

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DE UM SOLO CULTIVADO COM CACAUEIRO¹**

Perla Silva Matos de Carvalho², Samuel de Assis Silva³, Arlicélio Queiroz Paiva⁴, George Andrade Sodré⁵ & Julião Soares de Souza Lima⁶

1 - Parte da Dissertação de Mestrado do Primeiro Autor apresentado ao PPGPV/UESC

2 - Engenheira Agrônoma, Mestra em Produção Vegetal, UESC/Ilhéus, BA, perla.eng.agro@hotmail.com

3 - Engenheira Agrônoma, Professor Adjunto, UFES/Alegre, ES, sasilva@pq.cnpq.br

4 - Engenheiro Agrônomo, Professor Adjunto, UESC/Ilhéus, BA, arli@uesc.br

5 - Engenheiro Agrônomo, Pesquisador CEPEC/CEPLAC/Ilhéus, BA, sodre@cepec.gov.br

6 - Engenheiro Agrícola, Professor Titular, UFES/Alegre, ES, limajss@yahoo.com.br

Palavras-chave:

Theobroma cacao
agricultura de precisão
geoestatística
mapeamento

RESUMO

O conhecimento da variabilidade de atributos químicos do solo através de técnicas de agricultura de precisão permite um manejo específico das áreas de cultivo e a aplicação de insumos de forma eficiente. Com este trabalho, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos de um solo sob cultivo de cacaueteiro. O estudo foi realizado em uma área de aproximadamente 1,5 ha cultivada com cacaueteiro, em um grid de 120 pontos. As amostras de solo foram retiradas na camada de 0 - 20 cm, para determinar os atributos pH em água, H+Al, P, K⁺, relação Ca²⁺/Mg²⁺, SB, V%, TOC, CTC efetiva e CTC. Os dados foram submetidos à uma análise exploratória e descritiva, e, posteriormente, à uma análise geoestatística para quantificar a dependência espacial. Em seguida, procedeu-se a interpolação dos dados através da krigagem ordinária. O sistema de cultivo do tipo agroflorestal, devido ao aporte de matéria orgânica, influenciou os teores de TOC, CTC efetiva e CTC. A presença de argila de baixa atividade em Nitossolos favoreceu ocorrência de níveis altos de P em solução, entretanto, uma pequena proporção da área necessita de correção. Os mapas apresentam regiões específicas com níveis variáveis de nutrientes, os quais podem ser utilizados como referenciais para aplicações de fertilizantes em taxas variadas.

Keywords

Theobroma cacao
precision agriculture
geostatistical
mapping

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL FERTILITY IN COCOA CROP**ABSTRACT**

The knowledge of the spatial variability of soil chemical attributes through precision agriculture techniques allows the specific management of cultivated areas and an efficient application of inputs. This work aimed to evaluate the spatial variability of chemical attributes of a soil under cocoa cultivation. The study was carried out in an area cultivated with cocoa tree, in a grid of 120 points. The soil samples were collected in the 0-20 cm layer to determine the soil attributes: pH in water, H+Al, P, K⁺, Ca²⁺/Mg²⁺, SB, V%, TOC, CTC (effective and potential). The data were submitted to an exploratory and descriptive analysis, and later to a geostatistical analysis to quantify the spatial dependence. Subsequently, the data were interpolated using ordinary kriging. The cropping system of the agroforestry type, due to the contribution of organic matter, influenced the TOC, effective CTC and CTC levels. The presence of low activity clay in Nitossols favored the occurrence of high levels of P in solution; however, a small proportion of the area needs correction. The maps present specific regions with varying levels of nutrients, which can be used as reference for fertilizer applications at varying rates.

INTRODUÇÃO

A cacauicultura do sul da Bahia vem atravessando uma grave crise de produção, com redução, nos últimos anos, de mais de 60 % da produção de amêndoas secas (Sodré et al., 2007). A adoção de novas tecnologias de manejo e o uso de variedades seminais e clonais de produtividade elevada e tolerantes à doença vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa*) têm sido adotados como estratégias para minimizar a situação (ARÉVALO et al., 2007).

A rentabilidade da cacauicultura depende de um sistema de produção sustentável e alicerçado no uso eficiente de corretivos e fertilizantes, de modo a elevar a produtividade da cultura (CHEPOTE et al., 2013). Porém, no sul da Bahia, o cacau é geralmente cultivado em solos ácidos, rico em matéria orgânica, pobres em cálcio, magnésio, potássio e fósforo (CHEPOTE et al., 2012). Com isso, o uso da agricultura de precisão no estudo da variabilidade espacial de fatores que norteiam a produção de cacau auxiliará no manejo da cultura, uma vez que nenhum trabalho foi desenvolvido nessa temática.

A recomendação de insumos agrícolas para o cacaueteiro varia conforme as características físico-químicas do solo e o manejo adotado (CHEPOTE et al., 2012), sugerindo que o cultivo do cacaueteiro é realizado em solos com elevada variabilidade, a qual influencia diretamente a produtividade da cultura. Nesse contexto, a inclusão de técnicas de agricultura de precisão é necessária na avaliação espacial e temporal da variabilidade do solo e para auxiliar na recomendação de fertilizantes e corretivos, favorecendo o manejo específico e independente das áreas de cultivos (VALENTE et al., 2012).

A análise geoestatística é uma ferramenta utilizada na agricultura de precisão para o estudo da variabilidade dos atributos de solo, pois ela considera que as amostras que se apresentam próximas no tempo e espaço são mais semelhantes entre si por carregarem informações de suas vizinhanças, quando comparada às amostras que se encontram mais distantes (SANTOS et al., 2017). A geoestatística comprova que existe dependência entre as variáveis e que estas necessitam ser

consideradas nas avaliações, para tanto deve-se realizar uma amostragem detalhada para identificar a variabilidade existente (MANZIONE et al., 2011).

O método da krigagem é aplicado aos dados após a confirmação de dependência espacial para estimar valores em pontos não amostrados dentro da área de estudo (OLIVEIRA et al., 2008). Com isso, a variabilidade espacial de uma variável pode ser modelada através da interpolação de dados, e mapas temáticos podem ser criados para interpretação da variabilidade espacial (VIEIRA, 1997).

Diante do exposto, com este trabalho, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos de um solo cultivado com cacau, através de métodos geoestatísticos.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma área de aproximadamente 1,5 ha pertencente ao Centro de Pesquisas do Cacau - CEPEC, órgão vinculado à Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira – CEPLAC do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. A área está localizada no km 22 da rodovia Jorge Amado, na região Sul do Estado da Bahia, no município de Ilhéus, sob a latitude de 14° 47' S e a longitude de 39° 16' W.

O clima da região de estudo, de acordo com a classificação de Köppen & Geiger (1928), é do tipo Af, tropical-úmido, com precipitação anual média de 1.830 mm, umidade relativa do ar em torno de 80 % com temperatura média anual entre 21,5 e 25,5 °C. A área experimental é cultivada com 31 progênies de cacaueteiro, plantadas no espaçamento de 3,0 x 1,5 m.

Para levantamento de dados, foi construída uma malha amostral regular composta por 120 pontos, sendo adotado o sistema de coordenadas locais, com espaçamento mínimo entre pontos de 6,6 m. O solo foi classificado, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, como Nitossolo Háplico Eutrófico (EMBRAPA-SNLCS, 2013), tendo, dentre outras características, um pH moderadamente ácido, V % \geq 50 e argila de baixa atividade.

A área experimental vem sendo cultivada

desde 2003 com progênies de cacau em sistema agroflorestal, usando eritrina como plantas de sub-bosque no espaçamento de 24 x 24 m. O sombreamento da área é regular, com exceção das regiões noroeste e central, onde há maior incidência de raios solares devido às quedas de algumas árvores.

As amostragens para determinação dos atributos químicos do solo foram realizadas em todos os pontos, sendo a coleta de solo realizada sob a projeção da copa das plantas de cacau. Com o auxílio de um trado tipo holandês, foram coletados 04 sub-amostras de solo, sendo 01 amostra por quadrante ao redor das plantas, na camada 0 – 20 cm, para formar a amostra composta representativa de cada ponto amostral.

A análise dos atributos químicos do solo foi realizada no Laboratório de Química do Solo, no CEPEC/CEPLAC. Os parâmetros avaliados foram: acidez ativa (pH em água), acidez potencial (H+Al), fósforo (P), potássio (K⁺), relação cálcio/magnésio (Ca²⁺/Mg²⁺), soma de bases (SB), carbono orgânico total (TOC), capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC), capacidade efetiva de troca de cátions (CTC efetiva) e índice de saturação por bases (V %), seguindo metodologia apresentada pela Embrapa (2011).

Os valores encontrados na análise de atributos químicos foram submetidos a uma análise exploratória para verificar a presença de valores discrepantes (*outliers*). A análise de *outliers* foi realizada considerando-se os quartis superiores e inferiores, definidos pelo box-plot, e observando-se sua influência nas medidas de posição e de dispersão, conforme Lima *et al.* (2016).

Em seguida, os dados foram analisados por meio das medidas de posição (média - M e mediana - Md), dispersão (valores máximos – Max, mínimos – Min, desvio padrão - s e coeficiente de variação - CV) e forma da dispersão (coeficientes de assimetria - Cs e curtose - Ck). A normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk's (p < 0,05) e as análises estatísticas descritivas foram realizadas utilizando-se o pacote Statistica.

A geoestatística foi utilizada para avaliar e quantificar o grau de dependência espacial dos dados. A análise foi realizada a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais, com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, conforme a equação 1:

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

em que,

$N(h)$ =número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h .

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, foram testados os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear. A avaliação comparativa entre atributos com unidades de medidas diferenciadas foi realizada após o escalonamento do efeito pepita e do patamar, pela variância dos dados, conforme descrito por Vieira (1997) e utilizado por Silva *et al.* (2013).

O critério de adoção do modelo ajustado foi baseado no maior valor de R² (coeficiente de determinação), na menor SQR (Soma de Quadrado dos Resíduos) e o maior valor do coeficiente de correlação R² obtido pelo método de validação cruzada, pois este permite a comparação de resultados entre diferentes modelos de variogramas (SILVA & LIMA, 2012). A relação $C_0/(C_0+C)$ foi utilizada na identificação do Índice de Dependência Espacial, sendo este classificado, conforme Cambardella *et al.* (1994), como: fraca (IDE > 75 %), moderada (25 % ≥ IDE ≤ 75 %) e forte (IDE < 25 %).

Comprovada a dependência espacial, utilizou-se o método de interpolação por krigagem ordinária, para estimar valores em locais não medidos. A krigagem é um método de interpolação baseado na teoria das variáveis regionalizadas que estima valores sem tendência e com variância mínima. Assim, a variação espacial de uma variável aleatória pode ser modelada por uma função aleatória intrínseca (GREGO & VIEIRA, 2005), equação 2:

$$x^*(i_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i \quad (2)$$

em que,

N =número de pontos medidos da variável X envolvidos nas estimativas de $x^*(i_0)$, e;
 λ_i –pesos associados a cada valor medido x_i .

As análises geoestatísticas foram realizadas no software GS+ e os mapas interpolados confeccionados no software Surfer. Os mapas foram interpolados com uma resolução de pixel de 0,5 x 0,5 m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao realizar a análise exploratória foram observados valores discrepantes (*outliers*) para todos os atributos, exceto para o pH. Após a retirada destes valores, a análise estatística descritiva foi realizada no conjunto de dados (Tabela 1).

Os valores de média e mediana para os atributos químicos analisados foram similares, demonstrando que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição, conforme Cambardella et al. (1994). Esse resultado poderia ser um indicativo de ajuste à distribuição normal, entretanto, analisando os valores dos coeficientes de curtose (Ck), observa-se comportamento leptocúrtico e maior concentração dos dados em torno de um valor central, apesar da variação expressa pela amplitude de distribuição. Tal fato se confirma através do teste de normalidade, o qual indica que os atributos apresentam distribuição normal, exceto P e K⁺.

O fósforo foi o único atributo que apresentou

um valor de assimetria alto e um afastamento da distribuição normal assim como o K⁺, conforme teste de Shapiro-Wilk. Apesar de não ser uma exigência, atributos que apresentam distribuição normal, quando submetidos à interpolação de dados por krigagem, serão estimados com maior eficiência (WEBSTER & OLIVER, 2007). De acordo com Cressie (1993), é ideal que a calda da distribuição não seja muito alongada, fato que não foi evidenciado neste trabalho dado os valores de assimetria próximos de zero. Em relação ao coeficiente de variação, observa-se que, conforme classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), os atributos pH, CTC e V apresentaram baixa variabilidade (CV % < 12), e H+Al, P, K⁺, Ca²⁺/Mg²⁺, SB, TOC e CTC efetiva apresentaram média variabilidade (CV % ≥ 12 e ≤ 60).

Na análise geoestatística, todos os atributos analisados apresentaram variogramas com patamares bem definidos (Figura 1), o que indica que a hipótese de estacionaridade intrínseca foi atendida e que os dados não apresentam tendência de distribuição (Tabela 2). Isaaks e Srivastava (1989) afirmam que, quando o patamar dos variogramas são bem definidos, a distribuição dos dados é simétrica e a estimativa dos seus parâmetros são corretas, não havendo heterocedasticidade e, conseqüentemente, efeito proporcional.

Tabela 1. Estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos químicos do solo

Atributo	M	Md	s	CV (%)	Max.	Min.	Cs	Ck	w
pH (H ₂ O)	5,97	6,00	0,31	5	6,70	5,10	-0,06	-0,17	ns
H+Al	4,38	4,4	1,03	23	7,0	2,1	-0,13	-0,23	ns
P	22,56	21	11,76	52	52	5,0	0,81	-0,10	*
K ⁺	0,08	0,08	0,016	20	0,11	0,05	0,10	-0,73	*
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	1,66	1,66	0,34	20	2,53	0,09	0,19	-0,29	ns
SB	16,84	17,19	2,57	15	23,38	11,23	0,09	-0,25	ns
TOC	16,99	17,04	4,67	27	28,08	6,36	0,07	-0,40	ns
CTC	21,45	21,47	2,42	11	27,98	16,88	0,45	-0,01	ns
CTC efetiva	16,85	17,19	2,57	15	23,38	11,43	0,10	-0,26	ns
V (%)	79,54	80,01	5,53	6	90,58	65,92	-0,22	-0,12	ns

M – média; Md – mediana; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Max. – valores máximos; Min. valores mínimos; Cs – coeficiente de assimetria; Ck – coeficiente de curtose; w* - distribuição não normal pelo teste Shapiro Wilk a 5 % de probabilidade; w^{ns} - distribuição normal pelo teste Shapiro Wilk a 5 % de probabilidade; Ca²⁺/Mg²⁺, K⁺, H+Al, SB, CTC, CTC efetiva - cmol_c dm⁻³; P - mg dm⁻³; TOC - g dm⁻³.

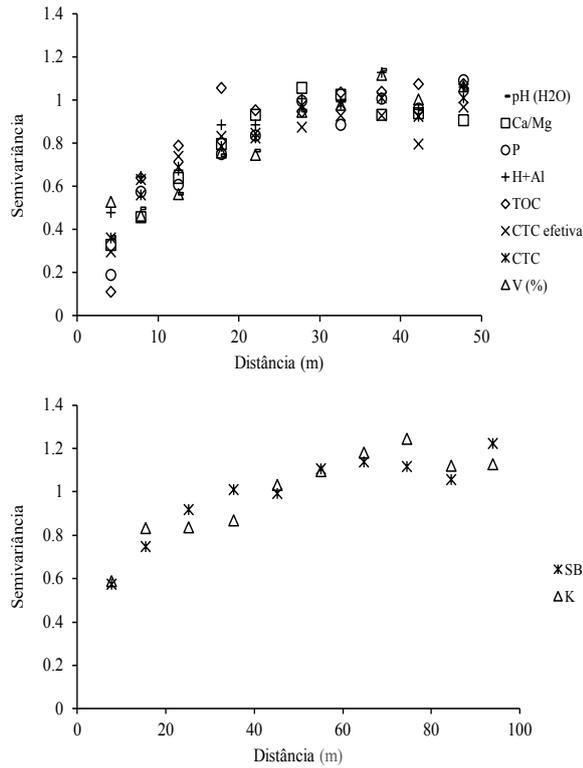


Figura 1. Variogramas experimentais escalonados para os atributos químicos do solo.

Alencar et al. (2016), estudando o comportamento espacial de atributos químicos do solo em área de produção de forragens, também ajustaram aos dados experimentais variogramas com patamares bem definidos. De acordo com esses autores, a presença de dependência espacial

para atributos de solo pode determinar significativa variação na massa de forragem e determinar locais de pastejo preferidos pelos animais.

Na análise geoestatística, observa-se que os modelos teóricos que melhor se ajustaram aos variogramas experimentais foram o esférico, seguido do exponencial e do gaussiano. Os modelos esférico e exponencial são os de maior ocorrência no ajuste a dados de solo (LIMA et al., 2013; DALCHIAVON et al., 2012).

O Índice de Dependência Espacial dos atributos apresentou valores considerados fortes para H+Al, P, relação Ca^{2+}/Mg^{2+} , TOC, SB e CTC efetiva, e valores moderados para os atributos pH, K^+ , CTC e V, conforme classificação proposta por Cambardella (1994). O IDE quantifica a dependência espacial do fenômeno em relação à variância total, definindo a razão de aleatoriedade dos dados (DALCHIAVON et al., 2012). Valores elevados de IDE indicam que os variogramas ajustados ilustram a maior parte da variância existente nos dados (LIMA et al., 2013).

Os valores do efeito pepita indicam que os atributos H+Al, P, relação Ca^{2+}/Mg^{2+} , TOC, SB e CTC efetiva apresentaram uma menor descontinuidade na origem, refletindo em uma dependência espacial forte. No caso do pH, K^+ , CTC e V, estes apresentaram uma maior descontinuidade na origem, que refletiu em uma dependência espacial moderada. O efeito pepita informa a descontinuidade espacial entre valores,

Tabela 2. Modelos e parâmetros dos variogramas ajustados para os atributos de solo

Atributo	Modelo	C_0	$C_0 + C$	a (m)	IDE (%)	R^2	R^2 (VC)
pH (H ₂ O)	Gau	0,44	1,07	38,28	41,40	0,97	0,47
H ⁺ +Al ³⁺	Exp	0,27	1,12	49,80	24,40	0,95	0,26
P	Exp	0,17	1,09	49,50	15,70	0,99	0,53
K^+	Esf	0,56	1,20	85,40	47,00	0,96	0,27
Ca^{+2} / Mg^{+2}	Exp	0,14	1,10	48,00	13,20	0,83	0,58
SB	Exp	0,27	1,13	57,30	23,70	0,97	0,34
TOC	Gau	0,01	1,01	16,63	1,30	0,95	0,26
CTC	Esf	0,43	0,91	27,68	47,30	0,96	0,29
CTC efetiva	Exp	0,01	1,01	33,90	1,30	0,99	0,31
V (%)	Gau	0,42	1,10	41,05	38,30	0,99	0,45

C_0 - efeito pepita escalonado; $C_0 + C$ - patamar escalonado; a - alcance; IDE - Índice de Dependência Espacial; R^2 - coeficiente de determinação; VC - Validação Cruzada; Gau - Gaussiano; Esf. - Esférico; Exp - Exponencial.

separados por uma distância menor do que a menor distância adotada na amostragem, além de uma variância não explicada, mas podendo ser atribuída a erros de amostragem ou variações não detectadas na escala de amostragem (VIEIRA, 1997). Quanto menor a proporção entre efeito pepita e patamar, maior será a continuidade espacial, maior a variância na estimativa e maior a confiabilidade de valores estimados por meio da krigagem (GREGO & VIEIRA, 2005).

O maior valor de alcance foi observado para o atributo K^+ com 85 m e o menor para o TOC com 16 m. O alto valor de alcance do K^+ confirma que, dentro deste intervalo, o atributo apresenta baixa variabilidade espacial, pois sua área de influência será maior, sugerindo uma maior semelhança entre os pontos vizinhos, ou seja, alta continuidade. Dalchiavon et al. (2017), estudando o comportamento espacial de atributos químicos do solo em área de plantio direto, encontraram alcance mediano para o K^+ e efeito pepita puro para o TOC.

Segundo Grego & Vieira (2005), o alcance representa o limite da dependência espacial entre amostras e, a partir deste valor, elas se comportam de forma aleatória, sendo este um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento.

Conforme Issaks & Srivastava et al (1989), um atributo distante de seus vizinhos em um raio igual ao alcance, garante que eles sejam tão semelhantes a ponto de serem utilizados para estimar valores por meio da krigagem. Definido os parâmetros dos variogramas, os dados foram interpolados para confecção dos mapas e posterior interpretação da distribuição dos atributos no espaço, sendo estes apresentados nas Figuras 2, 3 e 4.

A maior proporção da área em estudo apresentou valores dentro do intervalo de 5,5 a 6,0 para o atributo pH, seguida de uma grande faixa na região direita e pequenas regiões nas extremidades da área com valores acima de 6,0 (Figura 2). Em sistema de plantio direto, Lima et al. (2013) encontraram valores para pH entre 4,4 a 4,8 na camada 0 – 0,15 cm, atribuindo esse resultado à ausência de calagem e a liberação de ácidos orgânicos da matéria orgânica. Na cultura do cacau em sistema agroflorestal, ocorre igualmente a liberação de ácidos orgânicos, entretanto, Chepote et al. (2012)

afirmam que os valores desejados de pH para cacaueiros encontram-se entre 5,5 a 6,5. Segundo estes autores, devido ao cultivo ser realizado em sistema agroflorestal, a cultura de cacau tende a ser semelhante a sistemas naturais.

Observa-se que os níveis de H+Al encontram-se com valores no intervalo de 2,6 a 3,8 $cmol_c\ dm^{-3}$ nas extremidades da área. Níveis com valores cujo intervalo é de 3,8 a 5,0 $cmol_c\ dm^{-3}$ são observados em uma grande proporção da área, seguida de regiões isoladas com níveis acima de 5 $cmol_c\ dm^{-3}$ (Figura 2). O padrão de distribuição deste atributo mostra que em locais onde o pH encontra-se abaixo de 6,0 ocorrem regiões com níveis altos de H+Al. Tal fato já era esperado, visto a relação direta entre pH e H+Al, onde quanto menor o pH maior H+Al, sendo o inverso verdadeiro.

Cardoso et al. (2014), trabalhando em solo cultivado com cana de açúcar, encontraram o valor médio de acidez potencial igual a 2,72 $cmol_c\ dm^{-3}$. De acordo com esses autores, os níveis de H+Al são influenciados tanto pela calagem quanto pelo teor de matéria orgânica do solo. Tal observação demonstra que, para este estudo, a ocorrência de níveis mais elevados de H+Al no solo tem maior relação com teores de matéria orgânica, visto que a prática da calagem não vem sendo realizada, nos últimos anos, na área em estudo. Esse fato reforça a importância da matéria orgânica no complexo de troca de cátions do solo e na redução da acidez potencial, principalmente em áreas sob sistemas agroflorestais (cacau cabruca) e com ausência de práticas periódicas de manejo.

Teores de TOC com valores no intervalo de 6 a 10 $g\ dm^{-3}$ foram observados em regiões isoladas. Uma grande dimensão da área encontra-se com teores dentro do intervalo de 10 a 20 $g\ dm^{-3}$, seguida de uma faixa na região direita com teores acima de 20 $g\ dm^{-3}$ (Figura 2). Considerando que o TOC terá seu teor influenciado pelo aporte de matéria orgânica (MO) e pelo processo de mineralização, e que o sistema de cultivo agroflorestal favorece a ocorrência de teores variáveis de TOC, os resultados encontrados sugerem que as falhas no sombreamento da cultura tornaram o processo de mineralização da matéria orgânica do solo mais intensificada em determinados locais da área em estudo (LOSS et al. 2009).

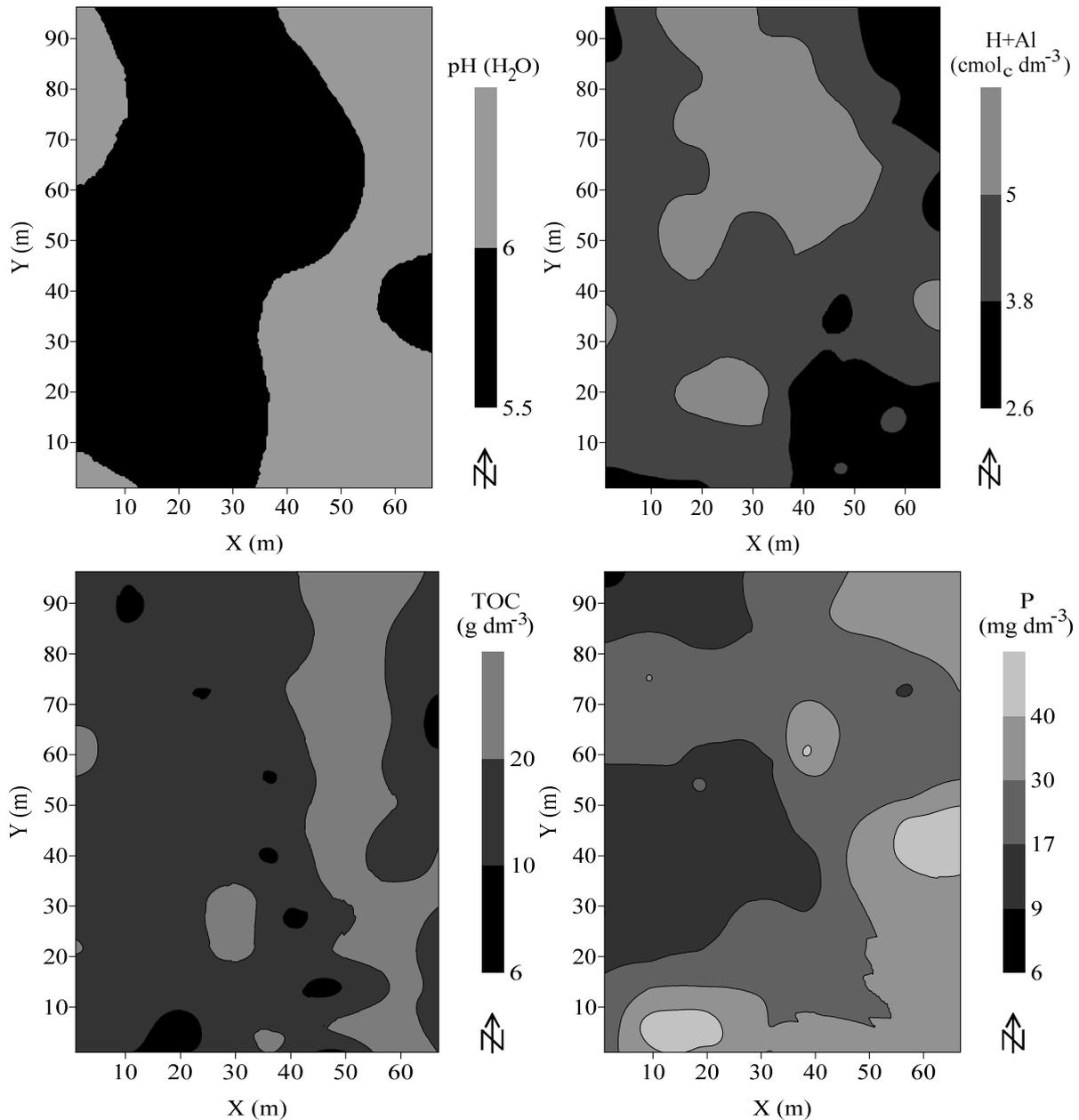


Figura 2. Mapas da distribuição dos atributos pH, H+Al, TOC e P na camada 0 – 20 cm.

Conforme Chepote et al. (2012), os teores de TOC com valores entre 6 a 10 g dm⁻³ foram considerados baixos, sendo os teores acima de 10 g dm⁻³ considerados adequados em áreas sob cultivo de cacaueteiro. Rita et al. (2011) informam que sistemas de cultivo de cacaueteiro estabilizados, ou seja, isento de revolvimento de solo e crescimento estagnado de espécies florestais de sombreamento, favorece o acúmulo a longo prazo de elevados teores de matéria orgânica. Barreto et al. (2011) comentam que o cultivo de cacaueteiros em sistema agroflorestal contribui para a melhoria da

qualidade do carbono orgânico em superfície e em profundidade, sendo seus teores variáveis.

Para o P, observa-se que os níveis na região superior esquerda da área apresentam valores com intervalo entre 6 a 9 mg dm⁻³. Na região esquerda da área ocorrem níveis dentro do intervalo 9 a 17 mg dm⁻³, sendo que a maior extensão desta apresenta níveis de P superiores a 17 mg dm⁻³ (Figura 2), entretanto, com grande variação após essa classe. Variação elevada para o P foi observada por Silva et al. (2010) em um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café arábica.

Atualmente, as adubações realizadas em áreas cultivadas com cacau são baseadas em formulações. No caso do P, considera-se como baixo, níveis inferiores a 9 mg dm^{-3} , médio para o intervalo de 9 a 16 mg dm^{-3} , alto para o intervalo entre 17 a 30 mg dm^{-3} e muito alto se acima de 30 mg dm^{-3} (CHEPOTE et al. 2013). De modo geral, observa-se que, com base nos valores recomendados para este atributo, há necessidade de aplicação deste nutriente somente em posições específicas da área, uma vez que a maior parte desta encontra-se dentro de classes de fertilidade aceitáveis para a cacaucultura.

De modo geral, a baixa mobilidade do P e a predominância de argila de baixa atividade em Nitossolo contribuíram para uma maior disponibilidade desse nutriente em solução (Santana et al. 2002). Silva et al. (2010) encontraram teores muito baixos de P em solo cultivado com café. Lima et al. (2013) e Dalchiavon et al. (2012) encontraram valores baixo e médio, respectivamente, para o P em sistema de plantio direto, sendo sua disponibilidade associada a forma de aplicação do nutriente, adsorção pelas argilas e baixa mobilidade no solo.

Para a relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, foram observadas regiões isoladas com níveis dentro do intervalo $1,0$ a $1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A maior proporção da área apresenta níveis cujo intervalo é de $1,5$ a $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e pequenas regiões com níveis acima de $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 3). De modo geral, o mapa indica que a área em estudo encontra-se com níveis baixos para a relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, visto que, para o cultivo do cacau, o ideal é uma relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} \geq 3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (CHEPOTE et al., 2012).

Os níveis de K^+ apresentam valores com intervalo de $0,05$ a $0,07 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na extremidade superior esquerda da área, seguida de uma grande extensão da área onde os níveis encontram-se dentro do intervalo $0,70$ a $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Valores acima de $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ foram observados apenas em regiões isoladas da área (Figura 3). Em linhas gerais, o mapa de K^+ indica que a área encontra-se com níveis baixos deste atributo, sendo recomendado, conforme Chepote et al. (2013), níveis cujo intervalo seja de $0,10$ a $0,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Os Nitossolos são solos ricos em micas e feldspatos-K, dentre outros minerais, que

favorecem a ocorrência de altos níveis de K^+ total no solo, no entanto os níveis disponíveis em solução apresentam-se muito baixos (ERNANI et al. 2007). Ressalta-se que o segundo nutriente mais efetivamente exportado pelo cacau é o K^+ , sendo encontrado em grandes concentrações na casca dos frutos (SOUZA Jr et al., 2012). Desta forma, em sistemas tradicionais de cultivo, onde ocorre a deposição desordenada das cascas dos frutos e outras partes da planta na área de cultivo, visando a ciclagem de nutrientes, é comum a ocorrência de locais específicos com níveis diferenciados de K^+ no solo.

Quanto à Soma de Bases (SB), o mapa apresenta regiões com valores num intervalo entre $12,5$ a $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e uma região com valores dentro do intervalo 15 a $17,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Observa-se uma faixa no lado direito da área, cujo valor encontram-se no intervalo de $17,5$ a $20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e regiões isoladas com valores acima de $20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 3). Níveis altos de bases trocáveis são frequentemente encontrados em camadas superficiais, sendo estes reduzidos com o aumento da profundidade de amostragem, conforme observado por Dalchiavon et al. (2012) e Lima et al. (2013).

Para a Saturação por Bases (V %), foram observados, em uma grande proporção da área, níveis com intervalo entre 71 a 79 %. Valores dentro do intervalo de 79 a 85 % são observados numa faixa na região direita e uma região isolada à esquerda da área. Níveis de V % acima de 85 são observados na extremidade superior e inferior direita da área (Figura 3). Observa-se que nos locais onde o atributo K^+ e a relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ apresentaram os maiores níveis, foram observados os maiores níveis de SB e V, sugerindo que a participação destes atributos no complexo de troca tende a ser maior e que este não está sendo preferencialmente ocupado por H^+ ou Al^{3+} . Chepote et al. (2012) afirmam que os valores do atributo V % superiores a 40 % são indicados para o cultivo de cacau.

Para a CTC efetiva, o mapa mostra pequenas regiões com valores dentro do intervalo de $11,5$ a $16,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Uma grande extensão da área apresenta valores no intervalo de $16,5$ a $21,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, seguida de uma pequena região no lado direito com valores acima de $21,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 4).

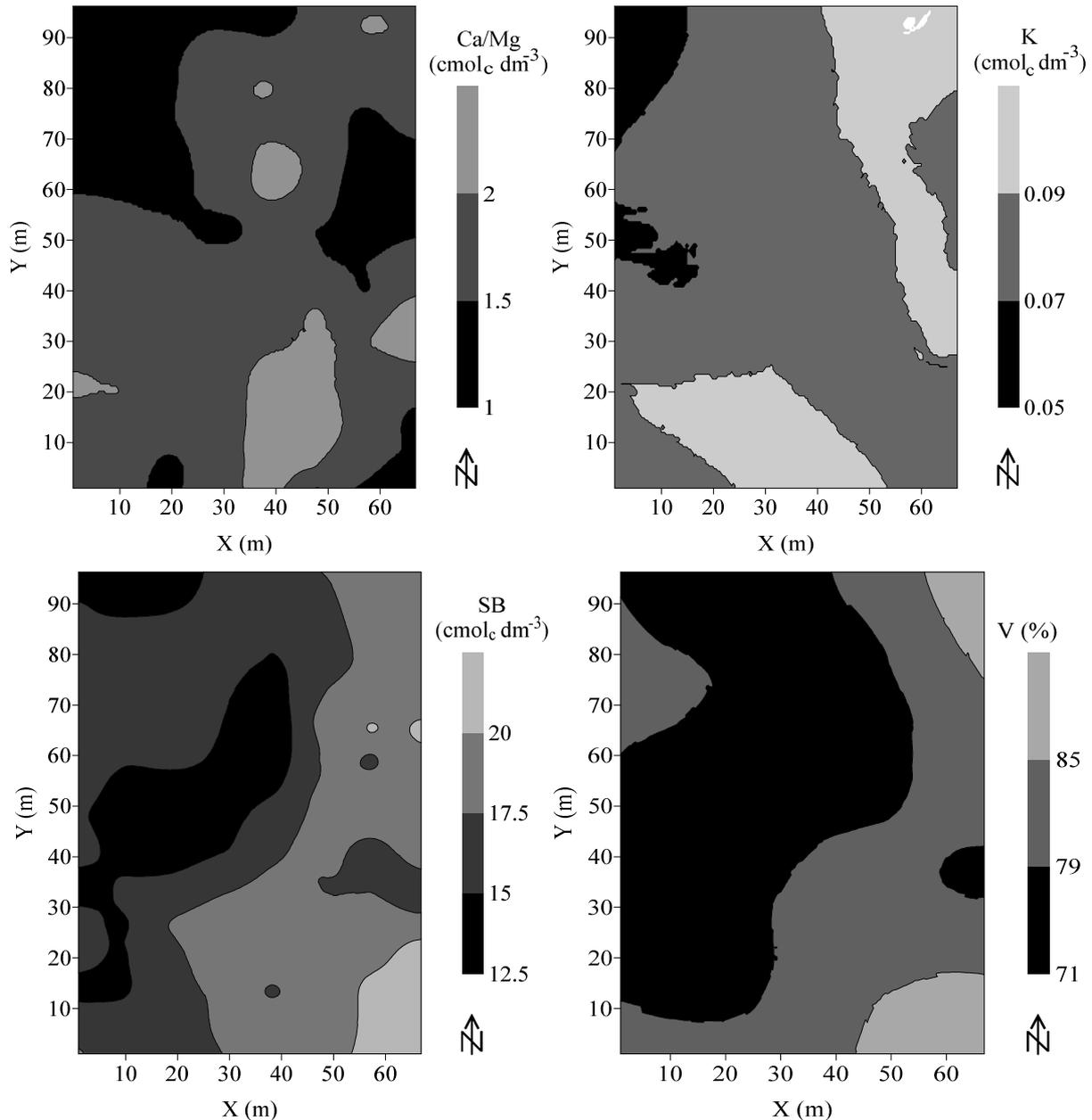


Figura 3. Mapas da distribuição dos atributos $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, K, SB e V na camada 0 – 20 cm.

Briedis et al. (2012), quando analisaram o teor de carbono orgânico e sua influência na fertilidade do solo, observaram uma correlação positiva entre TOC e CTC efetiva, atribuindo este resultado à prática da calagem que elevou os teores de TOC no perfil do solo e os níveis de cátions básicos em solução.

O mapa de CTC indica regiões isoladas com valores no intervalo entre 18 a 21 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, uma grande proporção da área com valores dentro do intervalo 21 a 24 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e pequenas regiões com valores acima de 24 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura

4). Conforme Chepote et al (2012), valores de CTC acima de 8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ já são considerados adequados para o cultivo de cacauzeiros.

Em linhas gerais, a fertilidade do solo em estudo apresenta elevada variabilidade, sugerindo que a aplicação de fertilizantes e corretivos não deve ser realizada com base na média dos dados, para se evitar uma sub ou super aplicação de produtos (SANCHEZ et al, 2012), sendo o correto considerar a variabilidade espacial dos atributos químicos na área (SILVA et al., 2010). Desse modo, a correção da fertilidade do solo para o cultivo de cacauzeiros

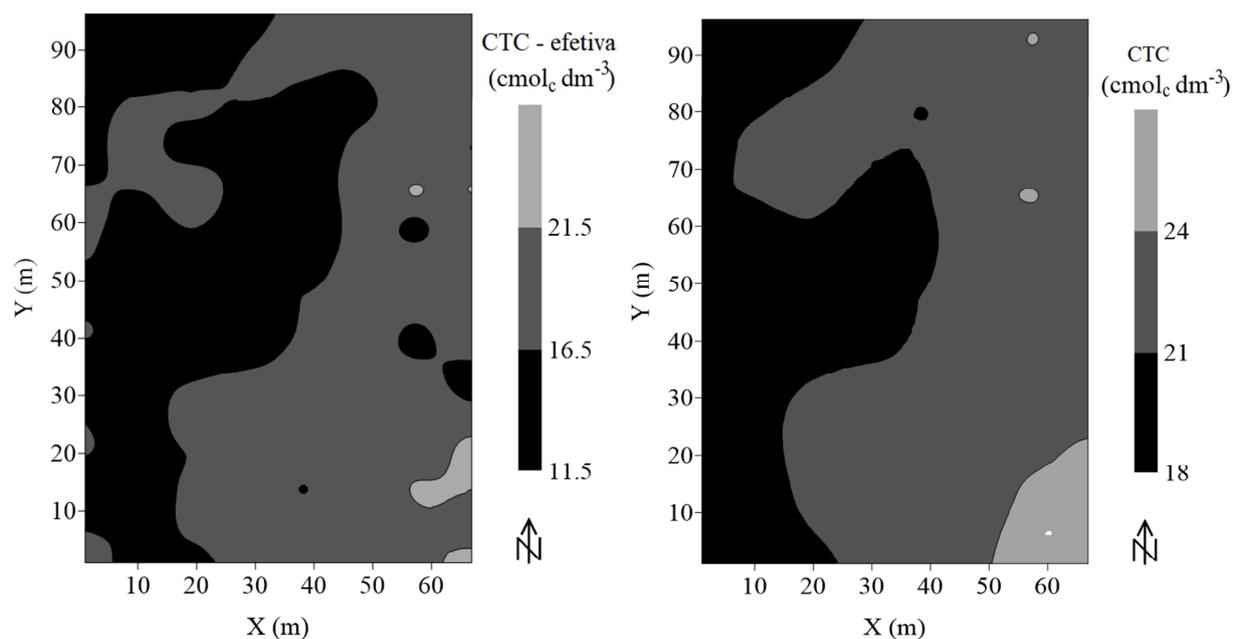


Figura 4. Mapas da distribuição dos atributos CTC efetiva e CTC potencial na camada 0 – 20 cm.

visa o desenvolvimento da planta e a produção de frutos de qualidade, e, quando associado à aplicação de insumos em taxas variadas, permite que os nutrientes sejam colocados em locais e quantidades adequadas.

CONCLUSÕES

- O sistema de cultivo do tipo agroflorestal influenciou os teores de TOC, CTC efetiva e CTC.
- O K^+ foi o atributo que apresentou maior continuidade, caracterizando uma menor variação de valores na área.
- Os níveis de P em solução foram altos, sendo que apenas uma pequena proporção da área necessita de correção.
- Os níveis de Ca^{+2}/Mg^{+2} , P e K^+ em solução encontram-se abaixo do recomendado.
- Os mapas apresentam regiões específicas com níveis variáveis de nutrientes, os quais podem ser utilizados como referenciais para aplicações de fertilizantes em taxas variadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio

financeiro para realização dessa pesquisa e à Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) pela concessão da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, N.M.; MELO, J.C.; SANTOS, A.C.; CUNHA, O.F.R.; PAULA NETO, J.J. Distribuição espacial das propriedades do solo, produção do capim-marandu com a intensidade de pastejo. *Engenharia na Agricultura*, v.24, n.4, p.338-349, 2016.
- ARÉVALO, E.; RAM, A.; VALLE, R.R. Integração de práticas de manejo no cultivo de cacau. In: Valle, R. R. (Ed.). *Ciência, tecnologia e manejo do cacau*. Editora Vital. Itabuna, p.324-370, 2007.
- BARRETO, P.A.B.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; FONTES, A.G.; POLIDORO, J.C.; MOÇO, M.K.S.; MACHADO, R.C.R.; BALIGAR, V.C. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agroforest Systems*, v.81, n.3, p.213-220, 2011.
- BRIEDIS, C.; SÁ, J.C.M.; CAIRES, E.F.; NAVARRO, J.F.; INAGAKI, T.M.; FERREIRA, A.O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio

direto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, n.7, p.1007-1014, 2012.

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 Science Society of America Journal, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARDOSO, J.A.; LACERDA, M.P.C.; REIN, T.A.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; FIGUEIREDO, C.C. Variability of soil fertility properties in areas planted to sugarcane in the state of Goiás Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, n.2, p.506-515, 2014.

CHEPOTE, R.E.; SANTANA, S.O.; ARAUJO, Q.R.; SODRÉ, G.A.; REIS, E.L.; PACHECO, R.G.; MARROCOS, P.C.L.; SERÔDIO, M.H.C.F.; VALLE, R.R. Aptidão agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacaueteiro. In: Valle, R.R. (Ed.). Ciência, tecnologia e manejo do cacaueteiro. 2ª Edição. Brasília. p. 67-105, 2012.

CHEPOTE, R.E.; SODRÉ, G.A.; REIS, E.L.; PACHECO, R.G.; MARROCOS, P.C.L.; VALLE, R.R. Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacaueteiro no sul da Bahia. CEPLAC/CEPEC. Ilhéus, BA. Boletim Técnico nº203. p.44, 2013.

CRESSIE, N.A.C. Statistic for spatial data. New York: John Wiley & Sons., 1993. p.900.

DALCHIAVON, F.C., CARVALHO, M.P.E, ANDREOTTI, M., MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distrófico sob sistema de plantio direto. Revista Ciência Agronômica, v.43, n.3, p.453-461, 2012.

DALCHIAVON, F.C.; RODRIGUES, A.R.; LIMA, E.S.; LOVERA, L.H.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. Revista de Ciências Agroveterinárias, v.16, n.2, p.144-154, 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária. Manual de métodos de análise de solos, 2ª ed, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. p.230.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª ed., Brasília, 2013. p.353.

ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.; SANTOS, F.C. Potássio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa – MG. p.551-594, 2007.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University, 1989. p.561.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Die Klimate der Erde. Gotha, Verlag Justus Perthes, Wall-map 120 cm x 200 cm, 1928.

LIMA, J.S.S.; SILVA, S.A.; OLIVEIRA, R.B.; FONSECA, A.S. Estimativa da produtividade de café conilon utilizando técnicas de cokrigagem. Revista Ceres, v.63, n.1, p.054-061, 2016.

LIMA, J.S.S.; SILVA, S.A.; SILVA, J.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. Revista Ciência Agronômica, v.44, n.1, p.16-23, 2013.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, E.M.R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. Revista Ciência Rural, v.39, n.4, p.1077-1082, 2009.

MANZIONE, R.L.; ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial multivariada aplicada na avaliação da fertilidade do solo. Revista Engenharia na Agricultura, v.19, n.3, p.227-235, 2011.

OLIVEIRA, R.B.; LIMA, J.S.S.; XAVIER,

- A.C.; PASSOS, R.R.; SILVA, S.A.; SILVA, A.F. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. *Revista Engenharia Agrícola*, v.28, n.1, p.176-186, 2008.
- RITA, J.C.O.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; POLIDORO, J.C.; MACHADO, R.C.R.; BALIGAR, V.C. C and N content in density fractions of whole soil and soil size fraction under cacao agroforestry systems and natural forest in Bahia, Brazil. *Environmental Management*, v.48, n.1, p.134-141, 2011.
- SANCHEZ, R.B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARACAT NETO, J.; SIQUEIRA, D.S.; SOUZA, Z.M. Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. *Revista Engenharia Agrícola*, v.32, n.2, p.280-292, 2012.
- SANTANA, S.O.; SANTOS, R.D.; GOMES, I.A.; JESUS, R.M.; ARAÚJO, Q.R.; MENDONÇA, J.R.; CALDERANO, S.B.; FARIA FILHO, A.F. Solos da Região Sudeste da Bahia - Atualização da Legenda de Acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Ilhéus: CEPLAC; Rio de Janeiro: Embrapa Solos (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 16), 2002. p.93.
- SANTOS, R.O.; FRANCO, L.B.; SILVA, S.A.; SODRÉ, G.A.; MENEZES, A.A. Spatial variability of soil fertility and its relation of cocoa yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, n.2, p.88-93, 2017.
- SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Multivariate analysis and Geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.2, p.467-474, 2012.
- SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; BOTTEGA, E.L. Yield mapping of arabic coffee and their relationship with plant nutritional status. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. v.13, n.3, p.556-564, 2013.
- SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, A.F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.1, p.1-8, 2010.
- SODRÉ, G.A.; CORÁ, J.E.; SOUZA JÚNIOR, J.O. Caracterização física de substratos à base de serragem e recipientes para crescimento de mudas de cacaueiro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.29, n.2, p.339-344, 2007.
- SOUZA JÚNIOR, J.O.; MENEZES, A.A.; SODRÉ, G.A.; GATTWARD, J.N.; DANTAS, P.A.S.; CRUZ NETO, R.O. Diagnose foliar na cultura do cacau. In: Prado, R. de M. *Nutrição de plantas: diagnose foliar em frutíferas*. Jaboticabal: FCAV/CAPES/FAPESP/CANPq. p.443-471, 2012.
- VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SANTOS, N.T.; SANTOS, F.L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. *Scientia Agrícola*, v.69, n.3, p.173-179, 2012.
- VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). *Bragantia*, v.56, n.1, p.181-190, 1997.
- 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, 1980. p.319-344.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. *Geostatistics for Environmental Scientists*. Second Edition, 2007. p.333.