

Planejamento amostral dos teores biodisponíveis de elementos potencialmente tóxicos no estado de São Paulo, Brasil⁽¹⁾.

José Marques Júnior⁽²⁾; Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni⁽³⁾ Daniel De Bortoli Teixeira⁽⁴⁾; Diego Silva Siqueira⁽⁵⁾ Livia Arantes Camargo⁽⁶⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da FAPESP.

⁽²⁾ Prof. Dr. do Dept. de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal, Jaboticabal-SP, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPQ; ⁽³⁾ Prof. Dr. do Dep. de Ciência do Solo da ESALQ/USP, Piracicaba-SP, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPQ; ⁽⁴⁾ Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal (Bolsista FAPESP). ⁽⁵⁾ Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal (Bolsista CAPES). ⁽⁶⁾ Pós-Doutoranda (Bolsista FAPESP) do Dept. de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal.

RESUMO: Os teores biodisponíveis de elementos potencialmente tóxicos (EPT) apresentam grande variabilidade no tempo e espaço relacionada a fatores antropogênicos e naturais. O objetivo do trabalho é caracterizar a variabilidade espacial dos teores biodisponíveis de EPTs no solo do Estado de São Paulo. O estudo foi realizado a partir de 19.360 amostras localizadas em 273 municípios do Estado de São Paulo. Foram avaliados os teores de Cu, Fe, Mn, Zn, B e Al disponíveis no solo. A variabilidade foi avaliada pela estatística descritiva e geoestatística. O número mínimo de pontos necessários para uma representação da variabilidade dos EPTs foi estimado com base nas análises descritiva e variográficas. Todos os EPTs avaliados apresentaram dependência espacial. Os resultados demonstram que para futuros estudos de mapeamentos de EPTs no estado de São Paulo, devem ser utilizados no mínimo 400 locais amostrados ao longo do território do estado, resultando em um espaçamento médio entre pontos de 26 Km.

Termos de indexação: micronutrientes, variabilidade espacial, otimização amostral.

INTRODUÇÃO

O mapeamento dos teores biodisponíveis de elementos potencialmente tóxicos (EPT) no solo pode contribuir para otimização do uso de insumos agrícolas (White & Zasoski, 1999) e para identificação de áreas contaminadas (Juang et al., 2004). Mapeamento em escalas intermediárias, abrangendo estados e municípios, possibilitam o delineamento de áreas com deficiência ou toxicidade de determinado elemento químico (White & Zasoski, 1999). Os mapeamentos nesta escala são escassos em território brasileiro mas contribuem para planejamentos agrícolas e urbanos em países como a China (Liu et al., 2004; Lu et al., 2012; Liu et al., 2013) e EUA (Franzen et al., 2006). No Brasil existem poucos estudos em grandes escalas e

abrangem áreas variando de poucos metros quadrados até 170 hectares (Couto & Klamt, 1999; Guedes Filho et al., 2010; Parfitt et al., 2009). Os autores desses estudos objetivam, principalmente, obter informações relacionadas a programas de agricultura de precisão.

Os padrões espaciais dos teores de micronutrientes no Brasil ainda são pouco conhecidos. Tal conhecimento possibilitaria também o estabelecimento de possíveis relações entre os processos e fatores de formação do solo e a expressão espacial dos micronutrientes disponíveis no solo. Diversos pesquisadores relacionam a variabilidade dos teores destes elementos com a variação geológica, forma do relevo, clima, classes de solos e práticas agrícolas de manejo. Estas informações podem nortear os planejamentos agrícolas, urbanos, ecológicos e estudos em geomedicina.

Técnicas de espacialização que utilizam procedimentos geoestatísticos têm sido amplamente utilizadas para estudos de mapeamento, e o principal interpolador é a krigagem ordinária (KO). A krigagem ordinária é o interpolador geoestatístico mais utilizado em ciências do solo, devido a sua simplicidade e rapidez no processo de estimativa, sendo caracterizada por apresentar a melhor estimativa linear não viesada da propriedade em estudo. A utilização conjunta dos conceitos, técnicas e metodologia de análises mencionadas anteriormente pode auxiliar na compreensão detalhada da variabilidade espacial de EPTs no estado de São Paulo, subsidiando a elaboração de índices de referência mais condizentes para cada região. Neste sentido o objetivo deste trabalho é caracterizar a variabilidade espacial dos EPTs disponíveis no solo do Estado de São Paulo para fornecer informações que possam balizar estudos futuros sobre o planejamento amostral para caracterização detalhada de EPTs em grandes áreas.

MATERIAL E MÉTODOS

Os resultados foram obtidos a partir de 19.360 amostras de solo analisadas no período de 1999 a 2006. Estas amostras foram alocadas em 273 cidades do estado de São Paulo, 27 cidades do estado do Paraná, 11 cidades estado de Minas Gerais e 4 cidades do estado do Mato Grosso. A utilização de amostras provenientes de outros estados foi necessária para que as estimativas espaciais fossem realizadas de forma precisa ao longo de todo seu território, respeitando assim os princípios de interpolação exigidos nas análises geoestatísticas. Os teores de Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis no solo foram determinados por extração com DTPA pH 7,3 (Lindsay & Norvell, 1978). Os teores de B foram determinados por extração em água quente, usando aquecimento com forno de micro-ondas (Berger & Truog, 1939). Os teores de Al foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ (Lindsay & Norvell, 1978). Foram realizadas análises estatísticas e geoestatísticas. O número mínimo de pontos a ser amostrados foi determinado considerando os resultados das análises descritivas e variográficas. Segundo Cline (1944) o número mínimo de amostras pode ser determinado utilizando a variabilidade inferida pelos valores de coeficiente de variação. Após avaliação do número de pontos necessário para planejamento amostral, a determinação dos locais em que devem ser conduzidas novas amostragens foi realizada com uso do software SANOS 0.1 (van Groenigen et al., 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os altos valores de assimetria (> 1.32) e curtose (> 1.20) indicam uma fuga à distribuição normal dos resultados (**Tabela 1**). Assim, neste estudo, antes da análise geoestatística as variáveis passaram por uma transformação logarítmica natural, visando à obtenção de variogramas com patamar bem definido, atendendo assim, os princípios estabelecidos pela hipótese intrínseca. De acordo com os valores de coeficiente de variação, as variáveis apresentaram a seguinte ordem decrescente de variabilidade: Cu > Mn > Al > Zn > B > Fe. Modelos esféricos foram ajustados aos variogramas experimentais de todos EPTs. Os maiores alcances, e por sua vez maior homogeneidade, foram obtidos para os teores de Mn (589.36 km) e Fe (497.14 km) (**Tabela 2**). Valores de RMSEp > 0.71 indicam que os modelos

utilizados para a predição espacial captam menos de 50% da variabilidade dos pontos. Apenas os modelos ajustados às variáveis Cu (0.38) e B (0.67) conseguiram uma boa captação da variabilidade dos dados originais. Isso indica a necessidade de futuros estudos para uma caracterização mais detalhada (**Tabela 2**). O baixo desempenho dos modelos deve-se, principalmente, a alta variabilidade encontrada para todos os teores dos EPTs no estado de São Paulo (**Tabela 1**) aliada a um número limitado de locais amostrados. O alcance obtido para o variograma escalonado foi de 394,08 km (**Tabela 2**), indicando ser este o limite de dependência espacial quando todos os EPTs em estudo são considerados conjuntamente. Quando os alcances obtidos para os variogramas foram utilizados como critério de planejamento amostral, o número mínimo de amostras variou de 179 (Mn) a 1743 (Zn) (**Tabela 3**), sendo estes os EPTs que apresentam, respectivamente, o maior e o menor valores de alcance (**Tabela 3**). Utilizando o alcance do variograma escalonado verificou-se a necessidade da amostragem de no mínimo 400 pontos para representação da área. Esse número diferiu daquele que seria obtido caso uma simples média aritmética do número de pontos indicados separadamente para cada micronutriente fosse considerada, evidenciando assim o rigor do procedimento utilizado. Utilizando o critério proposto por Cline (Cline, 1944), o número mínimo de pontos que devem ser amostrados variou de 926 (Fe) a 12163 (Cu), sendo estes diretamente proporcionais ao grau de variabilidade captado pelo CV da estatística descritiva (**Tabela 1**). Com exceção dos números de amostras requeridos para representação do Zn, o critério sugerido por Cline (Cline, 1944) superestimou, em todos os casos, a quantidade de amostras necessárias. A **Figura 1** apresenta os mapas simulados pelo programa SANOS 0.1 considerando três cenários: variograma escalonado, número de Cline obtido para o teor de ferro e variograma do zinco. O número de cline calculado para o teor de Fe foi utilizado por representar a menor necessidade de amostragem dentre os micronutrientes estudados. Os resultados destas simulações fornecem subsídios para um maior detalhamento dos mapas obtidos neste estudo. Esta abordagem pode ser utilizada como estratégia para estabelecimento de programas de agricultura de precisão bem como ferramenta para o estabelecimento de políticas públicas, principalmente em relação as legislações que regem os limites toleráveis de EPTs no solo. Os pontos planejados, nas três simulações, apresentaram maior tendência a serem alocados nas extremidades sul, leste e oeste do estado, em

detrimento a uma menor necessidade de amostragem na região central do estado. Estes locais representaram respectivamente, áreas com menor e maior densidade amostral, refletindo maiores e menores erros nas estimativas realizadas (**Figura 1**). As regiões noroeste e sudoeste apresentaram a maior redução do espaçamento nos cenários simulados. Tal fato está relacionado às menores densidades amostrais avaliadas nestas regiões. Também observa-se maior homogeneidade entre os espaçamentos das distintas regiões, uma vez que, com o aumento do número de amostras simuladas, as áreas com amostragens escassas passaram a receber maior número de amostras, de forma que o resultado final seja altamente homogêneo embora continue sendo um gradeado amostral irregular.

CONCLUSÕES

Todos os EPTs avaliados apresentaram estrutura de dependência espacial.

Nossos resultados demonstram que para futuros estudos de mapeamentos de EPTs no estado de São Paulo, devem ser utilizados no mínimo 400 locais amostrados ao longo do território do estado, resultando em um espaçamento médio entre pontos de 26 Km.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela concessão da Bolsa de Produtividade em Pesquisa ao primeiro e segundo autores.

REFERÊNCIAS

BERGER, K.C. & E. TRUOG. Boron determination in soils and plants. *Ind. Eng. Chem. Anal.* 11:540-544, 1939

CLINE, M.G. Principles of soil sampling. *Soil Science.* 58:275-288, 1944.

COUTO, E.G. & KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do estado de Mato Grosso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34:2321-2329, 1999.

FRANZEN, D.W. et al. A Survey of Soil Attributes in North Dakota by Landscape Position. *Agronomy Journal*, 98:1015-1022, 2006.

GUEDES FILHO, O., et al. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:1-14, 2010.

JUANG, K.W. et al. Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, 127:229-238, 2004.

LINDSAY, W.L. & W.A. NORVELL. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal.* 42:421-428, 1978.

LIU, X.M. et al. Application of geostatistics and GIS technique to characterize spatial variabilities of bioavailable micronutrients in paddy soils. *Environmental Geology*, 46:189-194, 2004.

LIU, Y. et al. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. *Science of the Total Environment*, 450-451:108-119, 2013.

LU, A. et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 425:66-74, 2012.

PARFITT, J.M.B. et al. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* Solo, 33:819-830, 2009.

VAN GROENIGEN, J.W. et al. Constrained optimization of soil sampling for minimization of the kriging variance. *Geoderma* 87:239-259, 1999.

WHITE, J.G. & ZASOSKI, R.J. Mapping Soil Micronutrients. *Field Crops Research* 60:11-26, 1999.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos teores biodisponíveis de elementos potencialmente tóxicos no solo do estado de São Paulo.

Variável	Média mg dm ⁻³	CV %	Mínimo ---- mg dm ⁻³ ----	Máximo	Ass.	Curt.
Al	3.2	164	0.00	66.00	5.11	45.79
B	0.4	96	0.00	4.78	5.49	52.13
Cu	2.6	277	0.00	109.00	11.87	164.87
Fe	49.6	77	0.00	273.00	1.96	5.02
Mn	13.6	174	0.00	245.00	5.74	41.74
Zn	1.4	99	0.00	6.43	1.32	1.20

(N=19360); CV = coeficiente de variação; Ass.= Assimetria; Curt.= Curtose.

Tabela 2 - Parâmetros dos modelos esféricos ajustados aos teores biodisponíveis de elementos potencialmente tóxicos nos solos do estado de São Paulo, Brasil.

Variável	C ₀	C ₀ +C ₁	A	C ₀ /(C ₀ +C ₁)	SQR	R ²	Validação Cruzada		
							a	b	RMSEp
Al	0.25	0.40	386.90	0.62	3.9E -3	0.86	0.05	1.01	0.76
B	0.02	0.03	461.10	0.73	7.3E -6	0.84	0.23	0.36	0.67
Cu	0.14	0.22	265.00	0.64	3.5E -4	0.86	-0.08	1.05	0.38
Fe	753.88	1394.00	497.14	0.36	1.6E +5	0.80	3.65	0.93	0.81
Mn	0.66	0.99	589.36	0.61	4.2E -3	0.96	-0.95	1.06	0.94
Zn	0.18	0.23	188.68	0.81	4.4E -4	0.79	0.23	0.84	0.92
Escalonado	0.70	1.01	394.08	0.69	---	---	---	---	---

(N=315); C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; A = alcance (km); C₀/(C₀+C₁) = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação; a = coeficiente linear da regressão; b = coeficiente angular da regressão; RMSEp = raiz do erro quadrático médio padronizado.

Tabela 3 - Número mínimo de pontos necessários, calculados para fórmula de Cline (1944) e alcance do variograma, para uma representação acurada da variabilidade dos teores biodisponíveis de elementos potencialmente tóxicos nos solos do estado de São Paulo, Brasil.

Variável	Cline (1944)	Variograma
Al	3828	415
B	1450	292
Cu	12163	884
Fe	926	251
Mn	4769	179
Zn	1308	1743
Escalonado	-	400

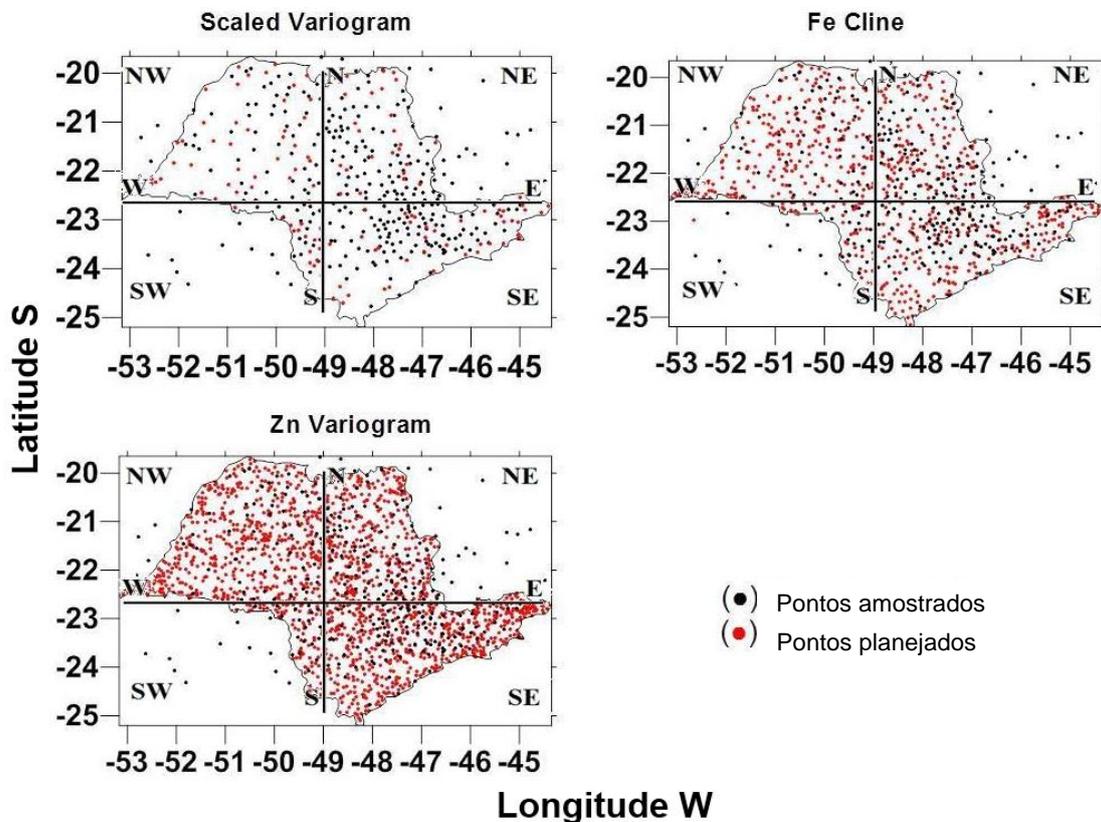


Figura 1 - Distribuição espacial dos pontos amostrados (●) e planejados (●) pelo software SANOS 0.1.