



## Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira

**Léo F. Ávila<sup>1</sup>, Carlos R. de Mello<sup>1</sup> & Antônio M. da Silva<sup>1</sup>**

### RESUMO

O entendimento associado à continuidade espacial da umidade do solo é imprescindível para compreensão e predição de fenômenos relacionados aos processos hidrológicos. A metodologia geoestatística tem sido empregada muitas vezes, para estudos desta natureza. Neste contexto, o semivariograma é utilizado para modelar a continuidade espacial de uma variável para, seu posterior mapeamento. O objetivo no presente estudo foi modelar a continuidade espacial da umidade do solo em uma bacia hidrográfica experimental na região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, e posteriormente o mapeamento da umidade do solo ao longo do tempo. Os modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano, foram ajustados por Mínimos Quadrados Ordinários, Mínimos Quadrados Ponderados e Máxima Verossimilhança, testando sua aderência pelo grau de dependência espacial e validação cruzada. O modelo exponencial apresentou melhor ajuste em 59% dos casos. O grau de dependência espacial médio foi de 88%, conferindo forte grau de dependência à estrutura de continuidade espacial. O mapeamento da umidade do solo mostrou comportamento fortemente associado ao uso do solo e condições topográficas.

**Palavras-chave:** semivariograma, validação cruzada, mapeamento, geoestatística

## Spatial continuity and distribution of soil moisture in a watershed of the Mantiqueira Range

### ABSTRACT

The knowledge related to the spatial continuity of the soil moisture is essential for understanding and prediction of the hydrological processes. The geostatistical methodology has often been applied in such studies. In this context, the semi-variogram is used to model the spatial continuity of a specific variable for its mapping. This work aimed to model the spatial continuity of soil moisture in an experimental watershed located in Mantiqueira Range, MG, and then to generate map of soil moisture through the year. Exponential, spherical and gaussian semi-variogram models were fitted applying the Ordinary Least Square, Weighted Minimum Square and Maximum Likelihood methodologies, testing their adherence based on the Spatial Dependence Degree and database from Cross-Validation procedure. The exponential model presented better performance in 59% of the situations. The mean Spatial Dependence Degree was 88%, showing a strong dependence degree to the spatial continuity structure. The soil moisture mapping demonstrated behavior strongly associated to the land use and topographical conditions.

**Key words:** semi-variogram, cross validation, mapping, geostatistics

<sup>1</sup> DEG/UFLA, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1452. E-mail: [avila\\_lf@posgrad.ufla.br](mailto:avila_lf@posgrad.ufla.br); [crmello@deg.ufla.br](mailto:crmello@deg.ufla.br); [marciano@deg.ufla.br](mailto:marciano@deg.ufla.br)

## INTRODUÇÃO

A umidade do solo é um dos elementos mais relevantes no controle dos processos hidrológicos, visto que exerce influência na geração do escoamento superficial, na evaporação do solo, na transpiração de plantas e em uma série de interações geográficas e pedogênicas; sua aplicação à hidrologia é fundamental, especialmente no que concerne à calibração de modelos de simulação hidrológica distribuídos.

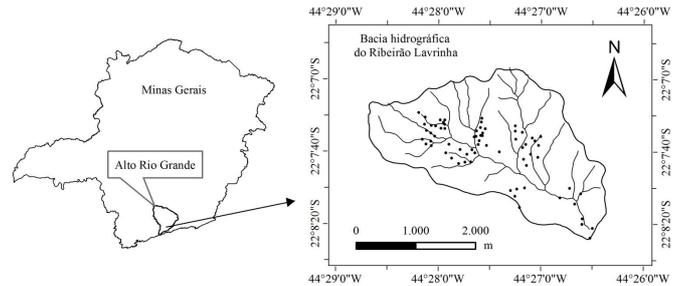
O teor de água no solo é variável no espaço e no tempo, embora em uma mesma unidade pedológica o comportamento da umidade possa apresentar considerável variabilidade devido à ação de diversos fatores, especialmente associados ao uso e manejo do solo. Em termos de planejamento experimental, a determinação da variabilidade espacial e temporal se constitui em uma ferramenta valiosa, haja vista que permite definir o intervalo adequado de amostragem, reduzindo significativamente os custos relacionados ao monitoramento de dados de campo, sobretudo em estudos associados à simulação hidrológica (Schneider et al., 2008; Lin et al., 2005; Hupet & Vanclooster, 2004).

A metodologia geoestatística tem sido, muitas vezes, empregada para caracterizar os padrões espaciais dos atributos do solo (Zhu & Shao, 2008; Brocca et al., 2007; Cichota et al., 2006; Hébrard et al., 2006; Souza et al., 2004; 2005; Western et al., 2004). O conceito central da geoestatística, segundo Vieira (2003), remete à determinação da magnitude da variabilidade espacial expressa por um semivariograma, o qual descreve a estrutura da continuidade espacial da variável. A sensibilidade dos semivariogramas para detectar a variabilidade espacial está diretamente ligada ao melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo teórico de semivariograma (Oda, 2005), condição essencial para a realização de inferências em locais não amostrados e para a correta interpretação de fenômenos que apresentam dependência espacial.

Assim, a análise da dependência espacial, também denominada análise estrutural ou modelagem da continuidade espacial, é considerada etapa fundamental na utilização de procedimentos geoestatísticos, pois a eficiência do estimador (krigagem) na geração de mapas não enviesados (sem tendência) depende essencialmente desta análise, o que se objetiva neste trabalho, a modelagem da continuidade espacial da umidade do solo e o seu mapeamento espaço-temporal em uma bacia hidrográfica da região da Serra da Mantiqueira, no sul de Minas Gerais.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados experimentais foram monitorados na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, situada entre as coordenadas 22° 07' S e 22° 09' S de Latitude e 44° 26' W e 44° 29' W de Longitude, e entre as altitudes de 1144 e 1739 m (Figura 1). Sua área de drenagem é de aproximadamente 690 ha e declividade média de 35%. Esta bacia hidrográfica se encontra na região Alto Rio Grande, especificamente na unidade estadual de planejamento GD01, considerada uma região de extrema importância em termos hidrológicos (Mello et al., 2008b).

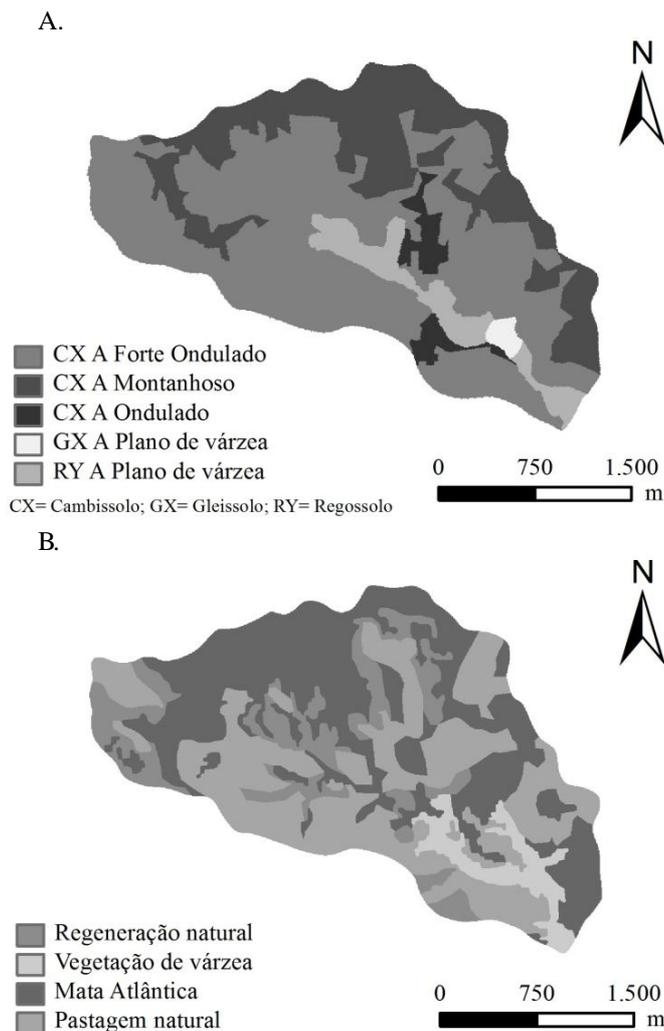


**Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica experimental do ribeirão Lavrinha com os pontos de monitoramento da umidade do solo

Os pontos amostrados (Figura 1) foram locados no terreno, por meio de um aparelho GPS, partindo-se de um esquema georreferenciado prévio, estratificados em função do uso atual do solo (pastagem, mata nativa, regeneração natural e várzea), totalizando 69 pontos. O monitoramento foi conduzido na camada superficial do solo (0-0,20 m), entre maio de 2007 e maio de 2008, com periodicidade de leitura quinzenal, utilizando-se um equipamento portátil do tipo “Time Domain Reflectometry” (TDR), fabricado pela IMKO, modelo TRIME – FM, com hastes de 0,20 m de comprimento, o qual fornece leitura da umidade do solo com base em volume ( $m^3 m^{-3}$ ). A calibração do TDR foi conduzida com base na metodologia adotada por van den Elsen et al. (2003), os quais trabalharam com equipamento semelhante. Para isto, foram ajustados e analisados 6 modelos matemáticos (linear, logarítmico, polinomial de 2º grau, potencial, exponencial e média móvel) aos dados mensurados do conteúdo de água no solo pelo equipamento TDR, associados aos valores observados de umidade do solo consistindo, portanto, numa calibração específica para as condições pedológicas e de uso do solo do presente estudo. Os valores observados de umidade do solo foram obtidos primeiramente pelo método gravimétrico, após coleta de amostras indeformadas com amostrador de Uhland, as quais foram acondicionadas em filmes plásticos, com o objetivo de preservar sua umidade, e conduzidas ao laboratório. Os valores de umidade foram então corrigidos para umidade volumétrica com base na densidade do solo, a qual foi avaliada para cada ponto amostral de umidade, em cada condição de uso do solo. Após análise dos ajustes matemáticos dos modelos adotados, verificou-se que o modelo polinomial de 2º grau apresentou os melhores ajustes, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 0,91 para Mata Atlântica e pastagem e 0,86 para vegetação de várzea.

As unidades pedológicas desta bacia hidrográfica, de acordo com Menezes et al. (2009), são Neossolo Flúvico, Gleissolo Háplico e Cambissolo Háplico (Figura 2A), possuindo áreas de Mata Atlântica, regeneração natural com estágio médio e avançado de regeneração, pastagem e vegetação de várzea (Figura 2B).

Como intuito de observar o comportamento da distribuição dos dados considerando-se a posição geográfica de cada observação, procedeu-se à análise exploratória, a qual consiste na verificação de tendência dos dados e sua remoção, quando constatada. Esta etapa foi realizada por meio de avaliação da distribuição espacial dos pontos em função da latitude e



**Figura 2.** Mapas de solo (A) e uso do solo (B) da bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha

longitude, através de gráficos de tendência. Dados discrepantes (“outliers”) foram encontrados e removidos, por meio de gráficos “box plot”. Por último, uma avaliação da normalidade da diferença entre pares de pontos, por histograma de freqüências (Mello et al., 2008a; Mello, 2004).

A partir da análise exploratória dos dados foram testados os modelos exponencial, esférico e gaussiano, pelos métodos de ajuste dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e da Máxima Verossimilhança (MV). A anisotropia do fenômeno foi analisada com base em semivariogramas experimentais em algumas direções junto ao semivariograma isotrópico, comparando-os visualmente. As direções adotadas para a respectiva análise foram 0, 45, 90 e 135°, consideradas convencionais na geoestatística (Isaaks & Srivastava, 1989; Mello, 2004).

Visando à verificação da qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais, estabeleceram-se dois critérios: o grau de dependência espacial e a validação cruzada, segundo Mello et al. (2005). O grau de dependência espacial (GD) é determinado pela razão entre a variância estrutural ( $C_1$ ) e o patamar ( $C_0+C_1$ ), possuindo a seguinte classificação (Cambardella et al., 1994): < 25% (fraco), entre 25

e 75% (moderado), >75% (forte). O segundo critério, baseado na validação cruzada, consiste em estimar os pontos observados com base no modelo de semivariograma ajustado, possibilitando comparar o valor estimado ao real (Mello et al., 2008a) e, conseqüentemente, o erro produzido pelo modelo. A comparação deste erro ficou condicionada ao erro médio reduzido (ER) e ao desvio padrão do erro reduzido ( $S_{ER}$ ), considerando-se o melhor modelo o que apresentasse menor ER e  $S_{ER}$  mais próximo de 1 (Mello, 2004). De acordo com Mcbratney & Webster (1986), o ER é definido como:

$$ER = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Z_{xi} - \hat{Z}_{xi})}{\hat{\sigma}(Z_{xi})} \tag{1}$$

em que n é o número de dados,  $Z_{xi}$  o valor observado no ponto i,  $\hat{Z}_{xi}$  o valor predito por krigagem no ponto i e  $\hat{\sigma}(Z_{xi})$  o desvio padrão da krigagem no ponto i, ambos sem se considerar a observação  $Z(x_i)$ . Obteve-se o desvio padrão do erro reduzido através da seguinte expressão:

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|Z_{xi} - \hat{Z}_{xi}|}{\hat{\sigma}(Z_{xi})}} \tag{2}$$

A magnitude do erro da estimativa produzido pelo modelo escolhido foi quantificada por meio do erro médio (EM), o qual pode ser expresso como:

$$EM(\%) = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|Z_{xi} - \hat{Z}_{xi}|}{Z_{xi}} \tag{3}$$

Objetivando avaliar a tendência do estimador (TE), calculou-se a seguinte estatística, de acordo com Mello & Silva (2009), sendo:  $TE > 0$ , tendência de superestimativa da predição e  $TE < 0$ , tendência de subestimativa:

$$TE(\%) = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{Z}_{xi} - Z_{xi}}{Z_{xi}} \tag{4}$$

Em todas as análises estatísticas, incluindo-se a análise exploratória dos dados, utilizou-se o software R (R Development Core Team, 2005), com o pacote geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001), ambos de livre acesso e de acordo com a licença GPL (General Public Licence). Na fase de geração dos mapas de umidade do solo, empregou-se o interpolador geoestatístico (krigagem ordinária), trabalhando-se com uma extensão do ArcMap, do software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2004), fornecendo os parâmetros dos modelos do semivariograma que apresentaram melhor ajuste para cada evento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Análise exploratória dos dados e avaliação da continuidade espacial**

Os resultados referentes à análise estatística para os dados de umidade do solo ao longo do período monitorado (Tabela 1) indicaram distribuição normal. Para todos os eventos, os valores da média e mediana estão próximos entre si, mostrando distribuição simétrica, o que pode ser confirmado pelos valores do coeficiente de assimetria nulos e pelos de curtose próximos de zero, constando que a distribuição se aproxima da distribuição normal, a partir da qual toda inferência geoestatística pode ser realizada (Cressie, 1993).

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os dados de umidade do solo para o período monitorado

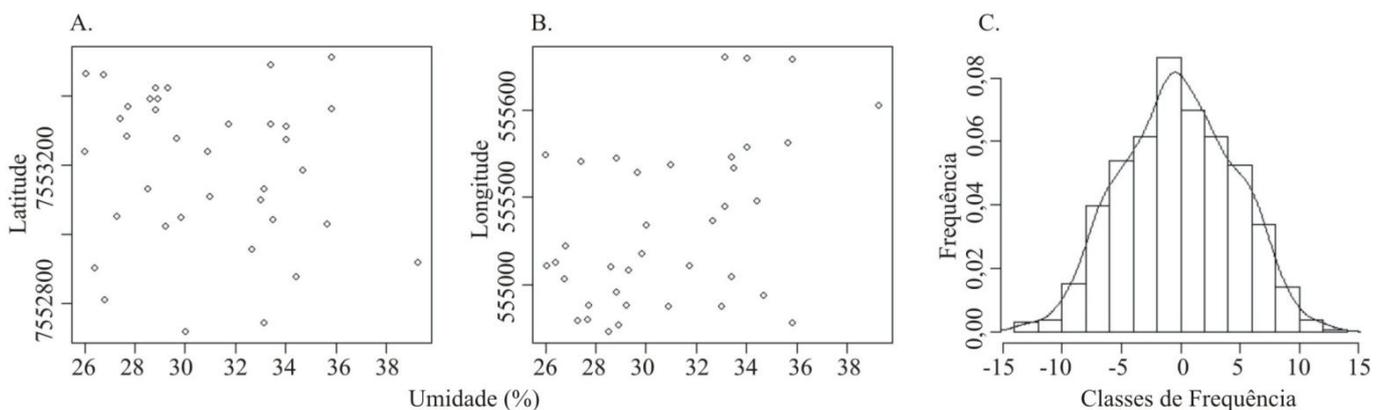
Data	Média (%)	Mediana (%)	Assimetria	Curtose
27/05/07	28,08	27,42	0,00	-0,43
23/06/07	24,74	23,68	0,00	0,69
24/07/07	22,92	23,00	0,00	0,69
11/08/07	23,56	22,77	0,00	0,00
25/08/07	22,10	21,98	0,00	0,71
16/09/07	21,67	21,70	0,00	0,13
28/09/07	21,42	21,39	0,00	0,51
12/10/07	21,66	21,56	0,00	-0,11
26/10/07	28,32	26,77	0,00	-0,63
10/11/07	29,36	28,09	0,00	-0,29
23/11/07	30,53	29,24	0,00	0,47
08/12/07	30,97	30,45	0,00	-0,55
20/12/07	37,26	37,09	0,00	-0,41
07/01/08	30,91	30,02	0,00	-0,65
25/01/08	33,72	33,31	0,00	-0,16
08/02/08	31,71	32,29	0,00	-0,09
22/02/08	33,35	32,35	0,00	0,09
08/03/08	30,95	30,50	0,00	-0,22
20/03/08	33,49	31,09	0,00	-0,36
05/04/08	33,49	31,09	0,00	-0,36
18/04/08	29,51	28,13	0,00	-0,60
01/05/08	31,28	30,12	0,00	-0,35

Na Figura 3 mostra os principais gráficos responsáveis pela análise exploratória dos dados para a mensuração da umidade do solo em 08/12/2007. Ressalta-se que o comportamento foi aproximadamente semelhante para as demais mensurações, em termos de tendência e de normalidade dos dados. Os gráficos de tendência (Figuras 3A e 3B) apresentam distribuição dos

dados nas direções Norte-Sul (latitude) e Leste-Oeste (longitude), podendo-se verificar ausência de tendência dos valores da umidade do solo, atendendo ao princípio de não tendenciosidade, o qual é fundamental em geoestatística. Os histogramas de frequências das diferenças entre pares de pontos amostrados (Figura 3C) indicam a presença de normalidade multivariada devido à sua boa distribuição, em termos de normalidade das diferenças.

Na Tabela 2 estão os resultados do grau de dependência espacial, validação cruzada e parâmetros dos semivariogramas que produziram os melhores desempenhos. Analisando-se o ajuste dos semivariogramas, observa-se melhor desempenho do modelo exponencial em 59% dos casos, indicando que este modelo pode apresentar maior eficiência em relação aos demais para estudos da continuidade espacial da umidade do solo. Em contrapartida, o modelo esférico apresentou melhor desempenho em 41% das situações enquanto o modelo gaussiano, apesar de se ajustar aos semivariogramas experimentais, foi o que apresentou menor desempenho e não foi selecionado em nenhuma situação. Brocca et al. (2007), estudando o padrão espacial da umidade do solo com o modelo exponencial de semivariograma, encontraram bons ajustes deste modelo, no entanto, Western et al. (2004), aplicando abordagem semelhante à deste trabalho, ou seja, testando vários modelos, verificaram que o modelo exponencial não produziu desempenho satisfatório na descrição da continuidade espacial da umidade do solo, em alguns dos sítios analisados pelos autores. Cichota et al. (2006), analisando o padrão espaço-temporal da umidade do solo em condições tropicais, constataram melhor performance do modelo Gaussiano. Desta forma e se analisando os resultados obtidos por outros trabalhos observa-se que, apesar dos resultados obtidos apontarem para uma indicação do modelo exponencial para descrever a continuidade espacial da umidade do solo, é recomendável analisar o desempenho de outros modelos uma vez que os resultados obtidos na literatura apontam para algumas incertezas no tocante a uma escolha definitiva sobre o melhor modelo para estudos geoestatísticos da umidade do solo.

Em termos de métodos de ajuste, observa-se que o método que produziu os melhores resultados foi o de Mínimos Quadrados Ponderados - MQP (10 situações), com os métodos de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e Máxima



**Figura 3.** Gráficos de tendência (A, B) e histograma das diferenças entre pares de pontos (C)

**Tabela 2.** Parâmetros dos modelos de semivariograma, grau de dependência espacial (GD), erro médio reduzido (ER) e desvio padrão do erro reduzido ( $S_{ER}$ )

Data da medição	Modelo	Método	Parâmetros			GD (%)	ER	$S_{ER}$
			EP	PAT	ALC (m)			
27/05/07	EXP	MQO	0,00	20,45	157,17	100	0,0497	0,8271
23/06/07	ESF	MQO	3,83	7,26	185,37	47	-0,0021	0,9276
24/07/07	ESF	MQP	0,00	2,54	200,42	100	-0,0011	0,8820
11/08/07	ESF	MQO	0,00	3,65	150,08	100	0,1879	1,0326
25/08/07	ESF	MQP	0,00	0,54	158,14	100	-0,0432	0,9708
16/09/07	EXP	MV	0,00	0,07	51,63	100	-0,0071	0,8974
28/07/07	EXP	MQP	0,00	0,00	46,97	100	-0,0053	0,9433
12/10/07	ESF	MQP	0,00	0,08	101,46	100	0,0013	0,9357
26/10/07	ESF	MQP	0,00	27,17	701,91	100	0,0283	0,6666
10/11/07	EXP	MQP	6,32	24,94	503,04	75	0,0067	0,8533
23/11/07	EXP	MQP	0,00	12,70	64,08	100	0,0078	0,8742
08/12/07	EXP	MV	2,38	13,33	50,21	82	-0,0057	0,9018
20/12/07	ESF	MQO	0,00	29,73	144,40	100	-0,0151	0,8726
07/01/08	EXP	MV	0,11	14,54	200,00	99	0,0568	0,8064
25/01/08	EXP	MV	19,60	75,90	191,35	74	0,0214	0,8417
08/02/08	EXP	MQP	11,39	56,69	162,59	80	0,0239	0,8792
22/02/08	EXP	MQP	0,00	67,85	97,82	100	0,0130	0,8824
08/03/08	EXP	MQP	27,38	55,49	218,30	51	0,0044	0,8857
20/03/08	ESF	MV	0,00	49,67	91,87	100	-0,0078	0,8742
05/04/08	ESF	MV	0,00	79,72	123,50	100	-0,0011	0,9155
18/04/08	EXP	MQO	0,00	45,92	190,40	100	-0,0020	0,9066
01/05/08	EXP	MQO	36,50	47,83	191,46	24	-0,0114	0,9199

Verossimilhança (MV), prevalecendo ambos em 6 situações. Conforme Ribeiro Júnior & Diggle (2001), a metodologia MQP prevê a estimativa dos parâmetros do modelo teórico de semivariograma com base nos seus pontos, ponderando a estimativa pelo número de pares de pontos que gerou cada ponto do semivariograma. Junqueira Júnior et al. (2008), estudando o comportamento da continuidade espacial de atributos físicos do solo intimamente associados à umidade do solo, como textura, capacidade de retenção de água e porosidade total, em uma bacia hidrográfica experimental, também concluíram sobre o melhor desempenho da metodologia MQP mas não concluindo sobre um modelo melhor de semivariograma.

O grau de dependência espacial médio foi de 88%, o que confere forte grau da estrutura de dependência espacial, sendo possível constatar que a aplicação do interpolador geoestatístico produzirá resultados de boa qualidade, redundando em mapas sem tendência da distribuição espacial da umidade do solo, desde que o modelo de semivariograma associado esteja devidamente validado. Para a maioria dos eventos (15 situações), o efeito pepita foi nulo, refletindo em que os erros decorrentes de medições e/ou da própria variabilidade natural do fenômeno, apresentaram valores baixos. Constata-se, que desta forma, que o intervalo de amostragem foi suficientemente adequado para detectar a estrutura da continuidade espacial do fenômeno em estudo.

O alcance teórico médio encontrado para o modelo exponencial ao longo do período estudado, foi de aproximadamente 160 m. Conforme Journel & Huijbregts (1978), o modelo exponencial atinge o patamar assintoticamente, tendo o alcance prático determinado por, 3 vezes, o alcance teórico. Deste modo, o alcance prático médio para o modelo exponencial foi de 490 m, representando a região de influência em que a umidade do solo se apresenta espacialmente dependente.

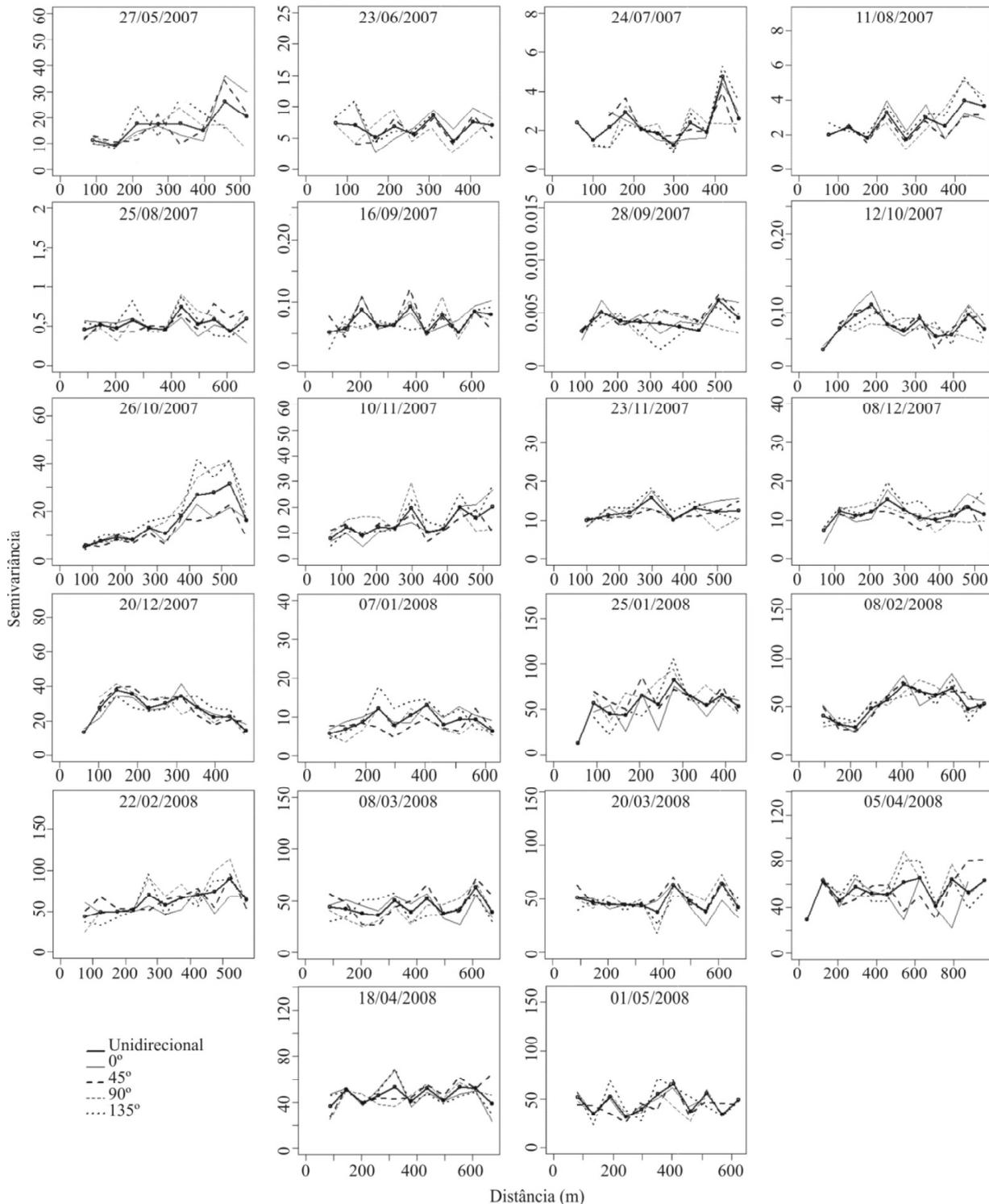
Apresentam-se, na Tabela 3, o erro médio (EM) e a tendência do estimador (TE) para os modelos de semivariogramas que melhor se ajustaram aos dados de umidade do solo, conforme a Tabela 2. Observa-se que o modelo exponencial apresentou EM de 10,60% e TE de 2,37%, o que permite verificar que tal modelo, uma vez aplicado ao mapeamento por krigagem, tende a superestimar, em média, os valores observados de umidade de solo na ordem de 2,37%, valor consideravelmente baixo. Os dados da Tabela 3 mostram ainda que nas situações em que o modelo exponencial apresentou melhor desempenho, se obtiveram os menores erros médios e as menores tendências,

**Tabela 3.** Erro médio (EM - %) e tendência do estimador (TE - %) para os modelos que apresentaram melhores ajustes

Data da medição	Modelo	Método	EM(%)	TE(%)
27/05/07	EXP	MQO	9,79	0,68
23/06/07	ESF	MQO	10,15	1,41
24/07/07	ESF	MQP	5,05	0,42
11/08/07	ESF	MQO	8,38	-0,87
25/08/07	ESF	MQP	3,30	0,28
16/09/07	EXP	ML	0,98	0,02
28/09/07	EXP	MQP	0,21	0,00
12/10/07	ESF	MQP	1,12	0,01
26/10/07	ESF	MQP	7,61	0,46
10/11/07	EXP	MQP	6,14	1,17
23/11/07	EXP	MQP	6,23	1,19
08/12/07	EXP	MV	9,56	1,35
20/12/07	ESF	MQO	10,65	1,92
07/01/08	EXP	MV	7,03	0,17
25/01/08	EXP	MV	18,71	4,81
08/02/08	EXP	MQP	14,46	4,58
22/02/08	EXP	MQP	15,60	5,36
08/03/08	EXP	MQP	13,19	4,61
20/03/08	ESF	MV	19,04	5,61
05/04/08	ESF	MV	24,09	7,23
18/04/08	EXP	MQO	21,33	6,09
01/05/08	EXP	MQO	20,79	5,66

demonstrando e confirmando que este modelo deve ser priorizado em trabalhos de mapeamento por krigagem, para dados de umidade do solo. Além deste aspecto, é possível constatar, também, que o interpolador geoestatístico tenderá a apresentar uma ligeira superestimativa, porém de pequena magnitude. É importante relatar, ainda, que o modelo que apresentou os maiores valores de EM e TE foi o esférico, com 24,09 e 7,23%, respectivamente; contudo, tais valores ainda podem ser considerados de baixa magnitude.

Na Figura 4 se acham os semivariogramas experimentais em várias direções (0, 45, 90 e 135°), junto ao semivariograma isotrópico ou unidirecional, permitindo analisar se há diferença no comportamento da continuidade espacial da umidade do solo em várias direções, situação fundamental para a geração de mapas representativos com as características estocásticas de distribuição deste atributo físico-hídrico do solo. De modo geral, verificou-se que os semivariogramas experimentais direcionais demonstraram expressiva similaridade na região de



**Figura 4.** Semivariogramas direcionais (0, 45, 90 e 135°) e unidirecional

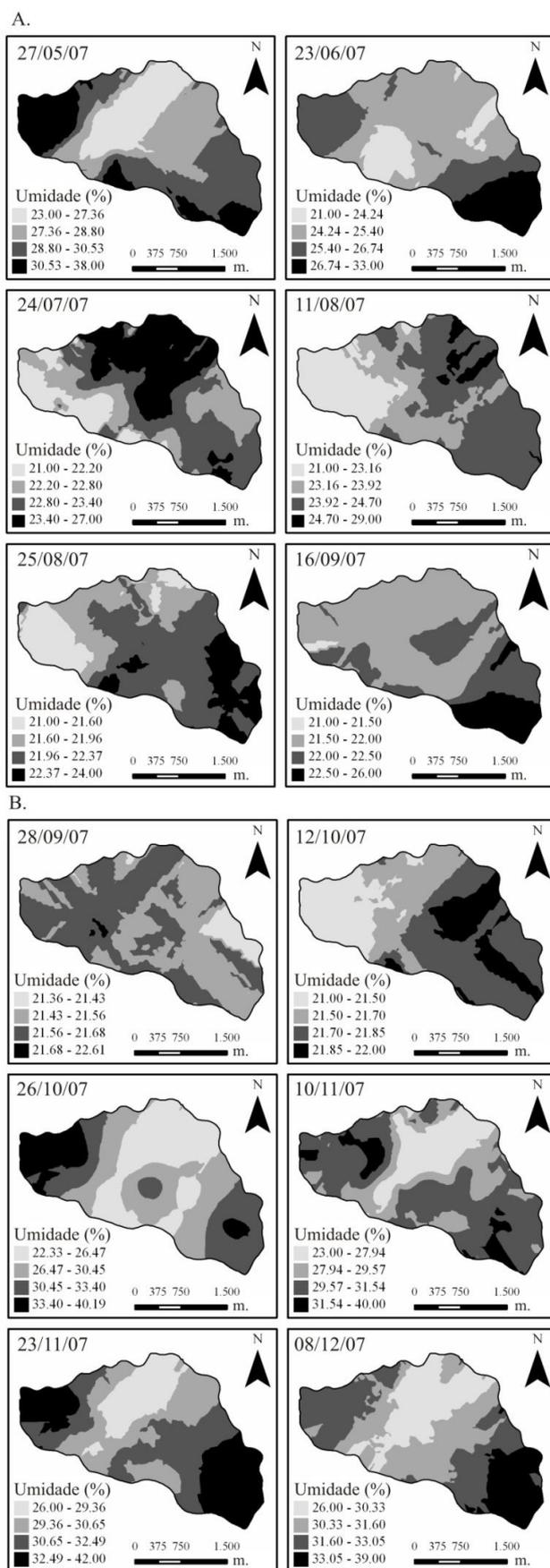
influência da dependência espacial, revelando que a umidade do solo apresenta características desejáveis para representar a estrutura da continuidade espacial da variável nas diferentes direções. Com base neste comportamento, pode-se avaliar que o modelo isotrópico é suficiente para descrever a estrutura da continuidade espacial da umidade do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha. Avaliando a anisotropia da umidade do solo em bacias hidrográficas, Brocca et al. (2007) e Western et al. (2004), concluíram esta mesma situação, ou seja, de que não se detectou anisotropia da umidade do solo, baseando-se nos aspectos do semivariograma vinculados ao alcance e efeito pepita. Em ambas as investigações, foi proposta a modelagem do semivariograma isotrópico para aplicação, ao mapeamento, da umidade do solo.

**Mapeamento da umidade do solo ao longo do tempo**

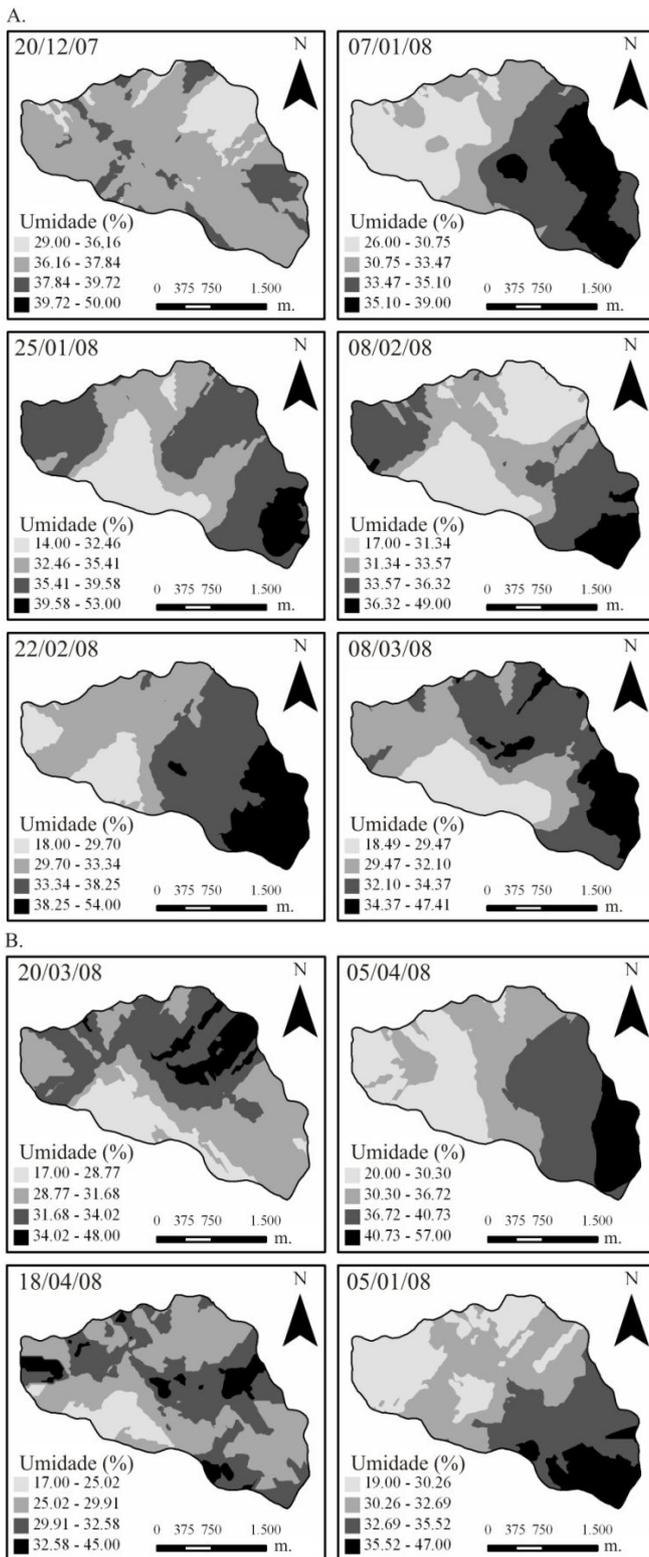
Nas Figuras 5 e 6 estão apresentados os mapas de umidade volumétrica do solo, na camada superficial (0 a 20 cm), para as diferentes estações do ano. Observa-se que, no período de inverno (Figura 5A), ocorreu declínio do teor de água no solo, de 38% para 21%, devido ao baixo índice pluviométrico, e se verifica, nesta mesma estação, predominância dos maiores percentuais de umidade do solo nas regiões de menores altitudes, que podem estar associados à contribuição dos fluxos de água, oriundos das áreas elevadas circundantes da bacia. A face norte, composta por Mata Atlântica, apresenta menor variação dos valores do teor de água, ao longo do inverno.

Este comportamento está associado ao ecossistema da Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, o qual apresenta uma camada espessa de serrapilheira, com identificação de baixos valores de densidade do solo e elevadas concentrações de matéria orgânica, exercendo papel de redução dos efeitos de variações de umidade do solo. Nesta mesma região se notam, no final do mês de maio (transição de outono-inverno) percentuais inferiores de umidade do solo comparados aos demais usos do solo da bacia. Este menor percentual de água no solo pode ser atribuído à maior taxa de transpiração da mata uma vez que as respectivas áreas são, na maioria, representadas pela mesma classe de solo (Cambissolo).

É interessante destacar que algumas áreas de pastagem apresentaram valores de umidade ligeiramente superiores durante o inverno, comportamento que pode ser explicado pelo regime hídrico da região no período em que ocorre a influência de sistemas frontais, os quais promovem chuvas de baixa intensidade e longa duração; neste caso, os efeitos de interceptação, provocados pela pastagem, são pouco significativos quando comparados com aqueles proporcionados pelas áreas de Mata Atlântica ou mesmo de regeneração, possibilitando maior contato do solo com água da chuva, situação que não se observa nas áreas de mata. Gomes et al. (2007), estudando a influência do uso do solo em atributos físicos relacionados ao padrão de umidade, como a infiltração de água no solo, demonstraram que, nas áreas de Cambissolo, ocupadas por pastagem em outra bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, o padrão deste atributo foi influenciado por chuvas de baixa intensidade durante o período seco do ano em comparação com o padrão de áreas florestadas e de cultura.



**Figura 5.** Mapas de umidade volumétrica do solo (%) para a bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, na Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, para inverno (A) e primavera (B)



**Figura 6.** Mapas de umidade volumétrica do solo (%) para a bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, na Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, para o período de verão (A) e outono (B)

Na primavera (Figura 5B), nota-se aumento do percentual de umidade do solo, de 21 a 42%, correspondendo a um período típico de aumento de umidade do solo, pela ocorrência das primeiras chuvas do ano hidrológico e o solo, especialmente na

camada superficial, que se encontra com umidade muito baixa e, conseqüentemente, maior capacidade de armazenamento.

No início da primavera se constatam, no primeiro decêndio do mês de outubro, os menores índices de umidade em toda a área, em torno de 21%, sendo este o período de maior déficit hídrico na bacia hidrográfica. Na região de cabeceira (noroeste) e de foz (sudeste), verificam-se maiores concentrações do percentual de umidade do solo. A influência das nascentes é o principal fator responsável pelo maior percentual de umidade no noroeste da bacia; no sudeste, porém, este percentual pode estar associado à influência de diversos fatores, como a contribuição de água à montante da bacia, a capilaridade provocada pelo lençol freático e ao relevo plano (área de várzea). Na região ocupada por Mata Atlântica tem-se maior tempo de contato da água com o solo em relação às áreas cobertas por pastagem e regeneração natural. Neste caso, a interação de fatores, como interceptação da precipitação pelo dossel e características do relevo, interfere na dinâmica deste processo, fazendo com que haja um processo lento de infiltração e redistribuição de água no solo.

Durante o verão (Figura 6A), foi maior a magnitude dos valores de umidade, comparativamente a todo o período monitorado, atingindo índices superiores a 50%. Constatam-se, no último decêndio de dezembro, maior aumento de umidade do solo na totalidade da bacia hidrográfica. No início de janeiro a umidade do solo na região de cabeceira apresenta percentual de 26%, crescendo em direção à foz, onde se verificam percentuais de 39%. Em janeiro (último decêndio) e fevereiro (1º decêndio), nota-se maior depleção dos teores de água nas áreas compostas por pastagem (sul da bacia) e por Mata Atlântica. Na Mata Atlântica este comportamento está associado ao relevo mais movimentado, facilitando o processo de movimento de água no solo pela formação de maiores gradientes de potencial gravitacional; já na área coberta por pastagem este comportamento certamente está relacionado ao consumo de água pelas plantas em virtude da maior presença de raízes efetivas na camada superficial do solo associado à menor declividade se comparado à Mata Atlântica.

Semelhante ao primeiro decêndio de janeiro verificou-se, em 22/02/08, aumento do percentual de umidade do solo no sentido da região de cabeceira para a foz da bacia entretanto, com menor percentual de água no topo (de 18%) e, conseqüentemente, maior na região de cotas mais baixas (de 54%), resultado do fluxo de água das regiões de cabeceira para as partes mais baixas da bacia. Constataram-se, ao final do período de verão, maiores teores de água na face norte e no sudeste da bacia, ambas constituídas por Mata Atlântica e um percentual menor de água na área coberta por pastagem (face sul).

Constata-se, então, que as características da Mata Atlântica propiciam melhor estruturação ao solo em razão do alto teor de matéria orgânica e maior porosidade, conferindo armazenamento hídrico mais eficaz neste ecossistema comparado com a pastagem, cujas características fisiográficas não favorecem o processo de infiltração, promovendo menor retenção de água visto que ambos possuem a mesma classe de solo (Figura 2A).

Nota-se, na Figura 6B, redução dos teores de umidade do solo principalmente nas áreas de pastagem, devido ao início do período de estiagem; entretanto, nota-se aumento no sudeste da bacia em 05/04/08, alcançando 57%, o qual pode estar relacionado ao escoamento de água do solo (superficial e subsuperficial), oriundo da região de montante da bacia. Em meados do mês de maio (18/04/08), o comportamento foi semelhante ao observado no final do período de verão (maior teor de água na mata, comparável à pastagem), mas o maior percentual de água na Mata Atlântica ocorre onde o relevo se apresenta menos acentuado (Figura 2B).

### CONCLUSÕES

1. Observou-se melhor ajuste do modelo exponencial pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados.
2. O grau de dependência espacial médio foi de 88%, o que confere forte grau da estrutura de dependência espacial.
3. Não se detectou anisotropia no comportamento da umidade do solo na bacia hidrográfica, significando que a continuidade espacial pode ser modelada com base no semivariograma isotrópico.
4. A época de maior déficit hídrico na bacia hidrográfica foi no início da estação de primavera, especificamente na primeira quinzena do mês de outubro, com percentual em torno de 21%.
5. Observou-se maior magnitude dos valores de umidade do solo na estação de verão, atingindo índices superiores a 50%, constatando-se maior recarga hídrica do solo na totalidade da bacia, no último decêndio do mês de dezembro.

### LITERATURA CITADA

- Brocca, L.; Morbidelli, R.; Melone, F.; Moramarco, T. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *Journal of Hydrology*, v.333, n.1, p.356-373, 2007.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Novak, J. M.; Turco, R.F.; Konopka, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.
- Cichota, R.; Hurtado, A. L. B.; Lier, Q. J. van. Spatio-temporal variability of soil water tension in a tropical soil in Brazil. *Geoderma*, v.133, n.8, p.231-243, 2006.
- Cressie, N. R. *Statistics for spatial data*. New York: A. Wiley-Interscience, 1993. 900p.
- Elsen, E. van den; Xie, Y.; Liu, B.; Stolt, J. Wu, Y; Trouwborst, K. Ritzema, C. J. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. *Catena*, v.54, p.93-115, 2003.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. *ArcGIS 9: Getting started with ArcGIS*. Redlands: 2004. 265p.
- Gomes, N. M.; Faria, M. A. de; Silva, A. M.; Mello, C. R. de; Viola, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.427-435, 2007.
- Hébrard, O.; Voltz, M.; Andrieux, P.; Moussa, R. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, v.329, p.110-121, 2006.
- Hupet, F.; Vanclooster, M. Sampling strategies to estimate field areal evapotranspiration fluxes with a soil water balance approach. *Journal of Hydrology*, v.292, p.262-280, 2004.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University, 1989. 600p.
- Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 1978. 600p.
- Junqueira Júnior, J. A.; Silva, A. M.; Mello, C. R.; Pinto, D. B. F. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. *Ciência e Agrotecnologia*, v.32, n.3, p.914-922, 2008.
- Lin, H. S.; Wheeler, D.; Bell, J.; Wilding, L. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modelling*, v.182, n.3-4, p.271-290, 2005.
- McBratney, A.; Webster, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sample estimates. *Journal of Soil Science*, v.37, n.3, p.617-639, 1986.
- Mello, C. R. de; Silva, A. M. Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.1, p.68-74, 2009.
- Mello, C. R.; 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, 2008a.
- Mello, C. R.; Viola, M. R.; Norton, L. D.; Silva, A. M.; Weimar, F. A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. *Catena*, v.75, p.235-247, 2008b.
- Mello, J. M. de. *Geoestatística aplicada ao inventário florestal*. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 110p. Tese Doutorado
- Mello, J. M. de; 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 Florestalis*, v.1, n.69, p.25-37, 2005.
- Menezes, M. D. de; Curi, N.; Marques, J. J.; Mello, C. R. de. Araújo, A. R. de. Levantamento pedológico e sistema de informações geográficas na avaliação do uso das terras em sub-bacia hidrográfica de Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.33, p.1544-1553, 2009.
- Oda, M. L. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um experimento em delineamento sistemático tipo "leque". Piracicaba: ESALQ/USP, 2005. 72p. Dissertação Mestrado
- R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R foundation for statistical computing, (2005). Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org>>. 10 Jan. 2009.
- Ribeiro J. R. P. J.; Diggle P. J. *geoR: A package for geostatistical analysis*. *R-NEWS*, v.1, n.2, p.15-18, 2001.
- Schneider, K.; Huisman, J. A.; Breuer, L.; Zhao, Y.; Frede, H. G. Temporal stability of soil moisture in various semi-arid steppe ecosystems and its application in remote sensing. *Journal of Hydrology*, v.359, p.16-29, 2008.
- Souza, Z. M.; Marques Junior, J.; Pereira, G. T.; Barbieri, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.24, n.2, p.309-319, 2004.

- Souza, Z. M.; Martins Filho, M. V.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial de fatores de erosão em Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.1, p.105-114, 2005.
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novaes, R.S.; Alvarez, V. V. H.; Schaeser, C. E. G. R. Tópicos em Ciências do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.1-54, 2003.
- Western, A. W.; Zhou, S. L.; Grayson, R. B.; McMahon, T. A.; Blöschl, G.; Wilson, D. J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, v.286, p.113-114, 2004.
- Zhu, Y.; Shao, M. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, v.147, p.185-191, 2008.