

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES QUÍMICAS EM UM SOLO SALINO-SÓDICO⁽¹⁾

J. J. OLIVEIRA⁽²⁾, L. H. G. CHAVES⁽³⁾,
J. E. QUEIROZ⁽⁴⁾ & J. G. de LUNA⁽⁵⁾

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estudar a variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico de origem aluvial, no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, município de Sousa (PB). Numa área experimental de 2.912 m², foram coletadas amostras de terra numa malha quadriculada com espaçamento de 4 x 4 m, na profundidade de 0-0,30 m. As análises dos dados foram realizadas por meio de técnicas estatísticas descritivas e geoestatísticas. Os resultados obtidos mostraram que a capacidade de troca catiônica (CTC) apresentou distribuição normal, os dados de condutividade elétrica (CE), potássio e magnésio apresentaram distribuição lognormal e as demais propriedades químicas não seguiram nenhuma das distribuições avaliadas. Os maiores coeficientes de variação foram obtidos para magnésio, cálcio e condutividade elétrica (CE) e o menor, para o pH. A análise da dependência espacial mostrou que a percentagem de sódio trocável (PST), potássio e cálcio revelaram forte dependência, enquanto a CTC, CE, Mg, Na e o pH apresentaram moderada dependência espacial, com alcance variando de 12 (CE e CTC) a 27 m (Ca).

Termos de indexação: estatística descritiva, semivariograma, dependência espacial, química de solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor apresentada à Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Recebido para publicação em agosto de 1998 e aprovado em maio de 1999.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, M.Sc. em Irrigação e Drenagem pela UFPB. Rua José do Patrocínio, 278. CEP 58107-603 Campina Grande (PB).

⁽³⁾ Professora Titular do Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciência e Tecnologia, UFPB. Caixa Postal 10087, CEP 58109-970 Campina Grande (PB). E-mail: chaves@paqtc.rpp.br.

⁽⁴⁾ Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal, UFPB. Caixa Postal 64, CEP 58700-970 Patos (PB). E-mail: elenildo@cstr.ufpb.br.

⁽⁵⁾ Professor Doutor do Departamento de Matemática e Estatística, UFPB. Av. Aprígio Veloso, 882. Caixa Postal 10044, CEP 58109-970 Campina Grande (PB).

SUMMARY: *SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL PROPERTIES IN A SALINE-SODIC SOIL*

The objective of this work was to studying the spatial variability of some chemical properties of a saline-sodic soil of alluvial origin, in the Irrigated Perimeter of São Gonçalo, district of Sousa-PB, Brazil. At an experimental area of 2912 m², soil samples were collected in a grid with a spacing of 4 x 4 m, at a layer depth of 0 to 0.30 m. The data analysis was carried out by means of descriptive statistics and geostatistics. The results showed that the cation exchange capacity (CEC) presented normal distribution, and the data of electrical conductivity (EC), potassium and magnesium suggested lognormal distribution; the remaining chemical properties did not follow the probability of distributions evaluated. The highest coefficients of variation were found for magnesium, calcium and electrical conductivity (EC), and the lowest for the pH. Spatial dependence analysis showed that exchangeable sodium percentage (ESP), K and Ca presented a strong spatial dependence and CEC, EC, Mg, Na and the pH a moderate spatial dependence, ranging from 12 m (EC and CEC) to 27 m (Ca).

Index terms: descriptive statistics, semivariogram, spatial dependence, soil chemistry.

INTRODUÇÃO

Uma característica marcante do solo é a sua heterogeneidade. Assim, em uma paisagem natural, o solo apresenta uma ampla variação de propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, tanto horizontal como verticalmente, resultante da superposição dos diversos fatores de formação envolvidos (Beckett & Webster, 1971). O conhecimento dessa variação é importante para o levantamento e classificação de solos, para a avaliação de sua fertilidade, para o desenvolvimento de esquemas de amostragem mais adequados, para o planejamento experimental, bem como para as definições de práticas apropriadas de manejo e de recuperação (Souza, 1992).

Os solos aluviais, particularmente os classificados como salinos e, ou, salino-sódicos, em decorrência de fatores relacionados com os processos de formação e das ações antrópicas, principalmente quando do uso da irrigação, podem exibir elevada variabilidade espacial. Essa variabilidade pode, muitas vezes, mascarar ou levar à uma interpretação errônea dos efeitos dos tratamentos em um ensaio. Desse modo, uma análise criteriosa, visando conhecer melhor o comportamento espacial das características físicas e químicas desses solos, é um aspecto de fundamental importância e pode ser feita pelo uso de técnicas estatísticas descritivas (geral e espacial) e geoestatísticas.

As técnicas geoestatísticas, com base na construção de semivariogramas, permitem a descrição da dependência espacial das propriedades estudadas (Vieira, 1995). Vários autores, como Coelho (1983), Coelho & Ferreyra (1986), Guimarães et al. (1992), Souza (1992), Araújo et al. (1993), Gomes et al. (1994), Souza et al. (1997) e outros, têm

estudado a variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas dos solos, demonstrando, em muitos casos, dependência espacial.

O presente trabalho teve por objetivo estudar a variabilidade e a dependência espacial de propriedades químicas de um solo salino-sódico em uma área pertencente à Estação Experimental da Embrapa Algodão, com a finalidade de fornecer subsídios para o planejamento de futuros experimentos na área.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas-DNOCS, numa área pertencente à Estação Experimental da Embrapa Algodão. A unidade experimental foi constituída de um solo aluvial de relevo plano, correspondente a uma área de 2.912 m², tendo 52 m de largura e 56 m de comprimento, quadriculada com 4 x 4 m, perfazendo 14 linhas e 13 colunas. Em cada ponto da malha experimental, foi coletada uma amostra de solo na profundidade de 0-0,30 m, totalizando 182 amostras, as quais foram levadas ao laboratório de Irrigação e Salinidade do DEAg da UFPB, onde, depois de secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura, foram analisadas quimicamente.

Determinaram-se: o pH em água na relação 1:2,5 (solo:água); a condutividade elétrica (CE) e cátions solúveis no extrato de saturação, de acordo com os procedimentos descritos por Richards (1954); os teores totais de Ca, Mg, K, e Na, conforme métodos recomendados pela EMBRAPA (1979); os cátions

trocáveis, pela diferença entre os totais e os solúveis; a capacidade de troca de cátions (CTC), pela soma das bases trocáveis, e a percentagem de sódio trocável (PST), pela relação entre o sódio trocável (Na⁺) e a (CTC).

Os dados obtidos foram inicialmente analisados por meio de técnicas estatísticas descritivas, ou seja, por meio do cálculo da média, coeficiente de variação (CV), amplitude, assimetria, curtose e uma análise de distribuição de frequência dos dados, verificando se seguiam a distribuição normal ou a lognormal. Para testar a hipótese de normalidade (ou lognormalidade) dos dados, utilizou-se o teste W (Shapiro & Wilk, 1965) a 1%. A estatística W testa a hipótese nula de que a amostra é proveniente de uma população com distribuição normal. Assim, no caso de dados transformados na forma logarítmica ($y = \ln x$), W testa a hipótese nula de que os valores y_i provêm de uma distribuição normal, isto é, os dados não transformados (x_i) ajustam-se a uma distribuição lognormal (Parkin & Robinson, 1992). Nesse caso, a média geométrica (MG) é equivalente ao antilogaritmo da média dos valores transformados, ou seja, $MG = \exp(\bar{y})$, com intervalo de confiança (IC) calculado pela expressão (Parkin & Robinson, 1992):

$$IC = \exp \left(\bar{y} \pm \frac{S_y t_{(1-\alpha/2)}}{\sqrt{N}} \right)$$

em que S_y é um estimador do desvio-padrão da média \bar{y} e $t_{(1-\alpha/2)}$ é o t de Student obtido com N-1 graus de liberdade e probabilidade $1-\alpha/2$.

As análises descritivas foram realizadas com o objetivo de observar o comportamento geral dos dados (a forma de distribuição, a magnitude de variabilidade, tendência central, etc.). Esse tipo de análise, embora considere os dados independentes espacialmente, é importante por permitir a identificação de dados atípicos que podem exercer algum tipo de influência nas análises geoestatísticas, como também para comparação entre resultados obtidos em outros trabalhos.

A análise da dependência espacial foi avaliada pela construção de semivariogramas, obtidos a partir do cálculo das semivariâncias pela expressão:

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

em que $\gamma^*(h)$ é a semivariância estimada a partir dos dados experimentais; Z são os valores medidos nos pontos x_i e $x_i + h$; N(h) é o número de pares de pontos separados por uma distância h (Carvalho, 1996). No cálculo das semivariâncias, utilizou-se o programa computacional Geo-EAS (Engelud & Sparks, 1988).

A construção dos semivariogramas foi feita por meio do processo de tentativa e erro. Para os

semivariogramas que apresentaram estrutura de dependência espacial, ajustou-se um modelo matemático para definição de seus parâmetros. Foram utilizados os seguintes modelos:

- (a) esférico, $\gamma^*(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$ para $0 < h \leq a$ e $\gamma^*(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$;
- (b) exponencial, $\gamma^*(h) = C_0 + C [1 - \exp(-\frac{3h}{a})]$ para $0 \leq h < d$, sendo d a máxima distância na qual o semivariograma é definido;
- (c) gaussiano, $\gamma^*(h) = C_0 + C [1 - \exp(-3(\frac{h}{a})^2)]$ para $h \geq 0$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes de assimetria e de curtose em uma distribuição normal devem ser 0 e 3, respectivamente (Snedecor & Cochran, 1967). Apenas os valores de CTC ajustaram-se a esse tipo de distribuição, segundo o teste W a 1% de probabilidade (Quadro 1). Souza et al. (1997), no entanto, avaliando a variabilidade de propriedades químicas do solo em um pomar cítrico, observaram uma distribuição lognormal para a CTC do referido solo. Segundo esses mesmos autores, as diferenças no tipo de distribuição para uma mesma propriedade devem-se às diferenças no nível e à forma da variabilidade do solo nas áreas estudadas.

Altos valores positivos do coeficiente de assimetria indicam uma distribuição de frequência com cauda mais alongada à direita da máxima frequência. Em geral, as variáveis que apresentam esse comportamento tendem a uma distribuição lognormal. No caso das variáveis químicas estudadas, os maiores coeficientes de assimetria positivos foram obtidos para magnésio (1,86), condutividade elétrica (1,41) e potássio (1,13). A aplicação do teste de Shapiro-Wilk a 1% de probabilidade revelou distribuição lognormal para essas variáveis químicas. A partir dos dados transformados dessas variáveis na forma logarítmica, isto é, $y = \ln x$ e $y = \ln(x + 1)$, sendo x a variável original, foram obtidas as médias geométricas, os intervalos de confiança, os coeficiente de assimetria e curtose constantes no quadro 2. A transformação $y = \ln(x + 1)$ foi utilizada apenas para o K (valores entre 0 e 1).

Com base nos limites de CV propostos por Warrick & Nielsen (1980), para a classificação de propriedades do solo, observa-se, no quadro 1, que o pH apresentou baixa variação (CV < 12%), a PST, CTC e K apresentaram variação média (12% < CV < 60%) e a CE, Ca, Mg e Na apresentaram alta variação (CV > 60%). Isto evidencia a heterogeneidade da área experimental, o que está de acordo com Opazo (1978), Coelho (1983) e Coelho & Ferreyra (1986). Por diversas razões, essa heterogeneidade é própria de solos aluviais. Uma delas é a origem

Quadro 1. Medidas descritivas dos dados de variabilidade das propriedades químicas de um solo salino-sódico

Variável	Média	C.V. (%)	Amplitude	Assimetria ⁽¹⁾	Curtose ⁽¹⁾	W ⁽²⁾
pH em água	9,77	11,06	4,17	-0,98	2,58	0,81
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,24	48,24	0,62	1,13	4,52	0,91
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,53	80,43	5,31	0,99	3,23	0,88
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	1,71	65,68	9,44	1,86	7,04	0,79
Na (cmol _c kg ⁻¹)	8,79	65,93	22,64	0,25	1,91	0,92
CTC (cmol _c kg ⁻¹)	12,25	39,43	25,47	0,21	2,66	0,98**
PST (%)	42,83	62,96	90,51	-0,11	1,64	0,90
CE (dS m ⁻¹)	7,20	79,20	30,92	1,41	5,24	0,86

⁽¹⁾ Assimetria e Curtose são adimensionais. ⁽²⁾ Estatística de Shapiro-Wilk. ** Significativo a 1%.

Quadro 2. Valores da média geométrica (MG), intervalo de confiança (IC), assimetria, curtose e estatística de Shapiro-Wilk (W), obtidos a partir dos dados transformados das propriedades químicas, condutividade elétrica, potássio e magnésio

Variável	MG	IC*	Assimetria	Curtose	W
CE (dS m ⁻¹)	5,25	4,65 a 5,96	-0,24	2,37	0,96**
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,21	0,19 a 0,24	0,86	3,65	0,97**
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	1,12	0,79 a 1,26	-0,36	3,24	0,97**

* e ** Intervalo com confiança de 95% e significativo a 1%, respectivamente.

desses solos, provenientes de depósitos sucessivos de diferentes materiais. Outras seriam a distribuição e o acúmulo desses materiais na área, dependendo da topografia, do manejo químico e, ou, físico e do processo de lixiviação que ocorre nesta área ao longo do tempo. O fato de não ter ocorrido grande variação nos valores de pH deve-se, provavelmente, à baixa concentração hidrogeniônica na solução do solo em estudo.

A análise por semivariogramas mostrou que todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial. Todos os semivariogramas construídos ajustaram-se bem ao modelo esférico, exceção feita para os dados pH e magnésio, que se ajustaram melhor ao modelo gaussiano e linear, respectivamente (Figura 1 e Quadro 3), concordando com Trangmar et al. (1987), Souza (1992), Cambardella et al. (1994) e Salviano (1996).

O efeito pepita constitui medida importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada, que pode ser devida a erros de medidas ou microvariação não detectada, considerando a distância de amostragem utilizada (Cambardella et al., 1994), e pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em

estudo (Trangmar et al., 1985). Para analisar o grau de dependência espacial dessas variáveis, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita $\leq 25\%$ do patamar, de dependência espacial moderada, quando o efeito pepita está entre 25 e 75%, e de dependência fraca, quando o efeito pepita é $> 75\%$.

A análise do efeito pepita das variáveis químicas estudadas mostrou que a PST, K e Ca apresentaram forte dependência espacial (13, 20 e 15%, respectivamente), enquanto as demais variáveis químicas apresentaram moderada dependência, variando de 33 a 61% (Quadro 3).

O alcance de dependência espacial é outro atributo importante no estudo do semivariograma e significa a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente. Dessa forma, o valor do alcance de determinada variável garante que todos os vizinhos situados dentro de um círculo com esse raio são tão semelhantes que podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (Vieira & Lombardi Neto, 1995). No quadro 3 e figura 1, pode-se observar que os valores do alcance obtidos variaram de 12 (CE e CTC) a 27 m (Ca), os quais correspondem ao raio das áreas consideradas

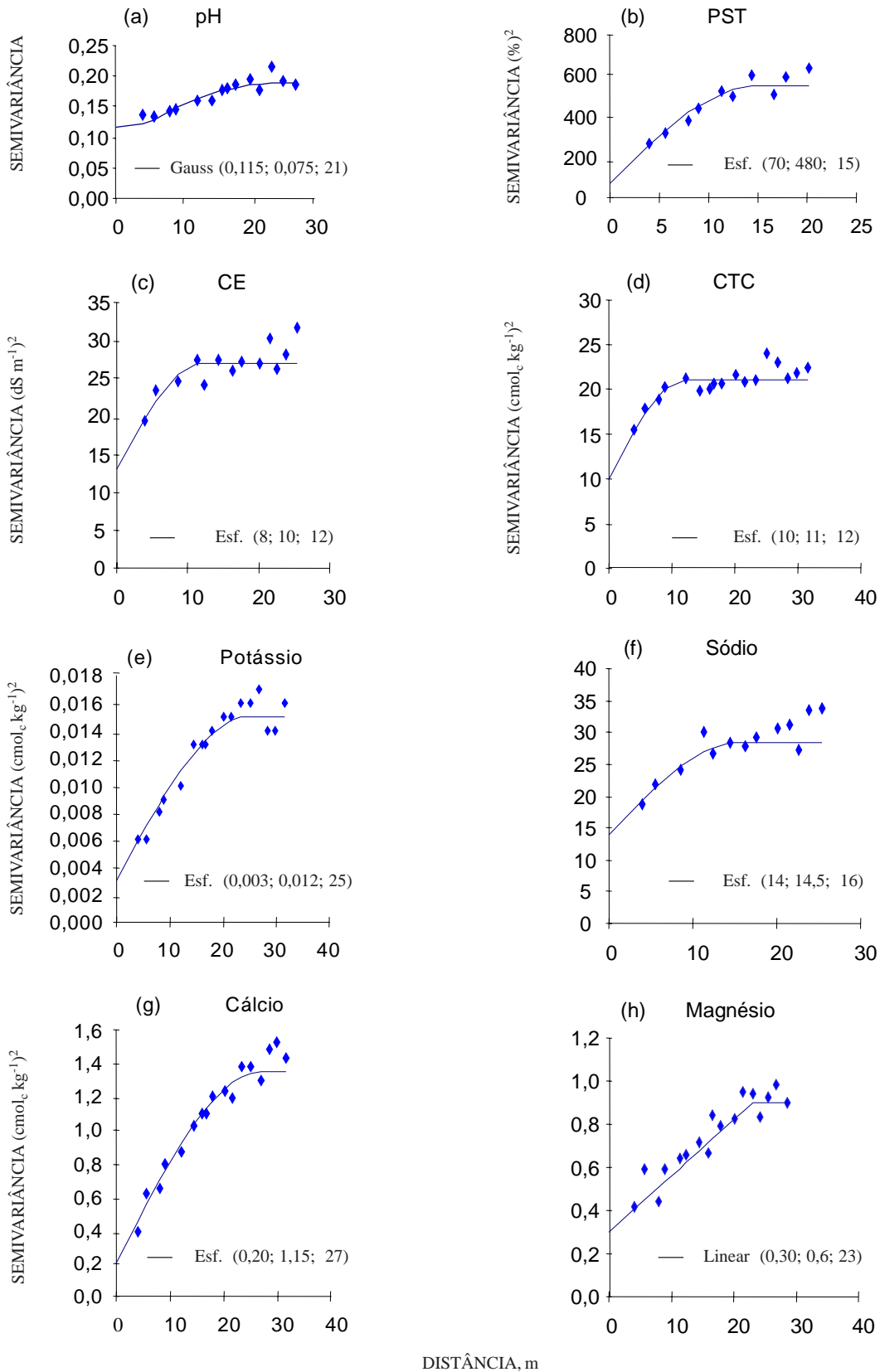


Figura 1. Semivariograma para as variáveis químicas pH (a), percentagem de sódio trocável (b), condutividade elétrica (c), capacidade de troca de cátions (d), potássio (e), sódio (f), cálcio (g) e magnésio (h), mostrando os modelos ajustados e os parâmetros C_0 , C_1 e alcance da dependência espacial.

Quadro 3. Estimativa dos parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (a) e relação nugget effect/patamar (expressa em percentagem) dos modelos ajustados aos semivariogramas, para todas as propriedades químicas estudadas

Variável	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	$[C_0/C_0 + C_1] \times 100$
pH	Gaussiano	0,115	0,19	21	61
K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Esférico	0,003	0,015	25	20
Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Esférico	0,20	1,35	27	15
Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Linear	0,30	0,90	23	33
Na ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Esférico	14	28,5	16	49
CTC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Esférico	10	21	12	48
PST (%)	Esférico	70	550	15	13
CE (dS m^{-1})	Esférico	8	18	12	44

homogêneas para cada variável química analisada. Esses resultados são importantes para o planejamento experimental e devem ser levados em consideração em termos de proposta de manejo da área, assim como na determinação do número de pontos que devem ser amostrados para obter uma melhor representatividade. O número mínimo de amostras para compor uma amostra composta e estimar o valor da variável química de interesse, para dada precisão desejada, poderia ser estimado em função do coeficiente de variação (CV) e da variação admitida em torno da média, conforme Souza (1992), assumindo independência espacial entre as observações e a normalidade dos dados. Como as análises geoestatísticas revelaram dependência espacial, propõe-se considerar o alcance na realização de futuras amostragens.

CONCLUSÕES

1. Das variáveis estudadas a CTC seguiu a distribuição normal, enquanto a condutividade elétrica, potássio e magnésio seguiram a distribuição lognormal. A PST e o pH não seguiram nenhuma das distribuições avaliadas.

2. O menor e o maior coeficiente de variação foram observados para o pH (11,06%) e Mg, (95,68%), respectivamente. As demais variáveis químicas apresentaram valores intermediários a esses.

3. A PST, o K e o Ca apresentaram forte dependência espacial, tendo alcances de 15, 25 e 27 m, respectivamente, enquanto as demais propriedades químicas, pH, CE, Mg, Na e CTC, apresentaram moderada dependência, com alcances variando de 12 a 23 m.

4. Os resultados obtidos por meio da análise da dependência espacial devem ser levados em consideração na definição de futuras amostragens, estratégias de manejo e recuperação da área estudada.

LITERATURA CITADA

- ARAÚJO, M.A.M.; AQUINO, L.H. & OLIVEIRA, M.S. O espaçamento adequado para estimar a média da capacidade de troca de cátions a pH 7,0 em amostragem de solos com malhas quadradas. *Ci. Prat.*, 17:252-255, 1993.
- BECKETT, P.H.T. & WEBSTER, R. Soil variability: a review. *Soil Fertil.*, 34:1-15, 1971.
- 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 Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501-1511, 1994.
- CARVALHO, O.S. Variabilidad espacial y temporal de la matéria orgânica em um typic xerofluvent sometido a distintos sucesiones de cultivo. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agronomia da Universidade Politécnica de Madrid, 1996.140p. (Tese de Doutorado)
- COELHO, M.A. Variabilidade espacial de características físicas e químicas em solo salino-sódico. *Ci. Agron.*,14:149-196, 1983.
- COELHO, M.A. & FERREYRA, F.F. Caracterizacion of salt-affected soil in the semi-arid region of Northeastern Brazil. *Turrialba*, 36:171-178, 1986.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.
- ENGELUD, E. & SPARKS, A. Geo-EAS - Geostatistical Environmental Assessment Software. Las Vegas, U.S. Environmental Protency Agency, 1988. v.1. (EPA/600/4-88/033a)
- GOMES, L.L.; OLIVEIRA, M.; MEDEIROS, J.F. & FILHO, F.Q.P. Diagnóstico da salinidade do solo no Perímetro Irrigado de Itans Caicó-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., Campinas, 1994. Anais. Campinas, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994. p.106.

- GUIMARÃES, E.C.; AQUINO, L.H. & OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial do pH em água e da argila dispersa em água. *Ci. Prat.*, 19:12-17, 1992.
- OPAZO, J.D. Estudio estadístico de la variabilidad de los resultados analíticos en muestreo de suelos en huertos frutales. *Inves. Agric.*, 4:69-73, 1978.
- RICHARDS, L.A., ed. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington, U.S. Salinity Laboratory, 1954. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60)
- SALVIANO, A.A.C. Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1996. 91p. (Tese de Doutorado)
- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. Na analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52:591-611, 1965.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 6.ed. Ames, Iowa State University Press, 1967. 593p.
- SOUZA, L. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 162p. (Tese de Doutorado)
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:367-372, 1997.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K. & UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, 38:45-94, 1985.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. & SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:668-674, 1987.
- VIEIRA, S.R. Curso de atualização em conservação de solos. Geostatística em estudos de variabilidade espacial. Campinas, IAC, Seção de Conservação do Solo, 1995. 61p. Part 1. (Apostila)
- VIEIRA, S.R. & LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. *Bragantia*, 54:405-412, 1995.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. *Application of soils physics*. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.