

COMPARATIVO ENTRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO AMOSTRADOS DE FORMA CONVENCIONAL E EM MALHA

Gabriel Araújo e Silva Ferraz¹, Fábio Moreira da Silva², Marcelo Silva de Oliveira³, Flávio Castro da Silva⁴, Luis Carlos Cirilo Carvalho⁵

(Recebido: 16 de março de 2016; aceito: 22 de julho de 2016)

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos do solo de uma lavoura cafeeira, realizando o mapeamento destes atributos para visualizar a distribuição espacial. Objetivou-se ainda comparar os teores apresentados pelos atributos do solo na amostragem convencional e amostragem em grade. Este trabalho foi conduzido na fazenda Brejão no município de Três Pontas, Minas Gerais, utilizando-se os atributos do solo: pH, P, Prem, K, Ca, Mg, Al, H + Al, m, T, t, SB, V e MO amostrados de forma convencional e em grade amostral quadrada de 64 pontos georreferenciados acrescida de 36 pontos de grade zoom. A análise destes dados por meio das técnicas geoestatísticas possibilitou caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo em estudo, permitindo o mapeamento destas variáveis. Foi possível identificar as diferenças apresentadas nos teores dos atributos do solo comparativamente para a amostragem convencional e em grade georreferenciada para aplicação na cafeicultura de precisão.

Termos para indexação: Agricultura de Precisão, geoestatística, gerenciamento, cafeeiro.

COMPARISON BETWEEN THE SOIL CHEMICAL ATRIBUTES SAMPLED CONVENTIONALLY AND IN GRID

ABSTRACT: The aim in this article was to characterize the structure and magnitude of the spatial distribution of soil attributes on a coffee field and map these attributes in order to identify the spatial dependence of them. It was aimed to compare the attribute amount when it was sampled conventionally or in grid sampling. This study was carried out on the Brejão farm in Três Pontas, Minas Gerais state, Brazil. As a data base were used pH, P, Prem, K, Ca, Mg, Al, H + Al, m, T, t, SB, V e MO sampled conventionally or sampled in a 64 point squared grid georeferenced with 36 points from grid zoom as well. The analysis of these data by geostatistics tools allowed characterize the spatial variability which allowed creating maps of spatial distribution of the variables. It was possible to identify differences presented in the amount of soil attributes sampled conventionally and in georeferenced grid sampling in precision coffee culture.

Index terms: Precision Agriculture, geostatistics, management, coffee plant.

1 INTRODUÇÃO

Um número crescente de agricultores brasileiros tem-se tornado adepto da utilização da Agricultura de Precisão em suas propriedades. De acordo com Dong, Vuran e Irmak (2012), a necessidade de modernização da produção agrícola tem encorajado produtores rurais a se renderem a uma nova geração de práticas agrícolas chamada de agricultura de precisão.

No agronegócio do café, aos poucos, a agricultura de precisão vem ganhando maior aceitação e, também, novas tecnologias têm sido desenvolvidas em especial para esta cultura. Como um exemplo deste fato, Molin et al. (2010) utilizaram um sensor de produtividade em tempo real instalado em uma colhedora automotriz e

testaram um protótipo de adubadora que realiza aplicação a taxas variáveis.

A tecnologia de aplicação a taxa variável (VRT) é uma parte importante da agricultura de precisão, pois preconiza a aplicação de insumos tais como fertilizantes ou sementes, em níveis específicos, adequados à área de gestão (YUAN et al., 2010). Morales, Vázquez e Paz-Ferreiro (2011) afirmam que o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado como princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala. Segundo Basso et al. (2011) o manejo de uma propriedade que não leve em consideração a variabilidade espacial presente no solo, é economicamente e ambientalmente ineficiente.

^{1,2} Universidade Federal de Lavras/ULFA - Departamento de Engenharia/DEG - 37.200-000 - Lavras - MG - gabriel.ferraz@ufla.br, famsilva@ufla.br

³ Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Ciências Exatas/DEX - 37.200-000 - Lavras - MG - marcelo.oliveira@dex.ufla.br

⁴ Universidade Federal Fluminense - Departamento de Engenharia Agrícola e do Meio Ambiente - Rua Passo da Pátria, 156 - São Domingos - 24.210-240 - Niterói - RJ - flavio-ter@vm.uff.br

⁵ Universidade Estadual de Santa Cruz/UESC - Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais/DCAA - Campus Soane Nazaré de Andrade - Rod. Jorge Amado, Km 16 - Salobrinho - 45.662-900 - Ilhéus - BA - lccarvalho@uesc.br

A Geoestatística é uma ferramenta importante para análise de dados no âmbito da agricultura de precisão. Segundo Vieira (2000), o objetivo da Geoestatística aplicada à agricultura de precisão é caracterizar a magnitude da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas, e fazer mapas (pelo método de estimação denominado de Krigagem), utilizando o princípio da variabilidade espacial, a fim de se identificarem inter-relações destes atributos no espaço e, se interessante, também no tempo.

Desta maneira, o presente trabalho tem por objetivo caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos do solo em lavoura cafeeira e realizar o mapeamento destes atributos de forma a visualizar a distribuição espacial, considerando a dependência espacial das variáveis e também realizar a comparação entre os teores médios dos atributos levantados em grade amostral para a cafeicultura de precisão, perante a amostragem convencional aleatória.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais, em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*C. arabica*) da cultivar Topázio, instalada em dezembro de 2005, no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3289 plantas.ha⁻¹. As coordenadas geográficas do ponto central da área são de 21°25'58" de latitude sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich. A altitude máxima desta área é de 914,7 m. Os pontos limites da área foram obtidos por meio do uso de GPS topográfico.

O clima do local é caracterizado como ameno, tropical de altitude, com temperaturas moderadas, verão quente e chuvoso, classificado por Köppen como Cwa (SÁ JUNIOR et al., 2012). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso.

O manejo imposto na área nas safras 2007/2008 e 2008/2009 foi o de adubação diferenciada, baseado em agricultura de precisão, conforme descrito por Ferraz et al. (2011). Nas demais safras, a adubação foi realizada de forma convencional.

Foram realizadas nesta área, em julho de 2011, duas formas de amostragem do solo: a convencional e a em malha amostral quadrada. Para ambos os tipos de amostragem foram avaliados os seguintes atributos químicos do solo: pH do solo, disponibilidade de Fósforo

(P) (Extrator Mehlich 1), Fósforo remanescente (Prem), disponibilidade de Potássio (K) (Extrator Mehlich 1), Cálcio Trocável (Ca²⁺) (Extrator: KCL – 1mol/L), Magnésio Trocável (Mg²⁺) (Extrator: KCL – 1mol/L), Acidez Trocável (Al³⁺) (Extrator: KCL – 1mol/L), Acidez Potencial (H + Al) (Extrator SMP), Saturação por Alumínio (m), CTC pontencial (T), CTC efetiva (t), Soma de Bases (SB) Saturação por Base (V) e Matéria Orgânica (MO). As amostras de solo compostas foram enviadas ao o laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciência dos Solos da Universidade Federal de Lavras para se procederem às devidas análises dos atributos do solo.

Para amostragem convencional foram realizadas coletas de solo, com trado holandês, na profundidade de 0 – 20 cm na projeção da saia da planta de cafeeiro, retirando-se 10 subamostras para cada 11 ha e, assim, homogeneizando-as e obtendo apenas uma amostra composta. Dessa forma, obtiveram-se duas amostras compostas para a área em estudo, o que fez com que esta fosse dividida ao meio em dois lados, o Lado A e o Lado B (Figura 1a).

Para a realização da amostragem em malha, demarcou-se na área em estudo uma malha amostral regular de 57 x 57 m, totalizando 64 pontos amostrais georreferenciados (em média 2,9 pontos por hectare) com a utilização do GPS topográfico, cujo erro médio era de 10 cm. Cada ponto amostral corresponde a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referência (Figura 1b).

A coleta do solo foi realizada por meio da retirada de subamostras na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade com o uso de um trado holandês. Em cada ponto amostral foi retirada uma subamostra de cada uma das quatro plantas que compõem este ponto. As subamostras, de cada ponto amostral foram homogeneizadas para formar uma amostra composta para este ponto.

Visando realizar um estudo comparativo entre as formas de amostragem utilizadas neste estudo, principalmente no tocante à interpretação da fertilidade do solo e da disponibilidade dos atributos, foi utilizada a Tabela 1, permitindo, desta maneira, a observação das classes de interpretação.

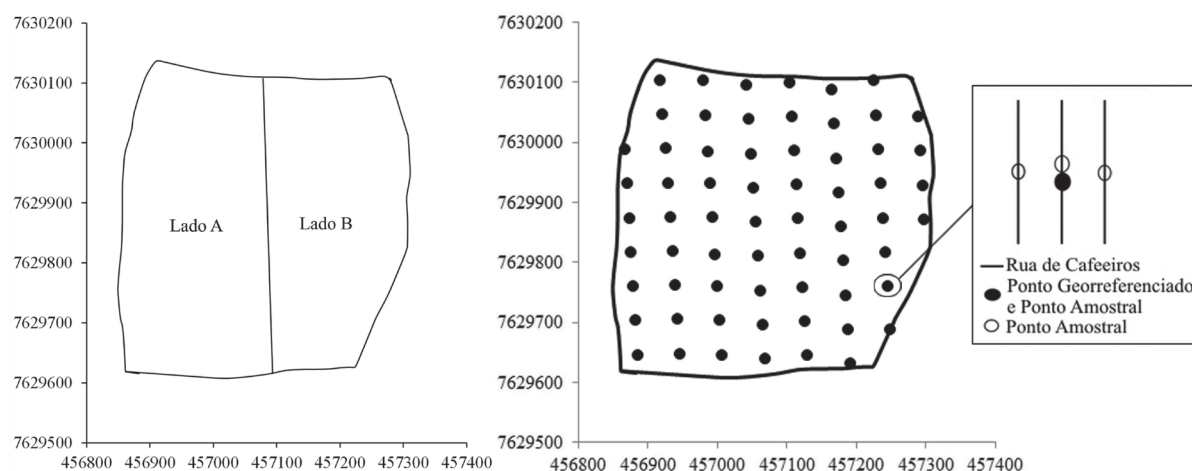


FIGURA 1 - Amostragem Convencional (a) e Malha Amostral e detalhamento da amostragem (b).

TABELA 1 - Classes de interpretação de fertilidade do solo, do complexo de troca catiônica, da matéria orgânica, para o pH e para a disponibilidade de Fósforo e Potássio.

Atributo	Unidade	Muito Baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito Bom
T	cmol _c /dm ³	≤ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 - 8,60	8,61 - 15,00	> 15,00
(t)	cmol _c /dm ³	≤ 0,80	0,81 - 2,30	2,31 - 4,60	4,61 - 8,00	> 8,00
MO	dag/Kg	≤ 0,70	0,71 - 2,00	2,01 - 4,00	4,01 - 7,00	> 7,00
Ca	cmol _c /dm ³	≤ 0,40	0,41 - 1,20	1,21 - 2,40	2,41 - 4,00	> 4,00
Mg	cmol _c /dm ³	≤ 0,15	0,16 - 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	> 1,50
SB	cmol _c /dm ³	≤ 0,60	0,61 - 1,80	1,81 - 3,60	3,61 - 6,00	> 6,00
V	%	≤ 20,0	20,1 - 40,0	40,1 - 60,0	60,1 - 80,0	> 80,0
P	mg/dm ³	≤ 4,0	4,1 - 8,0	8,1 - 12,0	12,1 - 18,0	> 18
K	mg/dm ³	≤ 15	16 - 40	41 - 70	71 - 120	> 120
Atributo	Unidade	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alta	Muito Alta
Al	cmol _c /dm ³	≤ 0,20	0,21 - 0,50	0,51 - 1,00	1,01 - 2,00	> 2,00
H + Al	cmol _c /dm ³	≤ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00	> 9,00
(m)	%	≤ 15,0	15,1 - 30,0	30,1 - 50,0	50,1 - 75,0	> 75,0
Atributo	Unidade	Muito Baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito Alto
pH		< 4,5	4,5 - 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,0	> 7,0

Fonte: adaptado de Alvares et al. (1999)

No intuito de caracterizar a estrutura e a magnitude da dependência espacial dos atributos do solo e da planta da lavoura de cafeeira, foram realizados os ajustes de semivariograma, cuja semivariância é estimada pela equação 1.

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

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . Z pode ser qualquer um dos atributos estudados. x_i é a posição georreferenciada em que ocorreu a variável (atributo) Z . O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de

efeito pepita (C_0); patamar (C_0+C_1); e o alcance (a), conforme descrito por Bachmaier e Backers (2011). Foi utilizado o método dos quadrados mínimos ordinários para este ajuste de um modelo matemático.

O modelo matemático para semivariogramas escolhido foi o esférico, para todos os atributos estudados. Este modelo é muito utilizado em trabalhos de estudo de variabilidade espacial em lavouras cafeeiras de atributos do solo, produtividade, desfolha, força de desprendimento de frutos e infestação de praga (ALVES et al., 2011; FERRAZ et al., 2012a, 2012b; MOLIN et al., 2010; SILVA, A. et al., 2010; SILVA, F. et al., 2010). Ferraz et al. (2012c), estudando diferentes métodos e modelos, constatou que o modelo esférico foi o que se ajustou à maioria dos atributos do solo e à produtividade do cafeeiro.

Após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada a interpolação dos dados por krigagem ordinária de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial dos atributos na lavoura, por meio de mapas.

Para a análise geoestatística e para a confecção dos mapas, foi utilizado sistema computacional R Development Core Team (2011), por meio da biblioteca geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001). Os mapas foram gerados na coordenada Universal Transversa de Mercator (UTM), na zona 23K, na qual está inserida a região de Três Pontas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados da análise descritiva dos atributos do solo em estudos obtidos pela amostragem em malha quadrada, preconizada pela cafeicultura de precisão, bem como os resultados da análise de solo obtidos pela amostragem convencional podem ser observados na Tabela 2.

Pode-se perceber que os valores médios encontrados pela amostragem em malha e os valores obtidos pela amostragem convencional apresentam diferenças. Porém apenas a observação destes valores pode ser temerária, pois ao se analisar, também, os valores mínimos e máximos dos atributos do solo da amostragem em malha (Tabela 2), percebe-se que existe variação nos dados. Contudo, somente o conhecimento desta variação não é suficiente para identificar os locais onde se encontram os altos teores, e os locais onde se encontram os teores mais baixos de um determinado atributo do solo. Nesse caso, torna-se necessário utilizar a Geoestatística, para que

se possa identificar a estrutura de variabilidade espacial dos dados, bem como para realizar a confecção de mapas, a fim de possibilitar o gerenciamento preciso das intervenções necessárias.

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial de todos os atributos do solo em estudo (Tabela 3 e Figura 2).

O efeito pepita (C_0) é um importante parâmetro do semivariograma e indica a variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada. Contudo, é impossível quantificar a contribuição individual desses erros. Dessa forma, o efeito pepita pode ser expresso como porcentagem do patamar facilitando, assim, a comparação do grau de dependência espacial (GD) dos atributos em estudo (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985) (Tabela 3). Pela classificação de Cambardella et al. (1994) apenas os atributos P, Prem e t apresentaram GD moderado, enquanto que os demais apresentaram GD forte.

Os valores do alcance relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985) ou também dos atributos relacionados às plantas (Ferraz et al., 2012b). O alcance dos atributos do solo analisados variou de 56,74 m para o P até 224,26 m para o Prem. Porém pode-se observar que, para a maioria dos atributos, o alcance situou-se entre 78 a 89m.

Após o ajuste do semivariograma (Tabela 3 e Figura 2) para cada atributo do solo estudado, estimaram-se, por meio da krigagem ordinária, os valores destes atributos para os locais não amostrados. Dessa maneira, foi possível construir mapas de distribuição espacial (isocores) para todos eles (Figura 3, 4 e 5), que permitiram visualizar a variabilidade espacial na área.

A Tabela 4 foi confeccionada para realizar o comparativo da amostragem convencional com a amostragem em malha, na qual foram identificados os locais onde cada atributo foi classificado de acordo com a Tabela 1.

Observa-se, pelas Tabelas 2 e 4, que a amostragem convencional indicaria teores de P baixo e muito baixo, enquanto que a amostragem em malha (Figura 3a e Tabela 4) indicou também a existência de teores médio e muito bom de disponibilidade do P.

TABELA 2 - Análise descritiva dos dados de solo obtidos pela amostragem em malha em cafeicultura de precisão e resultados da análise de solo da amostragem convencional.

	Amostragem em Malha					Amostragem Convencional		
	Mín	Máx	Med	DP	CV	Lado A	Lado B	
pH	4,10	5,90	4,79	4,80	0,37	7,80	5,1	5,0
P	1,71	107,11	9,33	5,14	14,92	159,83	5,5	3,2
Prem	3,92	16,88	9,71	10,26	2,97	30,55	13,3	10,6
K	42,12	199,68	103,37	105,30	31,90	30,86	125	112
Ca	0,20	3,20	1,15	1,10	0,72	62,54	1,4	1,3
Mg	0,10	0,90	0,22	0,20	0,15	68,57	0,3	0,3
Al	0,10	1,80	0,81	0,80	0,48	58,60	0,6	0,5
H + Al	2,90	12,28	6,95	7,04	2,03	29,17	6,3	5,6
(m)	2,17	81,52	36,52	35,29	23,12	63,32	22,9	20,9
(T)	5,98	12,68	8,58	8,39	1,38	16,09	8,3	7,5
(t)	1,75	4,61	2,45	2,34	0,55	22,44	2,6	2,4
SB	0,41	4,51	1,63	1,55	0,91	55,50	2,0	1,9
V	3,22	60,91	20,39	17,96	13,12	64,33	24,3	25,1
MO	1,64	4,60	2,77	2,74	0,46	16,64	2,9	2,7

Mín – Valor mínimo do atributo; Máx – Valor máximo do atributo; – Média; Med – mediana; DP – Desvio Padrão; CV - Coeficiente de Variação.

TABELA 3 - Parâmetros estimados para o semivariograma experimental dos atributos do solo em estudo.

Atributo	C_0	$C_0 + C_1$	C_1	a	GD	
pH	0,00	0,15	0,15	84,60	0,00	Forte
P	45,77	132,80	178,57	56,74	25,63	Moderado
Prem	2,45	7,11	9,55	224,26	25,60	Moderado
K	135,65	931,15	1066,80	80,67	12,72	Forte
Ca	0,00	0,54	0,54	88,30	0,00	Forte
Mg	0,00	0,03	0,03	80,85	0,00	Forte
Al	0,00	0,24	0,24	78,19	0,00	Forte
H + Al	0,00	4,45	4,45	80,63	0,00	Forte
(m)	0,00	548,52	548,52	77,73	0,00	Forte
T	0,00	2,09	2,09	85,18	0,00	Forte
(t)	0,14	0,21	0,34	180,03	39,95	Moderado
SB	0,00	0,87	0,87	87,33	0,00	Forte
V	0,00	175,14	175,14	79,61	0,00	Forte
MO	0,00	0,19	0,19	139,81	0,00	Forte

C_0 – Efeito Pepita; C_1 - Contribuição; C_0+C_1 – Patamar; a – alcance e GD – Grau de Dependência Espacial.

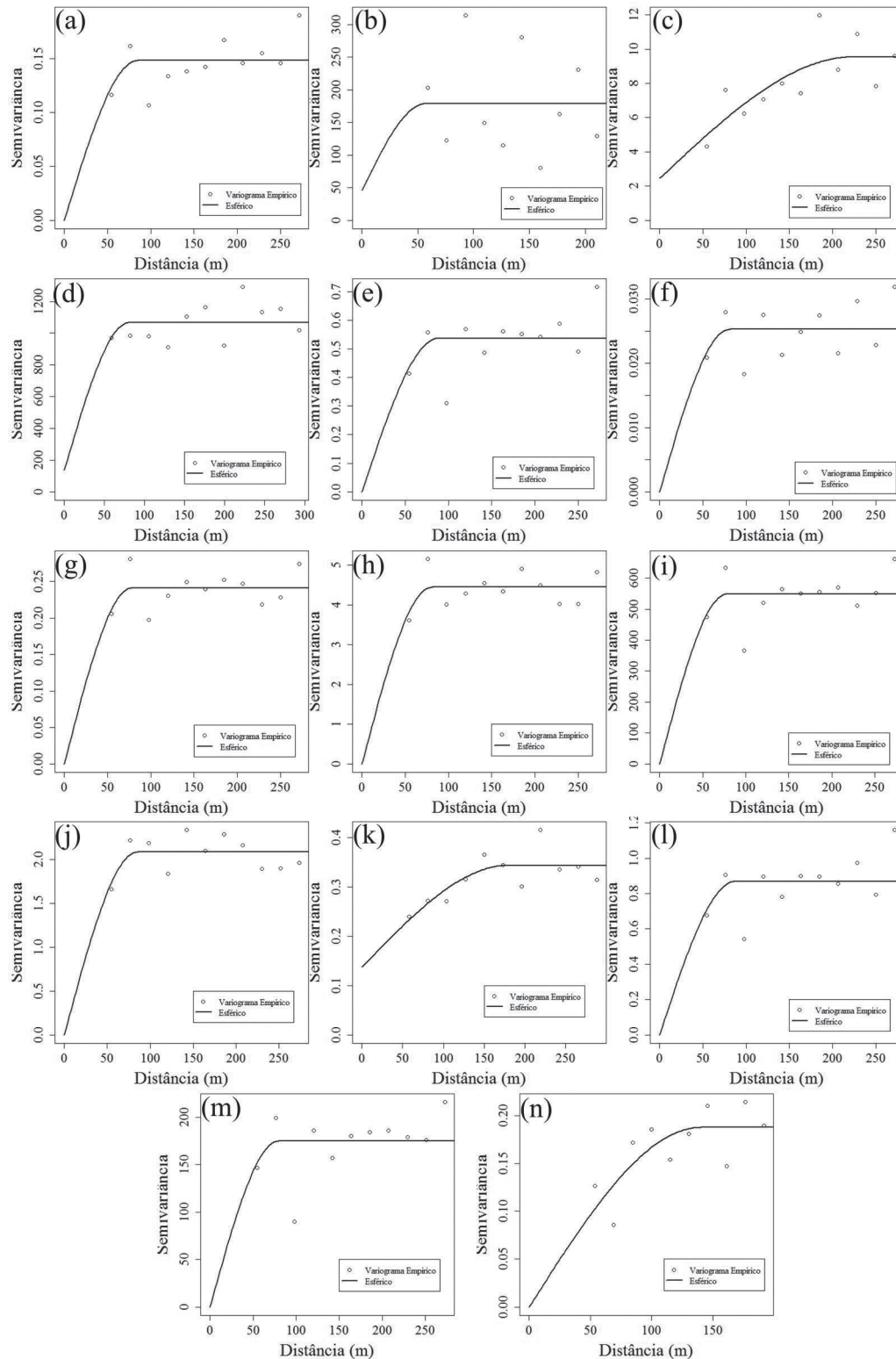


FIGURA 2 - Semivariograma do pH (a), P (mg/dm³) (b), Prem (mg/L) (c), K (mg/dm³) (d), Ca (cmol_c/dm³) (e), Mg (cmol_c/dm³) (f), Al (cmol_c/dm³) (g), H + Al (cmol_c/dm³) (h), m (%) (i), T (cmol_c/dm³) (j), t (cmol_c/dm³) (k), SB (cmol_c/dm³) (l), V (%) (m) e MO (dag/Kg) (n).

TABELA 4 - Comparativo entre a amostragem em malha e a amostragem convencional identificando a localidade e classificação dos teores dos atributos.

Atributo	Classe	Amostragem em Malha	Amostragem Convencional
pH	Bom	Pontos na região central, oeste, noroeste e sudoeste	-
	Baixo	No restante da área	Toda a area
	Muito Baixo	Poucos pontos na região sudeste e centro norte	-
P	Muito Bom	Ponto localizado na região sudeste, estendendo-se para região sul	-
	Médio	Pontos na região norte, central e leste	-
	Baixo	Grande parte do Mapa	Lado A
	Muito Baixo	Grande parte do Mapa	Lado B
Prem	0 a 4	Ao longo da borda oeste da área e em um ponto na região leste	-
	4 a 10	Maior parte da área	-
	10 a 19	Região central até a parte leste e também, na parte sul da área	Toda a area
K	Muito Bom	Pontos espalhados pela região central, nordeste, oeste, sudoeste e sudeste	Lado A
	Bom	Grande parte da área	Lado B
	Média	Pontos localizados na região sul, norte, nordeste e noroeste	-
Ca	Bom	Pontos na região central e na região oeste	-
	Médio	Grande parte da area	Toda a area
	Baixo	Grande parte da area	-
	Muito Baixo	Pontos espalhados pela região sudeste, sudoeste, norte e noroeste	-
Mg	Médio	Região central	-
	Baixo	Grande parte da área	Toda a area
	Muito Baixo	Grandes manchas na região norte, central, sudeste e sudoeste	-
Al	Alta	Regiões norte, noroeste, sul e sudoeste	-
	Média	Grande mancha na parte leste e noroeste	Lado A
	Baixa	Manchas nas regiões sudoeste e oeste e pontualmente na região noroeste	Lado B
	Muito Baixa	Manchas nas regiões sudoeste e oeste e pontualmente na região noroeste	-
H + Al	Muito Alta	Alguns pontos da região central norte, central leste e central oeste	-
	Alta	Grande parte da área	Toda a area
	Média	Alguns pontos espalhados pela área	-

	Muito Alta	Alguns pontos da região norte, sul e sudoeste	-
	Alta	Pontos na região norte, sudoeste, sudeste e parte do nordeste	-
(m)	Baixo	Pontos na borda oeste, na borda sudoeste, além de pontos na parte leste e nordeste	Toda a area
	Muito Baixo	Pontos na borda oeste, na borda sudoeste, além de pontos na parte leste e nordeste	-
T	Bom	Grande parte da área	-
	Médio	Grande parte da área	Toda a area
(t)	Médio	Maior parte da área	Toda a area
	Baixo	Menor parcela da área	-
	Bom	Região central e leste	-
SB	Médio	Extremo norte da área, na borda leste e na borda noroeste	Toda a area
	Baixo	Machas nas regiões sudoeste, sudeste e noroeste	-
	Muito Baixo	Machas nas regiões sudoeste, sudeste e noroeste	-
	Bom	Região central e a borda oeste	-
V	Baixo	Grande parte da área	Toda a area
	Muito Baixo	Região norte, noroeste, sudeste e sul	-
	Bom	Parte oeste e alguns pontos da região nordeste	-
MO	Médio	Maior parte da área	Toda a area
	Baixo	Região próxima a borda sudeste e pontos na região leste	-

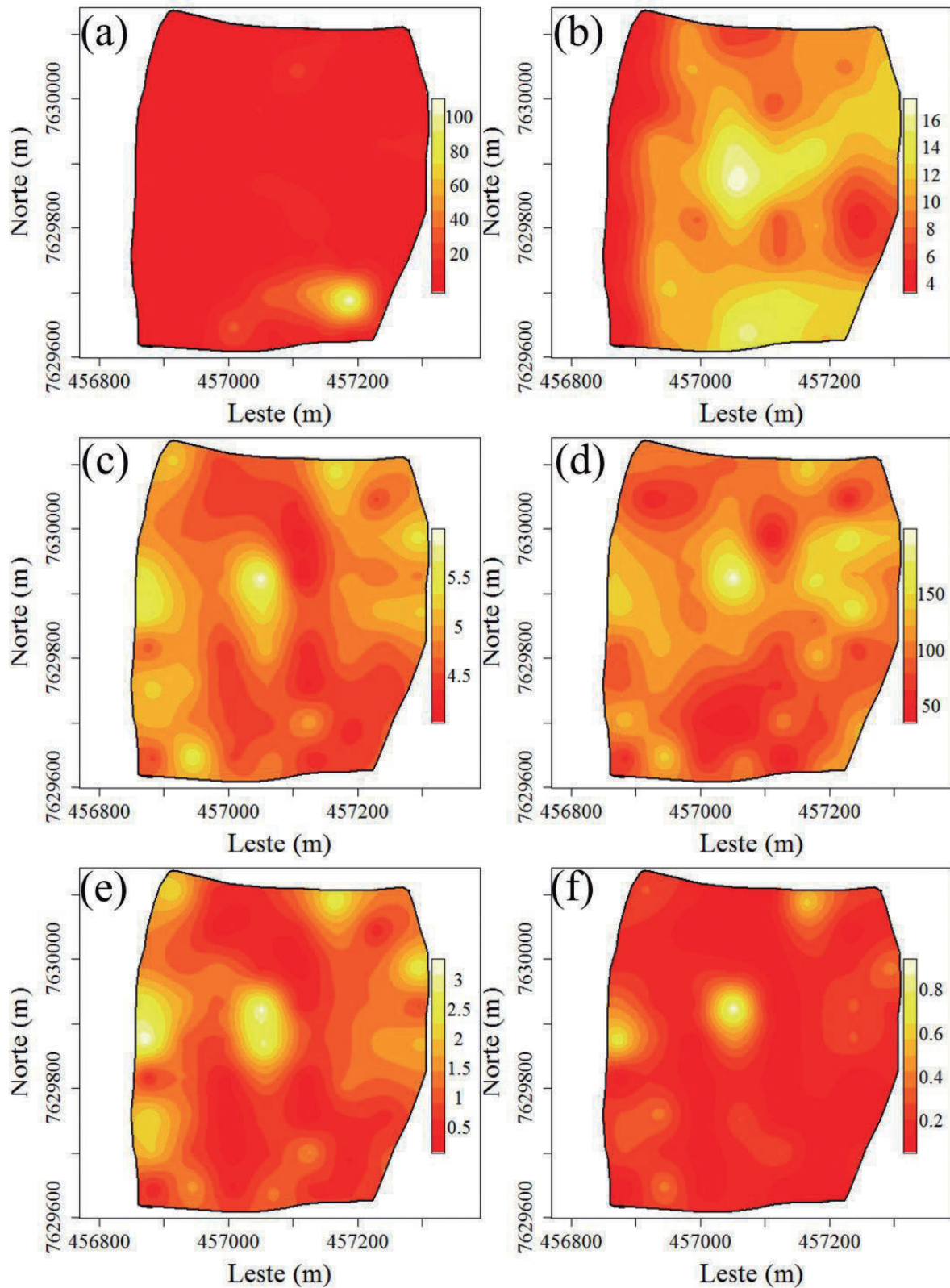


FIGURA 3 - Distribuição espacial do P (mg/dm³) (a), Prem (mg/L) (b), pH (c), K (mg/dm³) (d), Ca (cmol_c/dm³) (e) e Mg (cmol_c/dm³) (f)

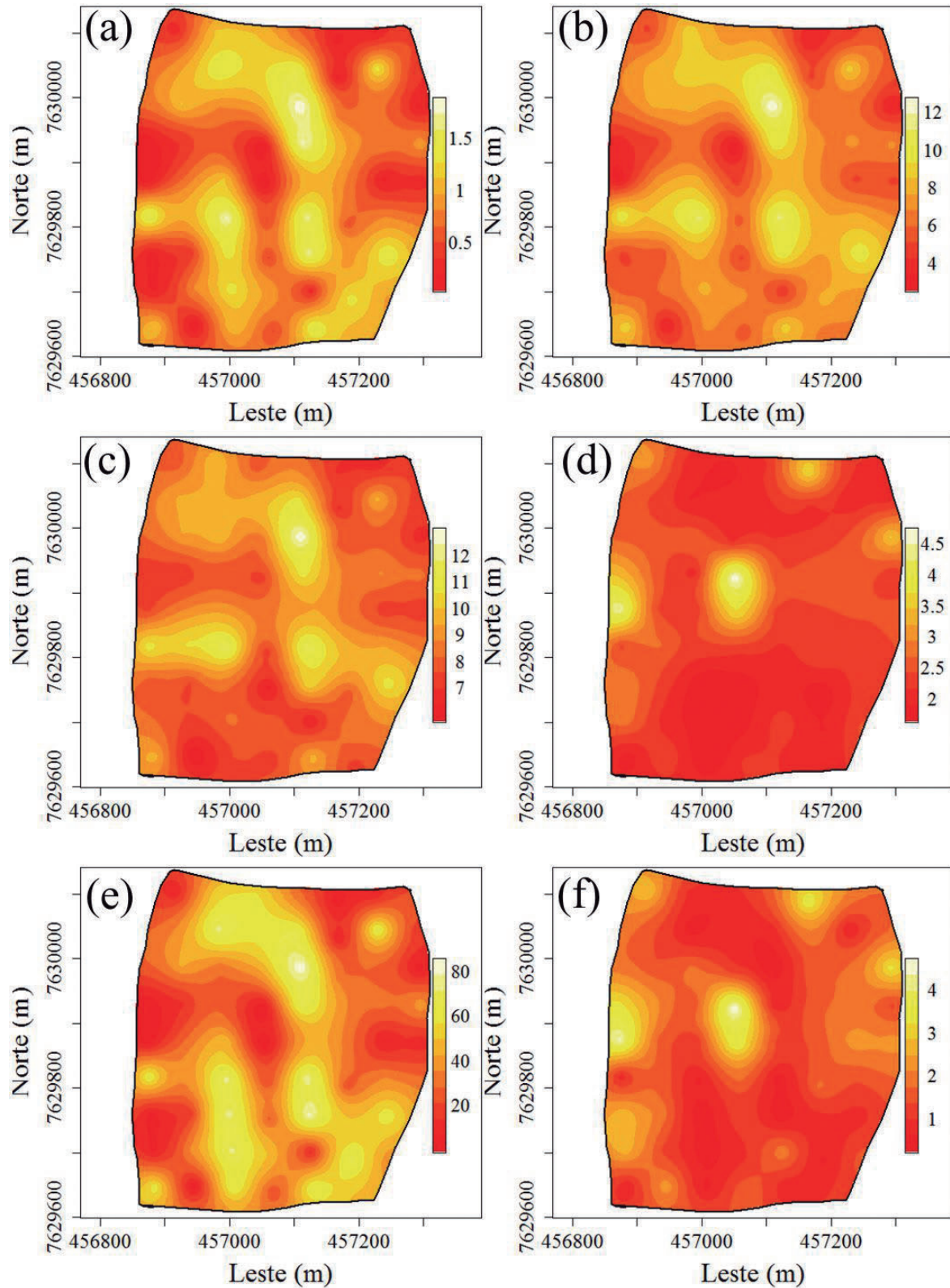


FIGURA 4 - Distribuição espacial do Al (cmol/dm^3) (a), H + Al (cmol/dm^3) (b), T (cmol/dm^3) (c), t (cmol/dm^3) (d), m (%) (e) e SB (cmol/dm^3) (f).

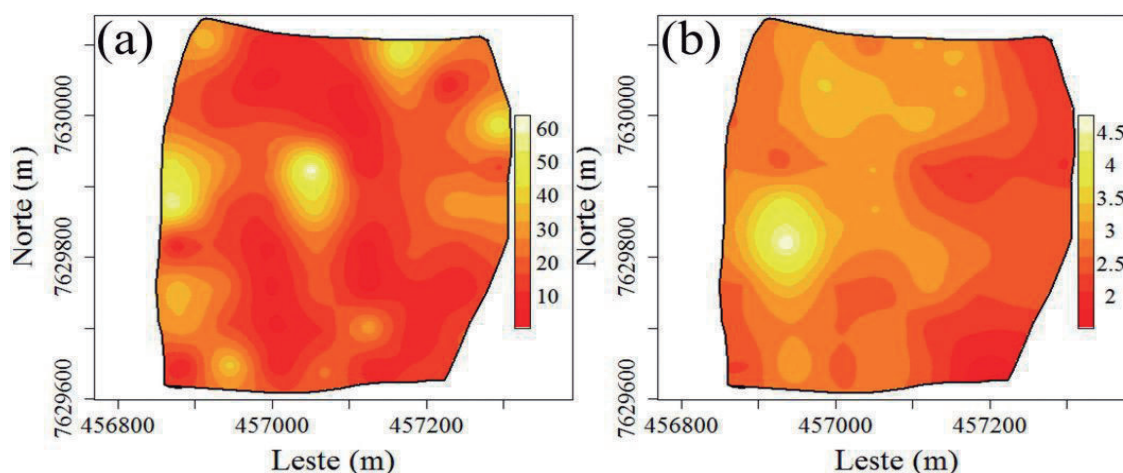


FIGURA 5 - Distribuição espacial do V (%) (a) e MO (dag/Kg) (b).

Segundo Matiello et al. (2010) os solos utilizados para cultivo de cafeeiros, normalmente, são pobres em fósforo, citando ainda que este nutriente tem grande tendência a fixação. Sendo assim, refletindo nas condições encontradas neste estudo.

O Prem é um fator utilizado pelas tabelas propostas por Alvarez et al. (1999) para realizar a recomendação para a adubação fosfatada. Ela não apresenta uma classificação de disponibilidade, apenas é repartida em classes numéricas. A amostragem convencional (Tabelas 2 e 4) indica Prem classificado de 10 a 19, enquanto que na amostragem em malha (Figura 3b e Tabela 4) foram observados também Prem de 0 a 4, e de 4 a 10 na maior parte da área.

O pH de um solo é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma cultura. Ao se comparar a amostragem convencional com a amostragem em malha, pode-se perceber que na amostragem em malhas (Figura 3c e Tabela 4) existiria pontos em que o teor de pH seria classificado como bom e pontos com pH muito baixo, que não foram observados na amostragem convencional. Porém o teor baixo de pH foi identificado em grande parte da área, na amostragem em malha, e em toda a área, amostragem convencional (Tabela 2 e 4).

De acordo com Valente (2010) o cafeeiro apresenta uma alta exigência de Potássio (K). Neste trabalho, observou-se que o K na amostragem convencional teve sua disponibilidade classificada como bom e muito bom (Tabela 4). Para a amostragem em malha observou-se, ainda, uma disponibilidade de K médio (Figura 3d e Tabela 4).

Osteores de Al^{3+} , de Ca^{2+} e Mg^{2+} são variáveis utilizadas na fórmula proposta por Alvarez et al. (1999) para se calcular a necessidade de calagem. Segundo Corrêa et al. (2001) o cafeeiro, *C. arabica*., é muito exigente em bases, sendo o Ca^{2+} e Mg^{2+} normalmente fornecidos por corretivos da acidez. A amostragem convencional indicou que o teor de Cálcio Trocável (Ca^{2+}) estaria classificado como médio (Tabela 4), que também foi observado em grande parte da Figura 3e. Porém a amostragem em malha ainda indicou teores de Ca^{2+} bom, baixo e muito baixo. Para o Magnésio trocável (Mg^{2+}), a amostragem convencional indicou teor baixo (Tabelas 2 e 4) para toda a área, que foi observado na amostragem em malha (Figura 3f e Tabela 4) na maior parte do mapa. Porém esta amostragem indicou ainda teor médio e muito baixo.

Segundo Furtini Neto et al. (1999), dentre as principais causas do pouco crescimento das plantas em solos ácidos está a toxidez causada pelo alumínio. A amostragem convencional (Tabelas 2 e 4) indicou teores médio e baixo para a acidez trocável (Al^{3+}). Porém, além destes teores, na amostragem em malha (Figura 4a e Tabela 4) pode-se observar que também existia teor alto e muito baixo na área.

A acidez potencial é constituída pelos íons H^+ e Al^{3+} presente nos coloides do solo. Este é uma das variáveis que compõem a CTC a pH 7,0. Foi identificada acidez potencial alta para toda a área pela amostragem convencional (Tabelas 2 e 4). Este teor foi observado em grande parte da área na amostragem em malha (Figura 4b e Tabela 4). Porém esta amostragem indicou ainda teor muito alto e médio.

A CTC potencial (T) é o valor da capacidade de troca de cátions de um solo, caso a calagem deste solo fosse feita para elevar o pH a 7,0 (FURTINI NETO et al., 1999). A amostragem em malha (Figura 4c e Tabela 4) indicou teores de T divididos entre bom e médio, enquanto que na amostragem convencional o teor observado foi apenas o médio (Tabelas 2 e 4).

A CTC efetiva (t) reflete a capacidade de troca de cátions efetiva do solo, ou seja, a capacidade do solo em reter cátions em seu pH natural. Na amostragem em malha (Figura 4d e Tabela 4) foram observados teores médios de t, em grande parte da área, e teores baixo no restante da área. A amostragem convencional indicou apenas o teor médio (Tabela 2 e 4).

A fração da CTC efetiva que é ocupada por alumínio trocável é chamada de porcentagem de saturação de alumínio (m). A amostragem convencional indicou que o m seria classificado como baixo (Tabelas 2 e 4). Porém na amostragem em malha, além desta classificação, foram observadas, também, as classificações muito alta, alta e muito baixa (Figura 4e e Tabela 4).

A Soma de Bases (SB) reflete a soma de cálcio, magnésio e potássio trocáveis. Na amostragem em malha (Figura 4f e Tabela 4) foram observados SB classificado com Bom, médio, baixo e muito baixo, enquanto que na amostragem convencional foi observado apenas SB médio (Tabelas 2 e 4).

A porcentagem de saturação de bases da CTC a pH 7,0 (V) reflete quantos por cento da CTC a pH 7,0 estão ocupados pelas bases existentes no solo. De acordo com Matiello et al. (2010), a fertilidade do solo é expressa pelo V (%). Na amostragem em malha (Figura 5a e Tabela 4) foram observados V bom, médio e baixo. Já na amostragem convencional foi observado apenas V médio (Tabelas 2 e 4).

Furtini Neto et al. (1999) citam que a Matéria Orgânica (MO) pode ser considerada como sinônimo de fertilidade do solo, pois, sua presença no solo afeta sobremaneira os atributos químicos, físicos e biológicos do mesmo e, entre vários benefícios, aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas. A amostragem convencional indicou teor de MO médio para toda a área (Tabelas 2 e 4), enquanto que na amostragem em malha (Figura 5b e Tabela 4) foram observados, além do teor médio, teores baixo e bom.

A amostragem em malha, preconizada pela cafeicultura de precisão, como era de se esperar, identifica melhor as variações existentes no solo da área, em relação à amostragem convencional,

baseada na média. A amostragem em malha apresentou pontos onde nem sempre necessitaria de uma correção via insumos (adubos e corretivos), e locais onde seriam necessárias dosagens maiores de fertilizantes e corretivos, evidenciando-se, desta maneira, as limitações de se usar o valor médio para recomendação de intervenções no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2008) ao estudar estas duas formas de amostragens para a cafeicultura. Portanto, a utilização de mapas, tais quais apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, contribuem para o manejo diferenciado da lavoura, pois permitem prescrever de forma mais precisa a dosagem de fertilizantes e corretivos, que resultará em operações de aplicação destes produtos de forma mais eficiente.

4 CONCLUSÕES

Foi possível caracterizar a magnitude e a estrutura de dependência espacial das variáveis do solo em lavoura cafeeira por meio de ajuste de semivariograma.

Por meio da análise dos mapas de isolinhas da distribuição espacial das variáveis do solo da lavoura cafeeira em estudo, obtidos por krigagem, foi possível visualizar a variabilidade da distribuição espacial dos atributos do solo.

Foi possível identificar as diferenças existentes entre os teores de cada atributo do solo amostrado de forma convencional ou em malha para a cafeicultura de precisão, uma vez que a amostragem em malhas apontou classes de interpretação para os atributos do solo que não foram identificadas pela amostragem convencional.

Os resultados dos teores dos atributos do solo apresentados pelos dois sistemas de amostragem avaliados demonstram que é possível incorrer erros ao se aplicar fertilizantes ou corretivos com base nos teores médios dos atributos (amostragem convencional) em determinada gleba da lavoura.

5 REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 12, p. 18-31, 2011.

- BACHMAIER, M.; BACKERS, M. Variogram or semivariogram?: variance or semivariance?: Allan variance or introducing a new term. **Mathematical Geosciences**, Berlin, v. 43, n. 6, p. 735-740, 2011.
- BASSO, B. et al. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 35, p. 215-222, 2011.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CORRÊA, J. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiros do sul de minas gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1279-1286, nov./dez. 2001.
- DONG, X.; VURAN, M. C.; IRMAK, S. **Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor network with center pivot irrigation systems**. Disponível em: <http://watercenter.unl.edu/ResearchDB/publications/Wireless_Sensor_Center_Pivot_Integration.pdf>. Acesso em: 10 out. 2012.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012a.
- _____. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, Jan. 2012b.
- _____. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012c.
- _____. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 906-915, set./out. 2011.
- FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.
- MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2010. 544 p.
- MOLIN, J. P. et al. Teste procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.
- MORALES, L. A.; VÁZQUEZ, E. V.; PAZ-FERREIRO, J. Spatial and temporal variability of Mehlich-1 extractable Fe, Mn and Zn over a rice field as a function of lime amendment. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Berlin, v. 25, p. 1039-1048, 2011.
- OLIVEIRA, R. B. et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, jan./mar. 2008.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 ago. 2011.
- RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.
- SÁ JÚNIOR, A. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Berlin, v. 108, p. 1-7, 2012.
- SILVA, A. F. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes manejos. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 173-182, maio/ago. 2010.
- SILVA, F. M. et al. Efeitos da colheita manual na bionalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.
- VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um Sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 103 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.
- YUAN, J. et al. Gaussian process based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 33-41, Jan. 2010.