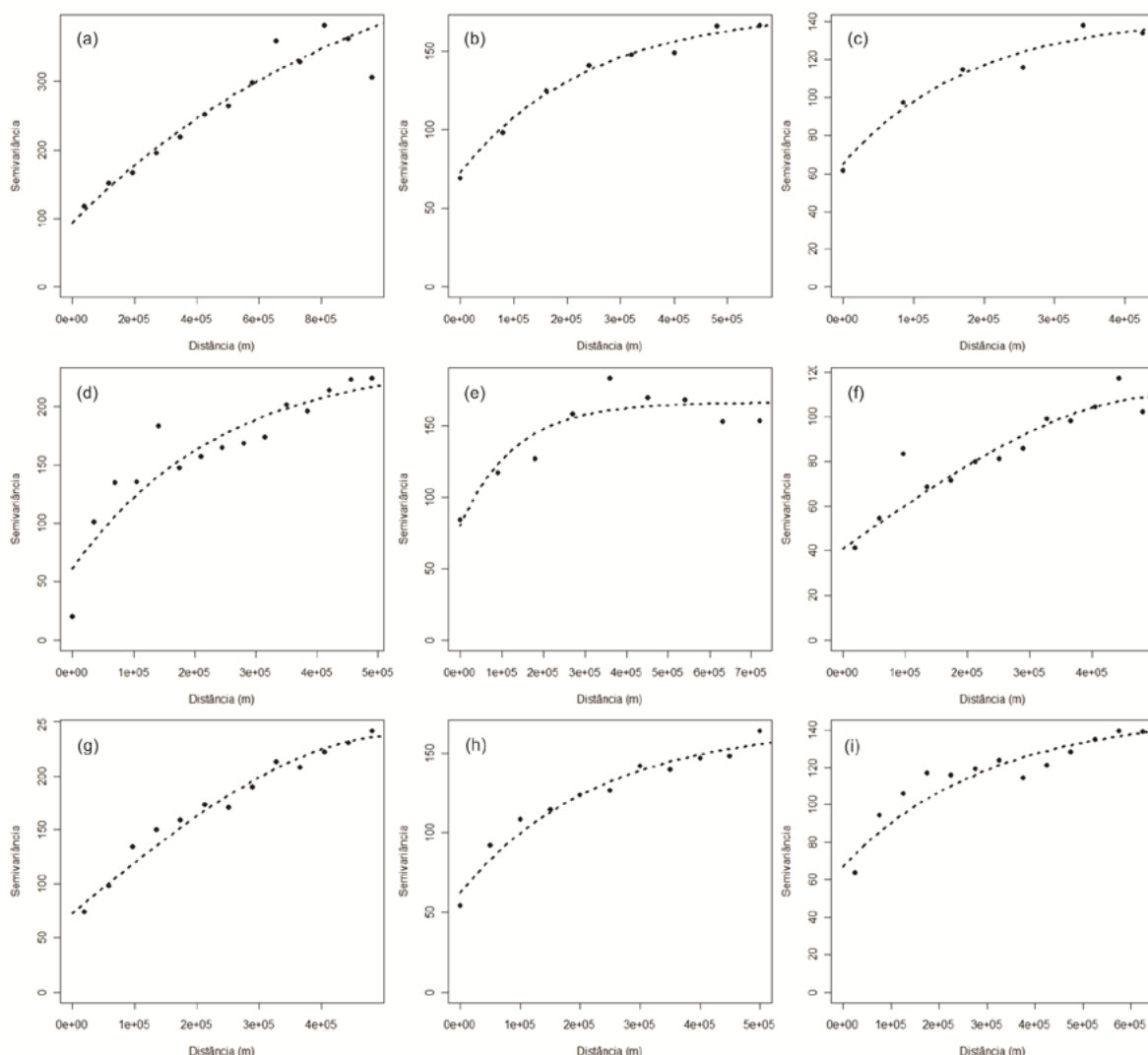


Figura 2. Semivariogramas experimentais referente à precipitação pluvial decenal no Mato Grosso, ajustados ao modelo exponencial, do 1º, 2º e 3º decêndio de janeiro (a, b, c), fevereiro (d, e, f) e março (g, h, i), respectivamente.

Modelos variográficos ajustados para precipitação pluvial do estado de Minas Gerais foram ajustados e selecionado o modelo exponencial como aquele com melhor desempenho em relação aos demais (Mello et al., 2008).

Para chuvas intensas no estado de São Paulo foram avaliados dois interpoladores distintos. Sendo que o método geoestatístico foi superior ao outro método, e o modelo exponencial foi ajustado pelo método da tentativa e erro, gerando mapas precisos por meio de krigagem. Os autores concluíram que os resultados foram precisos e que o método deve ser aplicado quando possível (Mello et al., 2003).

Carvalho et al. (2004), também estudando o comportamento espacial da precipitação no estado de São Paulo, porém com dados de precipitação pluvial média anual de 379 estações pluviométricas, comparou diferentes modelos de ajuste de semivariograma e o exponencial foi superior aos demais.

Estes resultados corroboram a escolha do modelo exponencial no presente estudo como modelo com melhor desempenho.

5. Conclusões e sugestões

O modelo semivariográfico que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais da precipitação pluviométrica decenal de Mato Grosso, de outubro a março, foi o exponencial. Sendo este selecionado por validação cruzada e pelo grau de dependência espacial para descrever a estrutura de dependência espacial da precipitação.

Assim, a variabilidade espacial da precipitação pluviométrica pode ser, posteriormente, mapeada por técnicas de krigagem gerando-se mapas úteis em projetos ambientais e na agricultura, possibilitando a compreensão da distribuição espacial dessa variável tão importante do clima.

6. Agradecimentos

Agradecemos à Agência Nacional de Águas (ANA) pela disponibilização de dados no website (<<http://hidroweb.ana.gov.br>>).

7. Referências

Burrough, P. A.; McDonnell, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333p.

Carvalho, J. R. P. de; Vieira, S. R.; Vendrusculo, L. G. **Uso da técnica de mínimos quadrados ponderados para ajuste de modelos as semivariograma**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2004. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento).

Cressie, N. **Statistics for spatial data**. New York: Wiley. 1993.

Hann, C. T. **Statistical Methods in Hydrology**. 2.ed. Ames: The Iowa State University Press, 2002. 377p.

Hidroweb. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em 25 jun. 2012.

Mcbratney, A. G.; Webster, A. G. Choosing functions for semi-variograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v. 37, p. 617-639, 1986.

Mello, C. R. de; 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**, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.

Mello, C. R. De; Viola, M. R.; Mello, J. M.; Silva, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.2, p. 532-539, 2008.

Mello, J. M.; Batista, J. L. F.; Ribeiro Junior, P. J.; Oliveira, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 1, n. 1, p. 25-37, 2005.

Ribeiro, P. J.; Diggle, P. J. (2016). **geoR: Analysis of Geostatistical Data**. R package version 1.7-5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

R Core Team (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.