



## Interpolação espacial da precipitação no estado de Alagoas utilizando técnicas geoestatística

Henderson Silva WANDERLEY<sup>1</sup>, Ricardo Ferreira Carlos de AMORIM<sup>2</sup>, Frede de Oliveira CARVALHO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Discente do Prog. de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola pela Univ. Fed. de Viçosa, Viçosa-MG, Bra. e-mail: [henderson.wanderley@ufv.br](mailto:henderson.wanderley@ufv.br)

<sup>2</sup>Profº Dr. Instituto de Ciências Atmosféricas da Univ. Fed. de Alagoas, Maceió-Al, Bra. e-mail: [rffcamorim@gmail.com](mailto:rffcamorim@gmail.com)

<sup>3</sup>Profº Dr. Unidade Acadêmica de Tecnologia da Univ. Fed. de Alagoas, Maceió-Al, Bra. e-mail: [fredecarvalho@yahoo.com.br](mailto:fredecarvalho@yahoo.com.br)

---

### Resumo

O objetivo deste artigo foi investigar a utilização de técnicas geoestatísticas no estudo da variabilidade espacial de dados pluviométricos para estado de Alagoas, mediante análise da dependência espacial, variograma, técnica de krigagem ordinária e da validação cruzada. Foi utilizado o total anual médio da precipitação de 63 estações pluviométricas no período de 1965 a 1980. A utilização da geoestatística mostrou que as características estruturais da precipitação estão correlacionadas e apresentaram forte dependência espacial. A distribuição espacial da precipitação apresentou variabilidade espacial, com totais pluviométricos que variaram de 500 mm/ano na região do sertão e 2.000 mm/ano no litoral.

**Palavras-chave:** Geoestatística, variograma, krigagem, validação cruzada.

### Abstract

The objective this paper was to investigate the uses of geostatistic technical in the study of the spatial variability of pluviometric data for the Alagoas State, with analysis of the spatial dependence through isotropic variograms of ordinary kriging technique and of cross-validation. For the study, we selected the average total annual rainfall 63 pluviometric stations from period 1965 to 1980. The use of geostatistic has shown that structural characteristics of precipitation are correlated and have strong spatial dependence. The spatial distribution of precipitation showed spatial variability with rainfall totals ranging from 500 mm/year in the wilderness region and 2000 mm/year in the coast region.

**Keywords:** geostatistic, variograms, kriging, cross-validation.

---

### Introdução

Na região tropical a precipitação caracteriza e determina as denominadas estações secas e chuvosas, e o conhecimento de sua variabilidade espacial e temporal torna-se fundamental para obter os padrões definidores do regime hidrológico, influenciando de uma maneira geral, na climatologia local e regional, bem como, apresentarem uma variabilidade representativa quanto à distribuição dos regimes pluviométricos.

Para compreender essa variabilidade, há necessidade de se ter informações provenientes de estações de medições de superfície e de altitude. No entanto, para algumas regiões do nordeste brasileiro, essas informações são escassas e até mesmo inexistentes, tornando difícil uma análise específica, devido estas localidades não apresentam estações de medição.

Igualmente, o banco de dados de várias estações apresenta falhas, as quais dificultam o processo de entendimento de sua variabilidade de acordo com a época do ano e sub-regiões, como Litoral, Agreste e Sertão. Essas localidades apresentam peculiaridades em função da distribuição anual da precipitação.

Deste modo, torna-se necessário obter, para essas regiões, informação tanto espacial quanto temporal utilizando técnicas de interpolação. Uma vez que, o processo de interpolação permite construir informações a partir de um conjunto discreto de dados pontuais previamente conhecidos.

Para o Nordeste Brasileiro, região com histórico secular das secas, a qual rotineiramente é responsável por causar impactos econômicos e perdas expressivas na agricultura e pecuária. A representação da distribuição das chuvas é essencial na tentativa de mitigar a ação da seca para estados como o de Alagoas, maior produtor de cana-de-açúcar do Nordeste.



**Haberlandt (2007, p. 145)** e **Bargaoui e Chebbi (2009, p. 58)** destacaram a utilização da geoestatística em ciências ambientais e naturais no estudo da distribuição da precipitação, bem como, a aplicação de geoestatística, utilizada como técnica de krigagem para gerar informações espaciais.

**Veer et al. (2009, p. 179)** ratificaram que apesar da existência de outros métodos de interpolação, a utilização da técnica de krigagem vem demonstrando resultados realistas e condizentes quando comparados com outros métodos de interpolação. Esse método de interpolação é precedido da utilização do variograma, que expressa à dependência entre as amostras. Havendo a dependência espacial, se utiliza a krigagem.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi investigar a utilização de técnicas geoestatística no estudo da variabilidade espacial da precipitação para estado de Alagoas, mediante análise da dependência espacial por meio de variograma, da técnica de krigagem ordinária e validação cruzada.

## Material e Métodos

O estudo foi realizado no Estado de Alagoas, o qual localiza-se na região leste do nordeste brasileiro. O Estado está dividido em seis microrregiões ambientais: Litoral, Zona da Mata, Agreste, Sertão, Sertão do São Francisco e Baixo São Francisco, Figura 1.

**Figura 1:** Estado de Alagoas e suas microrregiões.

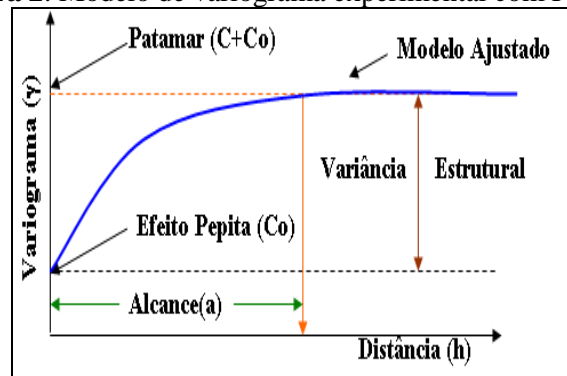


Para o estudo, foi utilizado o total anual médio de precipitação (mm/ano) compreendidos entre os anos de 1965 a 1980, procedentes do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), proveniente de 63 estações pluviométricas, especialmente distribuídas por todas as microrregiões do Estado.

Neste estudo foram analisados os modelos isotrópicos experimental de variogramas (ou semi-variogramas) dos tipos esférico, exponencial e gaussiano, ambos com patamar, com a análise de seus parâmetros: patamar ( $C + C_0$ ), efeito pepita ( $C_0$ ), alcance ( $a$ ) e variância estrutural ( $C$ ), Figura 2. Segundo **Zamboti (2001, p. 35)** esses tipos variogramas vêm demonstrando resultados satisfatórios em estudos sobre precipitação.



**Figura 2:** Modelo de variograma experimental com Patamar.



No variograma, o patamar ( $C + C_0$ ) é ponto no qual a função se estabiliza no variograma, valor do variograma correspondente ao alcance ( $a$ ), deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras.

O efeito pepita ( $C_0$ ) corresponde ponto onde o variograma toca o eixo das ordenadas, esse ponto revela a descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. A variância estrutural ( $C$ ) é compreendida pela diferença entre o patamar ( $(C + C_0)$ ) e o efeito pepita ( $C_0$ ).

A representação matemática do variograma  $2\gamma(h)$  é definida pelo quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância  $h$ , Eq. (1) **Shoji e Kitaura (2006, p. 1010)**.

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

em que

$N(h)$  = número de pares de valores amostrados  $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$  separados pelo vetor  $h$ .

O modelo esférico de variograma é o que geralmente explica grande parte dos fenômenos estudados, **Benavides et al. (2007, p.178)**. Neste modelo, o patamar e o alcance são claramente identificados e geralmente o efeito pepita é pequeno em relação a este patamar, Eq. (2).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[ 1,5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h < a \\ C_0 + C_1 & h \geq a \end{cases} \quad (2)$$

O modelo exponencial apresenta um crescimento menos acentuado da origem para o patamar, o qual não se pode dizer que o modelo atinge realmente o patamar, Eq. (3).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-ha^{-1})] \quad h > 0 \quad (3)$$

em que

$d$  é a máxima distância na qual o variograma é definido.

O modelo gaussiano apresenta boa continuidade na variabilidade à medida que os pontos se afastam entre si. Neste modelo, se o efeito pepita é pequeno a estrutura de variabilidade cresce de uma maneira bastante suave, Eq. (4).



$$y(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-ha^{-1})^2] \quad h > 0 \quad (4)$$

Os parâmetros obtidos com o ajuste dos variogramas foram utilizados para calcular o Índice de Dependência Espacial (IDE) para a precipitação, propostos por **Trangmar et al. (1985, p. 63)** e **Zimback (2001, p. 47)**, Eqs. (5 e 6) respectivamente, com os intervalos definidos por **Cambardella et al. (1994, p. 1505)** e modificados por **Zimback (2001, p. 47)**.

$$IDE (\%) = \frac{C_0}{c+C_0} \times 100 \quad (5)$$

em que

- ≤ 25% - fraca dependência espacial
- entre 25% e 75% - moderada dependência espacial
- ≥ 75% - forte dependência espacial

$$IDE (\%) = \frac{c}{c+C_0} \times 100 \quad (6)$$

em que

- ≤ 25% - forte dependência
- entre 25% e 75% - moderada dependência
- ≥ 75% - fraca dependência

Para a interpolação da precipitação o método de krigagem ordinária (KO) foi utilizado neste estudo por apresentar resultados satisfatórios quando comparadas com os outros tipos de krigagem (**LANDIM, 2006, p. 25; ALSAMAMRA et al., 2009, p. 1351**).

O método de krigagem ordinária pode ser escritos em notação matricial, Eq. 7.

$$K.v = M \gg v = K^{-1}.M \quad (7)$$

em que

$K$  e  $M$  são matrizes das covariâncias (ou variogramas) e  $v$  o vetor do peso. No caso da krigagem ordinária as matrizes são assim definidas.

A vantagem principal é que os dados usados descrevem o grau de influência e da forma da dependência espacial modelada a qual atribui pesos às observações. **Lluyd (2005, p. 138)** comenta que os pesos são atribuídos arbitrariamente pela Eq. (8).

$$Z(x_i) = f(x_i) + e(x_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

em que

$f(x_i)$  = função aleatória  $F$  num ponto  $x_i$ ;  $e(x_i)$  são realizações médias de zero e erros.

A correlação espacial entre os pontos de medida pode ser quantificada por meio da função de variância, Eq. (9).

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Z(x_i) - Z(x_j))^2 \right] \quad (9)$$

Para verificar qual entre os modelos de variograma utilizado foi o que melhor descreveu o comportamento espacial das propriedades da precipitação, foi utilizado o método de validação cruzada. O processo de validação cruzada permite através de um procedimento interpolativo, como o de krigagem, estimar valores de dados amostrais.

Este procedimento retira do conjunto de dados, valores conhecidos  $Z(x_i)$  e o estima  $Z^*(x_i)$ ,



repetindo o processo para todo o conjunto de dados. Obtendo assim, dois valores para cada ponto, o real e o estimado, a diferença entre os valores é definida como erro na estimativa, ou cálculo da validação cruzada. Segundo Martin e Simpson (2004) a regressão linear dos valores é obtida pela Eq. (10).

$$Z^*(x_i) = a + bZ(x_i) \quad (10)$$

em que

$a$  intercessão e  $b$  coeficiente angular da reta.

Os resultados obtidos com a utilização da validação cruzada foram avaliados através do erro absoluto médio (EAM) e desvio padrão, Eqs. (11) e (12), respectivamente.

$$EAM = \sum_{i=1}^n n^{-1} |Z(x_i) - Z^*(x_i)| \quad (11)$$

$$DP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \bar{Z})^2} \quad (12)$$

## Resultados e Discussões

Nos resultados obtidos com a utilização dos variogramas observou-se que os três modelos teóricos escolhidos, esférico, exponencial e gaussiano, apresentaram resultados satisfatórios. Entretanto, dois destes modelos, esférico e exponencial, demonstraram melhor ajuste de sua curva aos dados de precipitação. Também foi verificado para ambos os modelos, os valores representativos e satisfatórios dos índices de dependência espacial (IDE), demonstrados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Parâmetros variográficos (efeito pepita (Co), patamar (C + Co), variância estrutural (C) e alcance (a) e IDE (Índice de Dependência Espacial).

Modelos	C <sub>0</sub>	C+C <sub>0</sub>	C	a	IDE (%)	
					Zimback	Cambadella
Esféricos	0,01	1,50	1,49	90	99,33	0,66
Exponencial	0,01	2,24	2,23	87	99,33	0,66
Gaussiano	0,09	1,54	1,44	82	93,84	6,15

Nos parâmetros variográficos, o efeito pepita (Co), para ambos os modelos, apresentou valores próximo de zero. Como o efeito pepita reflete as variações à pequena escala não detectadas pela amostragem, devido à presença de erros na medição; os dados não apresentam erros significativos ou variações nas medições, que compromettesse a utilização dos dados neste estudo.

O patamar (C+Co) e a variância estrutural (C) apresentaram-se com valores iguais da escala do variograma, devido ao efeito pepita (Co) resultar em número muito próximo a zero, o que recomendado na literatura.

O índice e dependência espacial (IDE) calculados pelos métodos descritos por **Cambardella et al. (1994, p. 1505)** e **Zimback (2001, p. 47)**, para o modelo esférico e exponencial demonstraram valores de 0,66 e 99,33, respectivamente, comprovando forte dependência espacial para os intervalos propostos pelos os autores, entre 0 e 100%.

O alcance obtido pelos modelos de variogramas variaram entre 82 e 90 Km. Resultados condizentes com os obtidos por **Mello et al. (2003, p. 930)** e **Haberlandt (2007, p. 152)** que oscilaram de 80 a 140 Km. Essa distância expressa à área máxima de influência da variável em estudo, após essa distância, as amostras tornam-se independente, não sendo mais caracterizada a dependência espacial.



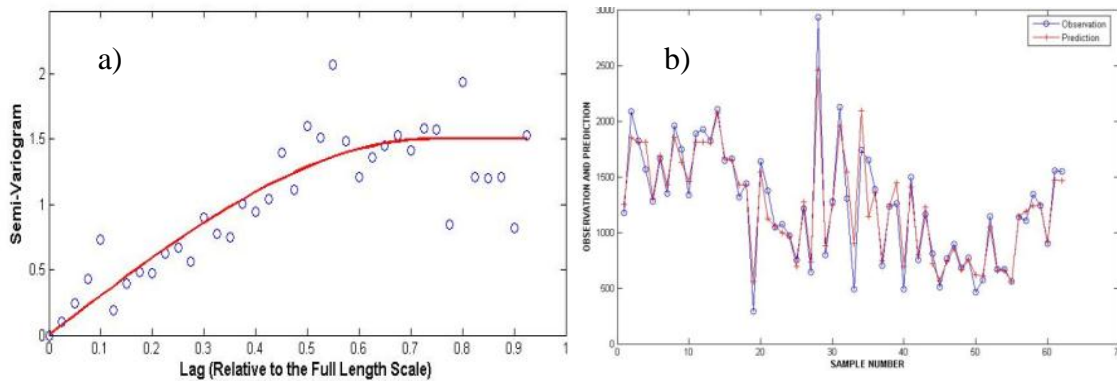
Os respectivos valores do erro absoluto médio (EAM) e do desvio padrão (DP) obtidos pela validação para os variogramas são apresentados na Tabela 2. A estimativa feita através do variograma esférico obteve os menores valores para o EAM e para o DP, adotando seus resultados para a interpolação da precipitação através da krigagem ordinária.

**Tabela 2:** Erro absoluto médio (EAM) e desvio padrão dos modelos de variogramas.

Esférico		Exponencial		Gaussiano	
EAM	DP	EAM	DP	EAM	DP
0,05	151,67	0,13	152,57	0,90	268,17

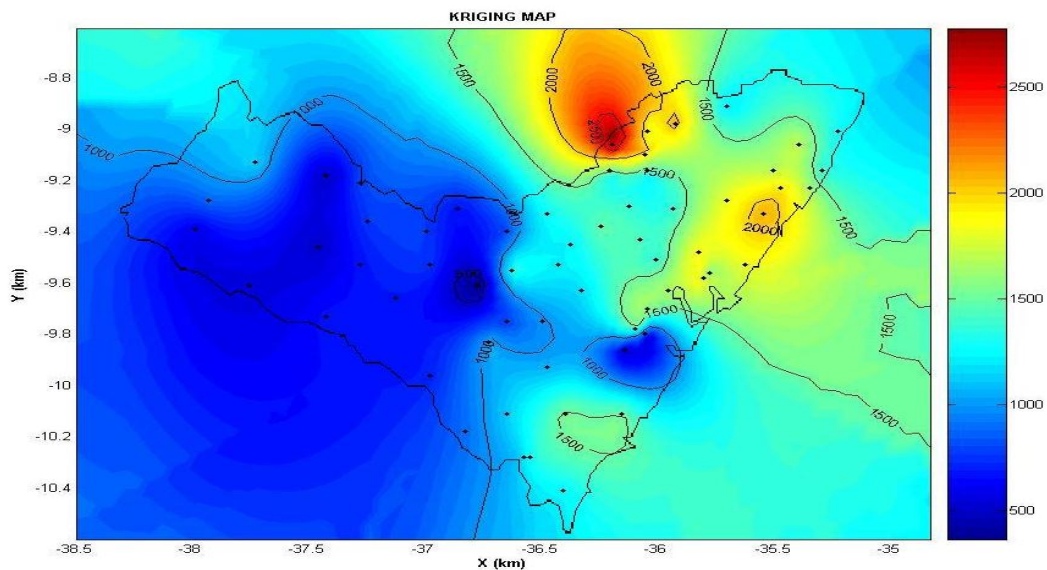
Na Figura 3 é demonstrado o ajuste do modelo esférico de variograma, modelo este, que apresentou melhores resultados nos cálculos pela validação cruzada. A validação cruzada referente ao variograma esférico pode ser observada na Figura 4.

**Figura 3:** a) Modelo de variograma esférico ajustado ao dado precipitação; b) Validação cruzada correspondente modelo esférico de variograma.



A precipitação anual obtida pelo método de krigagem ordinária para Alagoas apresentou grande variabilidade espacial, (Figura 4). Na distribuição da precipitação observou a influência direta do fluxo de umidade proveniente do oceano Atlântico sobre o Litoral e a Zona da Mata alagoana, regiões que apresentaram precipitação de até 2000 mm/ano, com grande potencial agrícola.

**Figura 4:** Interpolação da precipitação para o Estado de Alagoas através do método de krigagem ordinária.





Nestas localidades notam-se precipitações acima de 1.500 mm/ano em quase toda a região nordeste do Estado, sendo observados os maiores totais de chuva no litoral norte destas regiões. A precipitação diminui de forma significativa quando alcança a parte central do Estado, sendo o Agreste uma região de transição, divisor agrícola. A leste do agreste, índices pluviométricos superiores a 1.000 mm/ano, e inferiores a oeste.

O Sertão e o Sertão do São Francisco alagoano, quase que em sua totalidade, não apresenta índice pluviométricos superiores a 1.000 mm/ano. A escassez de chuva nesta região é um dos principais responsáveis para o comprometimento agrícola, principalmente entre os meses de outubro a janeiro, período de índices pluviométricos inferior a 50 mm. Essa variabilidade também foi observada por **Quadro (2005, p. 7)** com precipitação acumulada, no interior e na costa leste da região Nordeste inferior a 500 mm/ano superior a 1.500 mm/ano.

Como a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o Nordeste Brasileiro está relacionada com mudanças nas configurações de circulação atmosférica e com a interação oceano-atmosfera, o sertão sofre menor influência de sistemas locais decorrentes na interação oceano-atmosfera, como as brisas marítimas e terrestres.

No Nordeste a precipitação está diretamente relacionada com a convecção local (**MOLION e BERNARDO, 2002, p. 8**). Sendo essa caracterizada por movimentos ascendentes de ar úmido, resultante da ocorrência de pressões atmosféricas mais baixas, junto à superfície terrestre, seja em consequência do aquecimento do ar em contato com essa superfície, sejam pela ação de fenômenos transientes, de caráter puramente dinâmico, como sistemas frontais, e perturbações ondulatórias no campo dos ventos.

A pluviometria do Nordeste está relacionada com fenômenos de micro a macroescala, que são constituídos por circulações orográficas, células convectivas, sistemas frontais, associados à convergência de umidade dos ventos Alísios e dos sistemas de circulação das brisas, zona de convergência intertropical (ZCIT), vórtices ciclônicos de altos níveis (VCANs), fenômenos de La Niña e El Niño/Oscilação Sul (ENOS), são os principais mecanismo produtor de chuvas do Nordeste (**RAO et al., 1993, p. 1760**).

Pela sua localização no leste no Nordeste, o estado de Alagoas possui sua variabilidade pluviométrica regida por esses sistemas a cimas referenciados, sendo a sua principal estação chuvosa compreendida entre os meses de abril a julho, podendo ocorrer neste período até 60% da chuva anual.

## Conclusões

O modelo esférico apresentou melhor ajuste aos dados de precipitação, demonstrado através da validação cruzada, com pequeno efeito pepita e região de dependência espacial de 90 Km. Os índices de dependência espacial obtida no estudo, por ambos os métodos, demonstraram forte dependência espacial.

A estimativa da precipitação obtida pelo método de Krigagem Ordinária apresentou resultados satisfatórios, estando condizentes com as características climatológica da região. O acumulado anual da precipitação apresentou grande variabilidade espacial quanto à distribuição da precipitação.

## Referências

- ALSAMAMRA, H.; RUIZ-ARIAS, J. A.; POZO-VÁZQUEZ, D.; TOVAR-PESCADOR, J. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 149, p. 1343-1357, 2009.
- BARGAOUI, K. K.; CHEBBI, A. Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. **Journal of Hydrology**. v. 365, p. 56-73, 2009.
- BENAVIDES, R.; MONTES, F.; RUBIO, A.; OSORO, K. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 146, p. 173-188, 2007.



- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Scienc.** v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- HABERLANDT, U. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. **Journal of Hydrology.** v. 332, p. 144–157, 2007.
- LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática.** v. 2. p. 19-33, 2006.
- LLUYD, C. D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. **Journal of Hydrology.** v. 308, p. 128-150, 2005.
- MARTIN, J. D.; SIMPSON, T. W. **On the use of kriging models to approximate deterministic computer models.** ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. September 28 - October 2, 2004.
- MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para a interpolação dos parâmetros da equação de chuva intensas. **Rev. Bras. Ci. Solo.** v. 27. p. 925-933, 2003.
- MOLION, L. C. B. e BERNARDO, S. O. Uma revisão das dinâmicas das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v. 17, n.1, p. 1-10, 2002.
- QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; OLIVEIRA, G. S. **Climatologia de precipitação e temperatura.** Centro de previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE, p. 2-11. 2005.
- RAO, V.B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S.H. Seasonal Interannual variation of rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal Climate.** v. 6, p. 1754-1763, 1993.
- SHOJI, T.; KITAURA, H. Statistical and geostatistical analysis of rainfall in central Japan. **Computers & Geosciences.** v. 32, p. 1007-1024, 2006.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to special studies of soil properties. **Advance in Agronomy.** v. 38, p. 45 – 94, 1985.
- VEER, G. V. D.; VOESRKELIUS, S.; LORENTZ, G.; HEISS, G.; HOOGEWERFF, J. A. Spatial interpolation of the deuterium and oxygen-18 composition of global precipitation using temperature as ancillary variable. **Journal of Geochemical Exploration.** v. 101, p. 175-184, 2009.
- ZAMBOTI, J. L. **Mapas pluviométricos médios mensais no verão para o Estado do Paraná, utilizando métodos geoestatísticos.** 2001. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2001.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo.** 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia) - Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2001.