

ESTABILIDADE TEMPORAL DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA UMIDADE DO SOLO EM ÁREA IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL⁽¹⁾

A. C. A. GONÇALVES⁽²⁾, M. V. FOLEGATTI⁽³⁾ & A. P. SILVA⁽⁴⁾

RESUMO

A heterogeneidade do solo faz com que o armazenamento de água seja variável, sendo necessária uma amostragem intensa, para caracterizar a sua distribuição espacial em uma área irrigada. Para fins de manejo da irrigação, é importante o monitoramento da umidade do solo durante o processo de secagem entre duas irrigações sucessivas. O presente trabalho tem por objetivos avaliar a estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo, a correlação da umidade com conteúdo de argila e avaliar se há estrutura de dependência espacial dessas variáveis. Quanto mais estável for a distribuição espacial da umidade e mais estreita a correlação com a textura, menos intensas poderão ser as amostragens para fins de controle das irrigações. Em área irrigada por pivô central, no campus da ESALQ/USP, de solo Podzólico Vermelho-Escuro, a umidade foi medida em pontos espaçados de 2,83 m ao longo de uma transeção radial, nas profundidades de 0,15 e 0,30 m, por meio de uma sonda de nêutrons. O conteúdo de argila e a densidade global foram também medidos. As medidas foram feitas durante um período de secagem do solo. A estabilidade temporal das distribuições espaciais foi avaliada por meio do coeficiente de correlação e da técnica de diferenças relativas. Foi constatada a persistência no tempo das distribuições de umidade, sendo possível identificar pontos de amostragem cujos valores permitem estimar a média geral da umidade na área, a qualquer momento. A dependência espacial da umidade foi avaliada por meio de semivariogramas, os quais mostraram que mais de 50% da variação dos dados pode ser atribuída à variação estruturada no espaço, cujo padrão se mantém estável no tempo e varia com a profundidade. Na camada inferior, a correlação espacial entre umidade e conteúdo de argila é descrita por semivariograma cruzado com efeito pepita nulo. A estrutura de dependência espacial pode ser usada no mapeamento da umidade do solo.

Termos de indexação: variabilidade espacial, geoestatística, umidade do solo, estabilidade temporal.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em julho de 1997 e aprovado em novembro de 1998.

⁽²⁾ Professor Adjunto da Universidade Estadual de Maringá - UEM. Caixa Postal 31, CEP: 87020-900 Maringá (PR). E-mail: acagonca@wnet.com.br.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: *TEMPORAL STABILITY OF SOIL-WATER SPATIAL PATTERN IN IRRIGATED AREA BY CENTER PIVOT*

Soil heterogeneity is known to cause variability of soil-water storage. Thus intensive sampling is required to characterize its spatial pattern. For irrigation management, it is necessary to measure the soil water content between irrigations. The objectives of this paper are to identify whether spatial patterns of soil water content in sprinkler irrigated area present temporal stability and whether this property presents spatial dependence. Temporal stability of spatial dependence structures and spatial correlation with clay content were studied. A 180 m long transect in an area irrigated by center pivot on the campus of ESALQ/USP, Piracicaba (SP), Brazil was sampled at every 2.83 m. Soil-water content was measured with neutron probe at 0.15 and 0.30 m depth, between two irrigations. Temporal stability was evaluated using linear correlation and the mean relative difference. Soil-water content pattern was persistent with time, i.e., the mean soil water content can be adequately estimated from a single sampling point. The spatial dependence of the soil-water content was described with semivariograms showing that the structural component accounted for more than 50% of the total variation. This variation structure remains stable with time and changes with depth. The strong spatial correlation between soil water content and clay content at the deeper layer was expressed by cross-semivariograms. This interrelation can be used to predict soil water content.

Index terms: soil-water storage, temporal stability, spatial variability, geostatistics.

INTRODUÇÃO

O método de irrigação por aspersão é largamente empregado na irrigação de diversas culturas. Dentre os vários sistemas existentes, o pivô central destaca-se pelo alto nível de automatização e pelas grandes áreas irrigadas. Apesar de o sistema possibilitar níveis elevados de uniformidade, as irregularidades da lâmina aplicada e a variabilidade espacial das propriedades do solo fazem com que o armazenamento de água no solo apresente grandes variações no espaço. A sua avaliação, portanto, requer grande número de pontos de amostragem de umidade.

Uma vez que a umidade varia consideravelmente no espaço e o esforço amostral demanda tempo e recursos, é usual a adoção de um valor médio suposto representativo, obtido a partir de um conjunto de medidas diretas ou indiretas, feitas na área. Tal procedimento pressupõe homogeneidade e independência espacial dos valores (Bresler et al., 1982). Entretanto, propriedades hidráulicas do solo negam, freqüentemente, essas hipóteses (Russo & Bresler, 1981). A variabilidade das propriedades do solo é resultante da variabilidade do material originário, dos fatores de formação e da ação de processos hidrológicos que ocorrem em diferentes escalas espaciais (Kachanoski & De Jong, 1988), sendo usualmente estruturada no espaço.

Vachaud et al. (1985), buscando representar adequadamente a umidade do solo, com reduzido esforço amostral, propõem o conceito de estabilidade temporal. Essa estabilidade é definida como a associação invariável no tempo entre a posição no espaço e as medidas estatísticas da propriedade (van

Wesenbeek et al., 1988). Para avaliar a estabilidade temporal, Vachaud et al. (1985) analisaram as diferenças entre os valores em cada posição e o valor médio no espaço, ao longo do tempo. O conceito é realístico para umidade, na medida em que existe alta probabilidade de que uma posição mais úmida em um instante permaneça assim em outros momentos.

Se a estabilidade espacial ocorre, então existirão pontos no campo que sistematicamente apresentarão umidade igual à média amostral, independentemente do nível de umidade do solo. A aplicação prática do conceito é que, neste caso, apenas estes pontos seriam amostrados para avaliar a umidade média a qualquer momento, independentemente da condição de umidade do solo. Kachanoski & De Jong (1988) expandiram o conceito, mostrando que a correlação entre valores medidos em instantes consecutivos é um teste adequado para a estabilidade temporal. Esse teste, mais simples que o proposto por Vachaud et al. (1985), permite avaliar estatisticamente o grau de persistência temporal da distribuição espacial.

A comprovação da estabilidade temporal da distribuição de umidade permite monitorar o armazenamento de água no solo de modo eficaz, com redução do esforço amostral. Esse conceito pode ser de grande utilidade no manejo da irrigação. Rolston et al. (1991) fazem uso do conceito para monitorar água no solo em irrigação localizada e concluem mostrando que, se esta estabilidade ocorre, então o monitoramento do armazenamento pode ser feito em apenas alguns pontos. Tais pontos são os que sistematicamente apresentam valores próximos da média geral, conforme proposto por Vachaud et al. (1985).

Em se tratando de solos tropicais, a análise da estabilidade temporal da umidade é pouco explorada. Turatti & Reichardt (1991), avaliando o armazenamento em um perfil de Terra Roxa Estruturada, constataram estabilidade temporal da distribuição espacial por meio da análise das diferenças médias relativas. Verificaram também a grande variabilidade dos dados no espaço, mas não procuraram estabelecer correlação com a textura, assim como não verificaram se havia alguma estrutura de dependência espacial.

Os métodos propostos para avaliar a estabilidade temporal nada informam sobre a estrutura de dependência espacial, a qual pode ser avaliada por meio das ferramentas de séries temporais ou da geoestatística, segundo Kachanoski & De Jong (1988). As ferramentas da geoestatística permitem não só avaliar e modelar a estrutura de dependência espacial, tornando possível o mapeamento da propriedade na área por meio da interpolação geoestatística (krigagem), mas também avaliar e descrever a correlação espacial entre propriedades e entre umidade e textura. Essas informações, úteis na descrição da distribuição espacial da umidade, não têm sido abordadas nos trabalhos desenvolvidos sobre esse assunto.

Os objetivos deste trabalho são: (a) avaliar se a distribuição espacial de umidade do solo na área irrigada é estável no tempo e identificar pontos de amostragem; (b) avaliar se a umidade apresenta estrutura de dependência espacial e correlação linear e espacial com textura, bem como se estas se mantêm inalteradas no tempo.

MATERIAL E MÉTODOS

A área em estudo tem coordenadas 22°42' de latitude sul e 47°38' de longitude oeste, com altitude média de 546 m. Localiza-se na Fazenda Areão, Campus da ESALQ/USP, em Piracicaba (SP). O solo é caracterizado como Podzólico Vermelho-Escuro, com horizonte A de 0,30 m de profundidade média. Um sistema de irrigação pivô central irriga uma área circular, definida pela rotação da estrutura de 167 m de comprimento. Ao longo de um raio desse círculo, foram coletadas amostras indeformadas de solo, a 0,20 m de profundidade, em anéis de 0,053 m de diâmetro e 0,030 m de altura. A amostragem foi realizada em 59 pontos espaçados de 2,83 m, permitindo a determinação da densidade do solo em cada ponto. Amostras foram coletadas para a análise granulométrica em todos os pontos.

Em cada ponto, iniciando a 14,15 m do ponto pivô, instalou-se um tubo de alumínio com diâmetro de 0,05 e 0,75 m de comprimento, para acesso da sonda de nêutrons. No dia 13 de maio de 1996 (dia Juliano 134), foi aplicada uma lâmina de 40 mm de água

com o pivô. Nos dias 136 e 137, houve precipitação de 24 mm, totalizando 64 mm, levando a umidade do solo no perfil estudado a valores acima da capacidade de campo. Após um período de secagem inicial, a determinação da umidade do solo teve início no dia 142, tendo sido feita periodicamente até o dia 169, quando a variação do armazenamento de água superou 17 mm, valor este adotado como limite superior para as irrigações usualmente realizadas com o pivô. No período entre os dias 142 e 169, o único aporte de água ao solo foi devido a uma chuva de 5,2 mm, entre os dias 143 e 144.

A umidade do solo em cada ponto de amostragem foi avaliada nas profundidades de 0,15 e 0,30 m, tendo sido obtida a partir de leituras da sonda de nêutrons. Previamente, foi feita uma calibração local da sonda, tendo sido obtida a equação: $U = 14,3 \times R - 1,16$, com R^2 igual a 78%. O valor de R corresponde à relação entre a contagem atual e a contagem padrão da sonda e U é a umidade do solo, com base em massa, expressa em percentual. Para a calibração, foram feitas medidas nas duas profundidades.

A primeira etapa da análise dos dados consistiu na estatística descritiva, sendo determinadas as medidas de posição, de dispersão, de assimetria e de curtose (Warrick & Nielsen, 1980; Beiguelman, 1994). Estas medidas, em conjunto com a distribuição dos dados no espaço, permitiram avaliar a viabilidade de se assumir o atendimento da hipótese de estacionaridade estatística da umidade.

O método proposto por Kachanoski & De Jong (1988) foi usado para a avaliação da estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade. Para isto, foram usados os coeficientes de correlação linear de Pearson e os coeficientes de determinação entre pares de conjuntos de valores medidos em instantes ou tensões consecutivas. O coeficiente de determinação (R^2) expressa o quanto da variação observada no instante t_2 pode ser explicada pela variação presente no instante t_1 , o que representa a persistência do padrão espacial. A técnica das diferenças relativas proposta por Vachaud et al. (1985) foi usada para identificar os pontos de amostragem futura para avaliar a umidade média. A diferença relativa é dada por:

$$\delta_{ij} = (\theta_{ij} - \bar{\theta}_j) / \bar{\theta}_j \quad (1)$$

em que θ_{ij} é o valor de umidade na posição i no momento j e $\bar{\theta}_j$ é a umidade média de todas as posições no espaço, no momento j. Conforme descrito pelos autores, para cada posição i (i = 1-59) no espaço, em cada tempo j (j = 1-8), foram calculadas as diferenças relativas, conforme a equação 1. Para cada posição i, foi calculada a média dos valores de diferença relativa, obtidos para as oito datas analisadas. O desvio-padrão em torno dessa média, em cada posição, foi também determinado. As diferenças relativas médias, expressas em termos percentuais, associadas ao respectivo desvio-padrão

no tempo e ordenadas da menor para a maior, permitem identificar a posição cujos valores se aproximam da média no espaço, em qualquer momento. Quanto menor o desvio padrão, maior a confiabilidade da medida naquele ponto para estimar a média geral.

Para cada conjunto de valores, foram construídos os semivariogramas experimentais, usando o estimador do método dos momentos, apresentado por Journel (1989):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z(s) - Z(s+h)]^2 \quad (2)$$

em que h é o vetor de separação entre dois pontos, $Z(s)$ é o valor da propriedade medida na posição s do espaço, $N(h)$ é o número de pares de pontos distantes entre si do valor h e $\gamma(h)$ é o valor da função de semivariância. O semivariograma relaciona o valor da função de semivariância com o correspondente valor de h . A definição do semivariograma é condicionada ao atendimento da condição de estacionaridade dos dados caracterizada como hipótese intrínseca, segundo a qual:

$$E[Z(s) - Z(s+h)] = 0 \quad (3)$$

em que para todo h a variância de $[Z(s) - Z(s+h)]$ é finita e independente da posição s .

O escalonamento do semivariograma, ou seja, a sua divisão pela variância amostral.

$$\gamma_{\text{esc}}(h) = \frac{\gamma(h)}{s^2} \quad (4)$$

possibilita comparar a estrutura de dependência espacial entre conjuntos de dados com diferentes dispersões em torno do valor médio (Cressie, 1985; Isaaks & Srivastava, 1989), como geralmente ocorre com dados de umidade durante um processo de

secagem. Modelos teóricos, como apresentados por McBratney & Webster (1986), foram ajustados aos semivariogramas experimentais, para melhor descrever a estrutura de dependência espacial.

A correlação espacial de umidade com conteúdo de argila foi avaliada por meio de semivariogramas cruzados, como feito por Vauclin et al. (1983). Foi feito o escalonamento pela covariância dos dados, para fins de comparação ao longo do tempo. Foram ajustados modelos teóricos aos semivariogramas cruzados, de maneira análoga ao dos semivariogramas das propriedades.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas figuras 1 e 2, são mostrados os valores de umidade do solo, nas profundidades de 0,15 e 0,30 m, no primeiro dia de medidas (142) e no último dia do período de secagem do solo (169). São mostrados os valores obtidos em duas datas intermediárias, com o propósito de permitir melhor visualização do processo de secagem ao longo do tempo. Uma vez que estacionaridade não pode ser testada estatisticamente, uma análise dos dados permite assumir que, embora a umidade varie no espaço, tendências de concentração de valores ou de variação em determinada direção não podem ser identificadas. Com base nessas observações, admite-se que a estacionaridade descrita pela hipótese intrínseca seja aceitável. Pode-se verificar visualmente que, exceto em alguns pontos, aqueles com maiores ou menores valores tendem a manter esse comportamento à medida que o solo seca. Isto revela a estabilidade temporal da umidade, o que pode ser quantificado por meio dos métodos apresentados por Vachaud et al. (1985) e por Kachanoski & De Jong (1988).

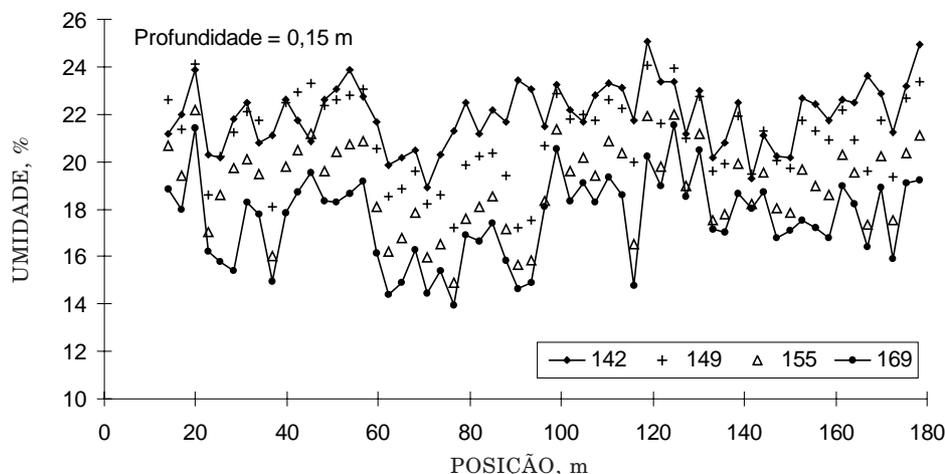


Figura 1. Umidade com base em massa medida na transeção, no primeiro dia, no último dia e em duas datas intermediárias do período de secagem do solo, na profundidade de 0,15 m.

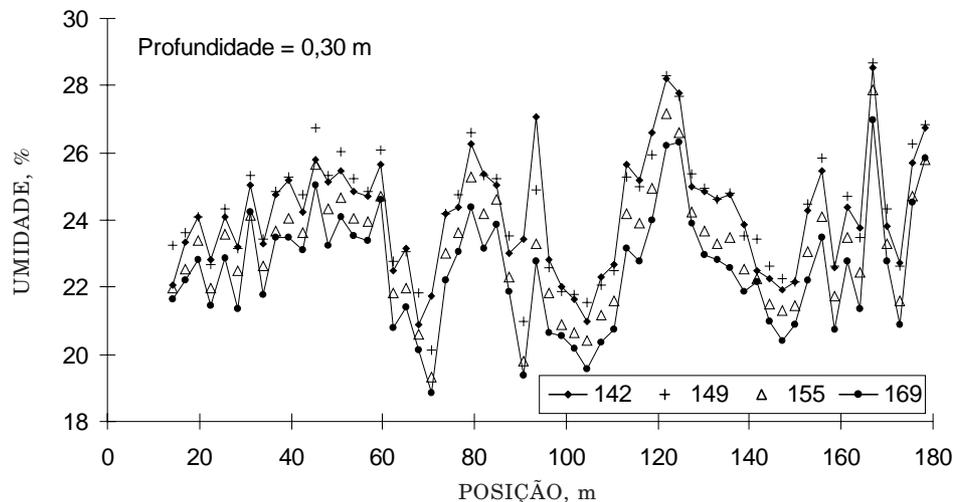


Figura 2. Umidade com base em massa medida na transeção, no primeiro dia, no último dia e em duas datas intermediárias do período de secagem do solo, na profundidade de 0,30 m.

A umidade média a 0,30 m foi sempre superior à obtida para 0,15 m, como pode ser observado no quadro 1. À medida que o solo secou, a diferença entre médias cresceu, indicando que o solo secou mais rapidamente na camada superior. Verifica-se, à medida que o solo seca, nas duas camadas, tendência de crescimento do coeficiente de variação (C_v). Segundo Cameron (1978), tal fato está relacionado com a maior variabilidade da distribuição do tamanho de poros para o solo mais seco. Os valores não superaram 11%, o que permite caracterizar as distribuições de valores de umidade como de baixa variação, conforme critério apresentado por Warrick & Nielsen (1980).

A semelhança entre as medidas de posição para umidade com base em massa nas duas profundidades expressa a simetria das distribuições (Quadro 1). Os coeficientes de curtose permitem caracterizar essas distribuições como mesocúrticas, a 5% de significância.

No quadro 1, verifica-se que a umidade média a 0,15 m no dia 145 é superior à do dia 142. Isto se deve à chuva de 5,2 mm nos dias 143 e 144. Como o solo estava com umidade elevada, a água atingiu a profundidade de 0,15 m. A alta umidade do solo nestes primeiros dias está associada a valores altos da condutividade hidráulica não saturada, a qual decresce exponencialmente com a umidade. Conforme Vieira et al. (1996), à medida que o solo seca, a umidade do solo atinge um valor em determinado momento, a partir do qual o processo evaporativo é regulado pela condutividade hidráulica. A distribuição espacial da umidade pode mudar rapidamente, em relação à condição para o solo mais úmido, conforme a função que relaciona condutividade e umidade.

No quadro 2, são apresentados os coeficientes de correlação entre os valores de umidade com base em

massa, nas duas profundidades, e entre estes o conteúdo de argila, nas duas profundidades. As correlações entre umidade e argila são também apresentadas. Para a umidade a 0,15 m, verifica-se que o período entre os dias 149 e 169 é caracterizado por valores do coeficiente de correlação acima de 0,90, como mostrado na região hachurada do quadro 2. Entre este período e o período anterior (dias 142 a 147), as correlações, embora significativas a 5%, são muito inferiores.

Durante os 20 dias de secagem, a partir do dia 149, verifica-se a estabilidade temporal da distribuição de umidade, como definida por Vachaud et al. (1985). O coeficiente de determinação (R^2) entre os dias 149 e 169, igual a 0,81, permite afirmar que 81% da variação dos dados de umidade no dia 169 pode ser explicada pela variação dos dados presente no dia 149.

Por outro lado, apenas 30% da variação presente no dia 169 é explicada pela variação presente no dia 142. Conforme van Wesenbeeck et al. (1988), a redução da correlação durante a secagem mostra que a distribuição espacial depende da umidade média do solo, não sendo estável no tempo. Isto identifica dois períodos distintos, relacionados com os estádios do processo evaporativo. O primeiro, entre os dias 142 e 147, é caracterizado pela umidade acima da capacidade de campo, pelo aporte de água de forma irregular pela chuva e pela variabilidade do processo de redistribuição, o que contribuiu para os baixos coeficientes de correlação. O segundo período, entre os dias 149 e 169, é caracterizado pela estabilidade temporal da distribuição espacial de umidade do solo. Nesse período, a redução da umidade depende da perda de água pela superfície do solo e do movimento lento de água sob a ação da gravidade, regido pela relação entre condutividade e umidade.

Quadro 1. Estatística descritiva para umidade com base em massa (kg kg⁻¹) medida em campo, em duas profundidades, durante o processo de secagem

	Profundidade de 0,15 m								Profundidade de 0,30 m							
	Dia do ano															
	142	145	147	149	152	155	163	169	142	145	147	149	152	155	163	169
Média	0,220	0,223	0,216	0,210	0,199	0,190	0,184	0,176	0,242	0,243	0,242	0,242	0,237	0,232	0,228	0,225
Mediana	0,220	0,222	0,218	0,213	0,203	0,194	0,186	0,180	0,243	0,244	0,243	0,245	0,238	0,233	0,231	0,228
Desvio-padrão	0,013	0,013	0,015	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,018
Assimetria	-0,03	0,01	-0,29	-0,32	-0,30	-0,30	-0,19	-0,09	0,35	0,16	-0,16	0,16	0,29	0,26	0,24	0,29
Curtose	-0,33	-0,12	-0,57	-0,66	-0,41	-0,71	-0,51	-0,51	-0,14	0,22	0,25	-0,09	0,09	0,27	0,05	-0,05
C.V. (%)	6,1	5,8	6,8	8,4	9,1	9,4	10,0	10,3	7,2	7,4	7,6	7,4	7,5	7,5	7,6	7,8

Quadro 2. Coeficientes de correlação entre umidade com base em massa medida em campo e correlação destas com conteúdo de argila nos pontos amostrais

Dia	Profundidade de 0,15 m								Profundidade de 0,30 m							
	Dia do ano															
	142	145	147	149	152	155	163	169	142	145	147	149	152	155	163	169
142	1							1								
145	0,96	1						0,98	1							
147	0,85	0,88	1					0,95	0,96	1						
149	0,59	0,61	0,67	1				0,94	0,94	0,91	1					
152	0,56	0,59	0,66	0,99	1			0,93	0,93	0,90	0,99	1				
155	0,58	0,61	0,69	0,98	0,99	1		0,93	0,93	0,89	0,99	0,99	1			
163	0,56	0,63	0,67	0,92	0,93	0,94	1	0,94	0,94	0,90	0,99	0,98	0,99	1		
169	0,55	0,62	0,68	0,90	0,92	0,93	0,98	1	0,92	0,92	0,89	0,98	0,98	0,99	0,99	1
Argila	0,49**	0,47**	0,33**	0,13	0,11	0,10	0,19	0,17	0,59*	0,59*	0,55*	0,53*	0,52*	0,53*	0,5*	0,48*

*, ** significativos a 5 e 1%, respectivamente.

A umidade a 0,30 m apresentou menor variação que a 0,15 m, ao longo do tempo. A variação entre médias dos dias 142 e 169, mostrada no quadro 1, é da ordem de 20% para a umidade na camada superficial e da ordem de 7%, para a profundidade de 0,30 m. Os coeficientes de correlação para valores de umidade na profundidade de 0,30 m, foram superiores a 0,89 (Quadro 2). Pode-se verificar que 85% da variação presente no dia 169 é explicada pela variação presente no dia 142. Nessa profundidade, a distribuição espacial da umidade manteve-se estável no tempo. A correlação com o conteúdo de argila foi significativa a 1% em todas as datas de amostragem (Quadro 2).

Caracterizada a estabilidade temporal da umidade para a faixa de umidades de maior interesse em agricultura irrigada, pode-se tirar proveito desse fato. De acordo com Vachaud et al. (1985), é possível identificar em campo os pontos que estimem a média de umidade na área, qualquer que

seja o seu valor. Estes devem ser os pontos de monitoramento da umidade, para obter descrição segura da umidade média na área, com reduzido esforço amostral. Com este propósito, foram calculadas as diferenças relativas (equação 1), para as profundidades de 0,15 e 0,30 m, a partir dos dados de umidade obtidos para as oito datas, entre os dias 142 e 169. As diferenças relativas médias e os respectivos desvios-padrão, calculados como descrito por Vachaud et al. (1985), são mostrados nas figuras 3 e 4, respectivamente. A avaliação visual permite identificar para cada profundidade o local de amostragem com valores de umidade próximos às médias no espaço, ao longo do tempo. Para maior confiabilidade da estimativa, deve-se optar pelo local que apresenta diferença relativa média próxima de zero, com o menor desvio-padrão. Para a profundidade de 0,15 m, este local é o de número 51 e, para a profundidade de 0,30 m, é o de número 3.

Para fins de controle de irrigação, estas são as posições nas quais os tensiômetros deveriam ser instalados.

A figura 4 permite avaliar, visualmente, os pequenos desvios-padrão no tempo dos valores de umidade a 0,30 m. Isto comprova a persistência da distribuição espacial no tempo, expressando que a posição relativa na função de distribuição de probabilidade dos valores referentes aos pontos experimentais permanece, praticamente, inalterada, à medida que o solo seca. Tal comportamento caracteriza uma condição de umidade do solo, nesta profundidade, na qual a redução da umidade ocorre de forma lenta, sendo o movimento da água regulado pela condutividade hidráulica. Essa distribuição espacial pode mudar substancialmente para uma condição de umidade acima da capacidade de campo.

Para a camada superior, como pode ser observado na figura 3, as dispersões tendem a ser maiores, principalmente à medida que se afasta da diferença relativa próxima de zero. Tal fato pode estar associado, pelo menos em parte, ao aporte de água ocorrido nos primeiros dias de medidas.

Apesar da estabilidade temporal, a adoção de um valor médio para umidade pressupõe distribuição normal, estacionaridade e independência espacial. A estatística descritiva e a análise espacial permitiram verificar o atendimento da hipótese de normalidade e de estacionaridade intrínseca da umidade, mas nada informaram sobre a estrutura de dependência espacial (Kachanoski & De Jong, 1988).

Para avaliar se a umidade apresenta estrutura de dependência espacial, foram construídos os semivariogramas experimentais mostrados nas

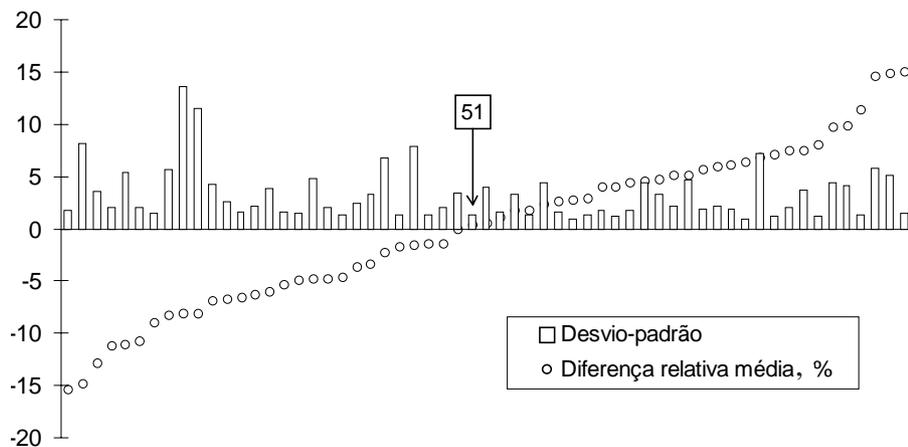


Figura 3. Diferença relativa percentual média no tempo, para umidade do solo medida a 0,15 m de profundidade e respectivo desvio-padrão no tempo. O valor indicado corresponde à posição no espaço do ponto a ser adotado para futuras medições.

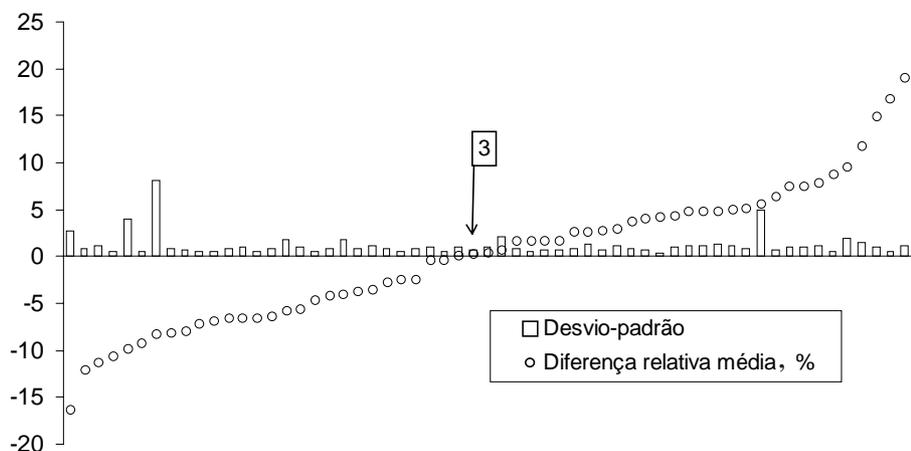


Figura 4. Diferença relativa percentual média no tempo, para umidade do solo medida a 0,30 m de profundidade e respectivo desvio-padrão no tempo. O valor indicado corresponde à posição no espaço do ponto a ser adotado para futuras medições.

figuras 5 e 6, para as profundidades de 0,15 e 0,30 m, respectivamente. Na figura 5a, encontram-se os semivariogramas experimentais para a umidade nos dias 142 a 147, escalonados pela variância amostral. A semelhança entre estes permite o ajuste de um único modelo teórico (Sph1), cujos parâmetros são apresentados no quadro 3. O alcance é da ordem de 28 m e o efeito pepita corresponde a 38% do patamar. A estrutura de dependência espacial é responsável por cerca de 62% da variação total. Para os dias posteriores ao 149, os semivariogramas são mostrados na figura 5b. Uma vez que os semivariogramas escalonados foram muito semelhantes, pode ser adotado um semivariograma médio para o período. Os valores, mínimo e máximo, obtidos para a semivariância em cada valor de h são mostrados por meio das linhas pontilhadas na figura 5b. O modelo ajustado ao semivariograma médio (Sph2) mostra que o alcance cresceu em relação ao período anterior, para valores da ordem de 40 m. Vieira et al. (1996) também verificaram um aumento do alcance do semivariograma na medida em que a umidade do solo se reduziu, atingindo uma condição na qual o processo de perda de água é lento. A umidade apresenta estrutura de dependência espacial responsável por cerca de 58% da variação total. O semivariograma cruzado com argila não mostrou estrutura.

Para umidade a 0,30 m, a semelhança entre os semivariogramas para todos os dias permitiu o ajuste de um semivariograma médio. Os valores, mínimo e máximo, da semivariância para cada valor de h são mostrados por meio das linhas pontilhadas na figura 6a. O modelo ajustado apresenta alcance de 22 m e efeito pepita de apenas 22% do patamar. A estrutura de dependência espacial dessa propriedade é semelhante à verificada para o conteúdo de argila, cujo semivariograma é também mostrado na figura 6a. Para argila, o alcance é de 20 m e o efeito pepita corresponde a 23% do patamar. Tal fato evidencia uma correlação espacial entre essas propriedades, verificada por meio do semivariograma cruzado (Figura 6b). Nesta figura, percebe-se que um semivariograma cruzado médio pode ser adotado, considerando o estreito intervalo entre os valores, mínimo e máximo, mostrados por meio das linhas pontilhadas. O efeito pepita foi igual a zero e o alcance igual a 21 m, intermediário entre o alcance de 20 m para argila e 22 m para as umidades, evidenciando a correlação espacial entre essas variáveis. Este resultado mostra que a correlação linear, ao desconsiderar a posição dos valores no espaço, é insuficiente para descrever a interdependência entre estas variáveis, uma vez que apenas 23% da variação presente nos dados de umidade no dia 169 foi explicada pela variação presente nos dados de conteúdo de argila (Quadro 2).

Para fins de manejo da irrigação, é importante monitorar a umidade do solo entre a capacidade de campo e um valor mínimo, obtido em função da

Quadro 3. Coeficientes dos modelos ajustados aos semivariogramas: efeito pepita (C_0), alcance (a), "sill" (C), patamar (C_2) e variância amostral para conteúdo de argila (s^2)

Referência	C_0	C	a	C_2	(C_0/C_2)	s^2	Modelo
Sph1	0,48	0,76	28	1,24	38		esférico
Sph2	0,55	0,77	40	1,32	42		esférico
Sph3	0,32	1,10	22	1,42	22		esférico
Sph4 ⁽¹⁾	0,25	0,82	20	1,07	21	15,5	esférico
Sph5	0	1,67	21	1,67	0		esférico

⁽¹⁾ argila.

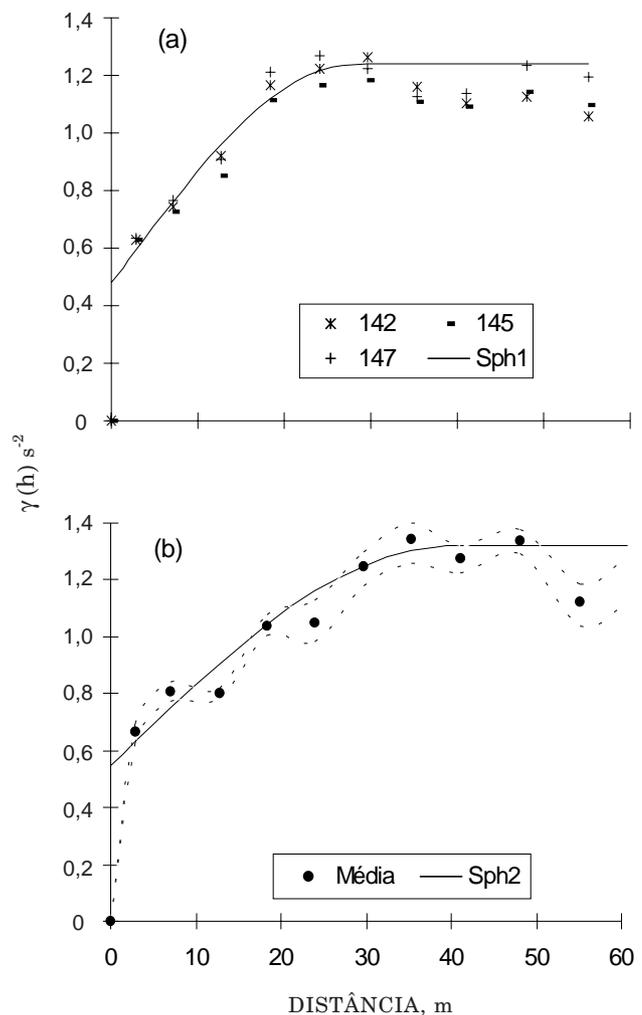


Figura 5. Semivariogramas experimentais para umidade com base em massa a 0,15 m de profundidade, para os dias 142 a 147 (a) e para a média dos dias 149 a 169 (b). As linhas pontilhadas correspondem aos valores, mínimo e máximo, obtidos e as linhas contínuas aos modelos ajustados.

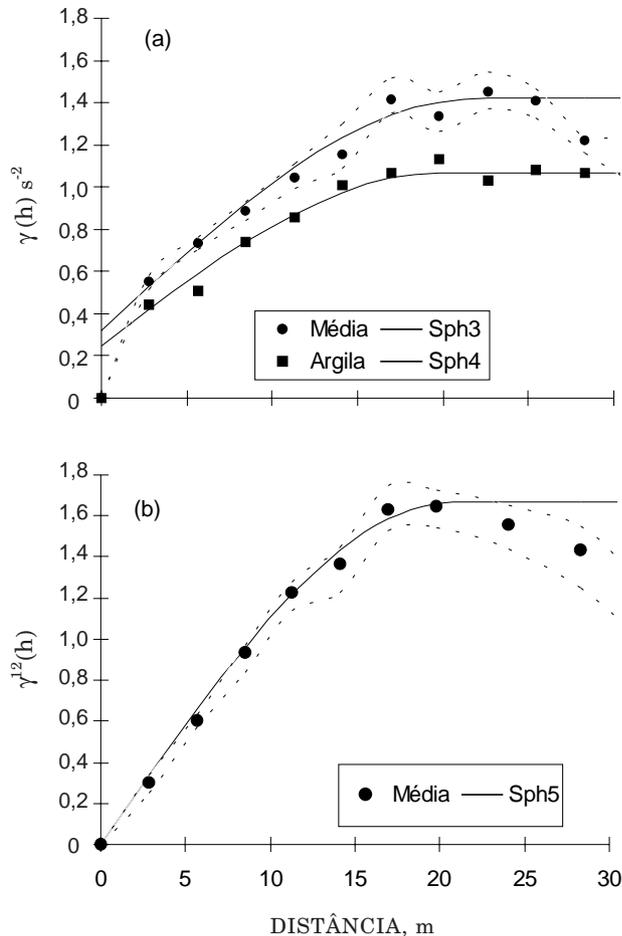


Figura 6. Semivariogramas experimentais para argila e para umidade com base em massa a 0,30 m de profundidade, para os dias 142 a 169 (a) e semivariogramas cruzados entre estas variáveis (b). As linhas pontilhadas correspondem aos valores, mínimo e máximo, obtidos e as linhas contínuas aos modelos ajustados.

lâmina de água a ser aplicada. No presente estudo, a variação da umidade do solo correspondeu a uma variação de 17 mm no armazenamento de água no solo, na camada de 0 a 0,40 m, compreendendo uma faixa de valores de umidade que ocorre nos intervalos entre irrigações com este sistema. Dessa forma, é possível afirmar que, se as irrigações forem feitas com lâminas inferiores ou iguais a 17 mm, o que é usual, a estrutura de dependência espacial da umidade se manifesta e permanece estável no tempo, a menos que a umidade assuma valores muito elevados (acima da capacidade de campo). Para a profundidade de 0,30 m, pode-se também afirmar que a correlação espacial entre umidade e conteúdo de argila é caracterizada por um semivariograma cruzado com estrutura espacial bem definida e que pouco se altera com a mudança de umidade na faixa correspondente a este estudo.

A técnica proposta por Vachaud et al. (1985) possibilitou a identificação de pontos de amostragem para fins de monitoramento da umidade do solo, nas condições usuais de irrigação na área irrigada pelo pivô central. A análise dos dados com base no método de Kachanoski & De Jong (1988), embora não permita identificar os pontos preferenciais para amostragem, permite comprovar a estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade. No entanto, para estas análises, pressupõe-se a independência dos valores. Os semivariogramas para os dados de umidade descrevem a estrutura de dependência espacial para as duas profundidades e mostram que, no processo de secagem, essa estrutura pouco varia no tempo, exceto para valores elevados de umidade, logo após a aplicação de água. Os semivariogramas cruzados mostram que há correlação espacial entre umidade a 0,30 m e conteúdo de argila do solo.

Uma vez conhecido o semivariograma para umidade, desde que a umidade do solo em determinado momento esteja dentro da faixa de valores correspondentes a este trabalho, pode-se fazer interpolação por meio de krigagem, a partir de uma amostragem em campo, para obter o mapeamento da umidade do solo. O inconveniente desse procedimento em relação à adoção de um local para a amostragem, como forma de se estimar a média, é que o número de amostras tem de ser expressivamente maior. Visando obter a descrição espacial da umidade em dado momento, com menor esforço amostral, propõe-se o uso do semivariograma cruzado com conteúdo de argila, para realizar a interpolação por meio da cokrigagem. A opção por um ou outro procedimento dependerá da qualidade da informação desejada. Para fazer irrigação com base na condição média da área, basta monitorar a umidade nos pontos selecionados. Para fazer o manejo em subáreas específicas, prática que se insere no contexto da agricultura de precisão, uma descrição espacial da umidade do solo é desejável e, neste caso, pode-se tirar proveito da estrutura de dependência espacial e da sua estabilidade no tempo, dentro da faixa de umidade estudada, para descrevê-la.

CONCLUSÕES

1. A umidade do solo medida em campo apresenta distribuição espacial estável no tempo, durante a secagem do solo, na faixa de valores de umidade que usualmente ocorre entre irrigações. A análise das diferenças relativas para os valores de umidade constitui uma maneira simples e eficaz de identificar pontos de amostragem para a estimativa do valor médio, com reduzido esforço amostral.

2. Para controle de irrigação, uma amostragem intensa pode ser realizada, visando avaliar a estabilidade temporal da distribuição espacial da

umidade e identificar os pontos que permitem estimar adequadamente a umidade média de toda a área. Após esta identificação, a umidade pode ser monitorada apenas nesses pontos, por meio do tensiômetro.

3. Os valores de umidade não se distribuem de forma aleatória na área. A estrutura de dependência espacial é bem definida nas duas profundidades, embora diferindo entre elas, e se mantém estável dentro da faixa de valores de umidade identificada. A correlação espacial com conteúdo de argila na camada inferior expressa uma relação determinística com a textura, o que assegura a estabilidade da distribuição espacial da umidade. A opção de adotar um valor médio para umidade em determinado momento pode ser substituída pela descrição da distribuição espacial dessa propriedade no espaço.

LITERATURA CITADA

- BEIGUELMAN, B. Curso prático de Bioestatística. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Genética, 1994. 244p.
- BRESLER, E.G.; DAGAN, G. & HANKS, R.J. Statistical analysis of crop yield under controlled line-source irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:841-847, 1982.
- CAMERON, D.R. Variability of soil water retention curves and predicted hydraulic conductivities on a small plot. *Soil Sci.*, 126:364-371, 1978.
- CRESSIE, N. When are relative variograms useful in geostatistics? *Math. Geol.*, 17:693-701, 1985.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.
- JOURNEL, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington, American Geophysical Union, 1989. 40p.
- KACHANOSKI, R.G. & DE JONG, E. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. *Water Res. Res.*, 24:85-91, 1988.
- McBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, 37:617-639, 1986.
- ROLSTON, D.E.; BIGGAR, J.W. & NIGHTINGALE, H.I. Temporal persistence of spatial soil-water patterns under trickle irrigation. *Irrig. Sci.*, 12:181-186, 1991.
- RUSSO, D. & BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I. An analysis of field spatial variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:682-687, 1981.
- TURATTI, A.L. & REICHARDT, K. Variabilidade do armazenamento de água em terra roxa estruturada. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:253-257, 1991.
- VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P. & VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:822-827, 1985.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G. & NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited soil observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:175-184, 1983.
- van WESENBEEK, I.J.; KACHANOSKI, R.G. & ROLSTON, D.E. Temporal persistence of spatial patterns of soil water content in the tilled layer under a corn crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:934-941, 1988.
- VIEIRA, S.R.; GUIMARÃES, E.C.; DECHEN, S.C.F.; MARIA, I.C.; ROCHETE, P.; TOPP, G.C. & ZEBCHUK, W. Analisando simultaneamente variabilidade espacial e temporal usando semivariogramas tridimensionais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia, 1996. CD-ROM, Comissão 1, Trabalho 53.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.