



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FITOTECNIA**

**ESPACIALIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO E DO**  
**CAFEIRO ARÁBICA EM DENSIDADES AMOSTRAIS**  
**NO PLANALTO DE VITÓRIA DA CONQUISTA-BA**

**VITÓRIA DA CONQUISTA**  
**BAHIA – BRASIL**  
**2020**

**GABRIEL FERNANDES PINTO FERREIRA**

**ESPACIALIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO E DO CAFEIEIRO ARÁBICA  
EM DENSIDADES AMOSTRAIS NO PLANALTO DE  
VITÓRIA DA CONQUISTA-BA**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Peres Soratto, UNESP

Coorientador: Prof. Dr. Odair Lacerda Lemos, UESB

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA - BRASIL  
2020

F441e

Ferreira, Gabriel Fernandes Pinto.

Espacialização de atributos do solo e do cafeeiro arábica em densidades amostrais no planalto de Vitória da Conquista-BA. / Gabriel Fernandes Pinto Ferreira, 2020.

110f.: il.

Orientador (a): D. Sc. Rogério Peres Soratto.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2020.

Inclui referência f. 92 - 107.

1. Cafeicultura de precisão. 2. Variabilidade espacial - Mapeamento. 3. *Coffea arabica*. 4. Geoestatística. I. Soratto, Rogério Peres. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós- Graduação em Agronomia. T.III.

CDD. 633.73

**Catálogo na fonte:** Juliana Teixeira de Assunção – CRB 5/1890  
UESB - Campus Vitória da Conquista - BA.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**Área de Concentração em Fitotecnia**

*Campus de Vitória da Conquista, BA*

**DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO**

**Título:** Especialização de atributos do solo e do cafeeiro arábica em densidades amostrais no planalto de Vitória da Conquista-BA

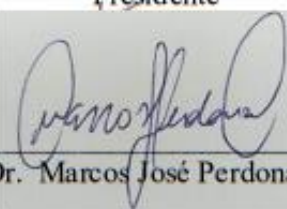
**Autor:** Gabriel Fernandes Pinto Ferreira

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA, AREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Rogério Peres Soratto (FCA/UNESP)  
Presidente



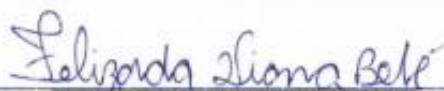
---

Prof. Dr. Marcos José Perdoná (APTA)



---

Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat (UFPI)



---

Prof. Dr. Felizarda Viana Bêbé (IFBaiano)



---

Prof. Dr. Ramon Correia de Vasconcelos (UESB)

Data de realização: 22 de dezembro de 2020.

Dedico este trabalho  
em favor da cafeicultura baiana e brasileira  
que tanto me motiva a trabalhar e pesquisar.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, por proporcionar toda minha formação acadêmica de graduação e pós-graduação, especialmente neste momento, pela oportunidade de conclusão do curso de doutorado em Agronomia (Fitotecnia).

Ao professor D.Sc. Rogério Peres Soratto - UNESP, pela orientação, amizade, confiança, ensinamentos e todo apoio dispensado a mim durante as atividades desenvolvidas no decorrer do curso de pós-graduação.

Ao professor D.Sc. Odair Lacerda Lemos - UESB, pela coorientação, amizade, atenção, convivência e preciosas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor D.Sc. Claudionor Dutra Neto - UESB, pela receptividade e convivência durante o estágio em ensino na disciplina Fertilidade do Solo e Adubação.

Ao professor M.Sc. Carlos Henrique Farias Amorim - UESB, pela amizade e colaboração com as análises realizadas no Laboratório de Química do Solo.

À professora D.Sc. Sandra Elizabeth de Souza - UESB, pelo apoio e incentivo nas atividades de ensino, pesquisa e extensão relacionadas à cafeicultura.

À professora D.Sc. Maria Aparecida Castellani, coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia), pelo apoio dispensado a mim durante o curso.

A todos demais professores do curso de pós-graduação que muito contribuíram com seus valiosos ensinamentos.

Aos colegas de curso, pelos momentos agradáveis de convivência em sala de aula durante o período de curso de pós-graduação.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias - LabGEO, pelo apoio na execução das atividades de campo e de laboratório.

Aos proprietários, gerentes e funcionários da Fazenda São Miguel, pela gratificante receptividade e pela disponibilidade de parte da lavoura cafeeira e demais infraestruturas para realização do presente estudo.

Aos membros da banca examinadora deste trabalho.

Aos meus familiares amados, por todo apoio.

Aos meus amigos queridos, pelo incentivo.

É tempo de colheita.

Muito Obrigado!

<sup>2</sup> Diga ao Senhor: “Meu refúgio, minha fortaleza, meu Deus, eu confio em ti!”

(Salmo 90, 2)

<sup>7</sup> Bendito o homem que confia no Senhor, e cuja confiança é o Senhor. <sup>8</sup> Porque será como a árvore plantada junto às águas, que estende as suas raízes para o rio, e não receia quando vem o calor, mas a folha fica verde; e no ano de sequeidão não se afadiga, nem deixa de dar fruto.

(Jeremias 17, 7-8)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Panorama da cafeicultura brasileira.....	17
2.1.1 Cafeicultura no estado da Bahia.....	18
2.2 Cultura do café arábica.....	19
2.2.1 Aspectos fitotécnicos.....	19
2.2.2 Fertilidade do solo.....	21
2.2.3 Exigências nutricionais.....	22
2.3 Cafeicultura de precisão.....	25
2.3.1 Variabilidade espacial de atributos químicos de solo na cafeicultura.....	27
2.3.2 Variabilidade espacial de atributos fitotécnicos do cafeeiro arábica.....	29
2.3.3 Amostragem de solo e planta em cafeicultura de precisão.....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Localização da área experimental.....	32
3.2 Georreferenciamento e pontos amostrais.....	33
3.3 Amostragem e análise química do solo cultivado com cafeeiro arábica.....	34
3.4 Amostragem e análise química foliar do cafeeiro arábica.....	35
3.5 Amostragem e mensurações vegetativas e produtivas do cafeeiro arábica.....	36
3.6 Análises estatísticas.....	37
3.7 Indicador de densidade amostral.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1 Espacialização e mapeamento dos atributos do solo e do cafeeiro arábica.....	40
4.1.1 Atributos químicos do solo cultivado com cafeeiro arábica.....	40
4.1.2 Atributos químicos do subsolo cultivado com cafeeiro arábica.....	52
4.1.3 Macronutrientes foliares do cafeeiro arábica.....	58
4.1.4 Micronutrientes foliares do cafeeiro arábica.....	64
4.1.5 Atributos vegetativos do cafeeiro arábica.....	69
4.1.6 Atributos produtivos do cafeeiro arábica.....	73
4.2 Correlação espacial entre atributos de solo e planta com atributos produtivos do cafeeiro arábica.....	78
5 CONCLUSÕES.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
ANEXOS.....	108



## RESUMO

FERREIRA, G.F.P. **Espacialização de atributos do solo e do cafeeiro arábica em densidades amostrais no planalto de Vitória da Conquista-BA**. Vitória da Conquista – BA: UESB, 2020, 110p. (Tese – Doutorado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia)\*

Os atributos químicos do solo e os aspectos fitotécnicos do cafeeiro arábica podem variar espacialmente dentro de uma área de cultivo. Tradicionalmente, as práticas de manejo adotadas pelos cafeicultores são baseadas em amostragens que consideram a homogeneização dessas áreas e utilizam os valores médios representativos da característica em estudo para a tomada de decisões agronômicas. Entretanto, muitas dessas áreas cultivadas não se comportam de maneira uniforme quanto a esses fatores de solo e planta. Nesse sentido, as técnicas de agricultura de precisão aplicadas à cafeicultura são capazes de diagnosticar a variabilidade espacial, encontrada nas lavouras de café, e propor soluções para a correção dessas desuniformidades e estabelecer zonas de manejo mais adequadas. Objetivou-se com este trabalho avaliar a espacialização dos atributos químicos de solo, vegetativos, nutricionais e produtivos do cafeeiro arábica, em duas densidades amostrais, a fim de estabelecer a amostragem capaz de representar melhor a área cultivada. O experimento foi desenvolvido numa lavoura cafeeira adulta comercial no município de Barra do Choça, estado da Bahia, e avaliou-se os atributos químicos do solo (0-20 cm: pH em água,  $P_{\text{Mehlich-1}}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ , H+Al, SB, t, T, V, e m) e subsolo (20-40 cm: pH em água,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  e m), atributos vegetativos (altura de planta, diâmetro de copa, diâmetro de caule e enfolhamento), atributos nutricionais (teores foliares de macro e micronutrientes) e atributos produtivos (produção de café por planta e índice de maturação dos frutos) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $ha^{-1}$ . Estabeleceu-se estes tratamentos para testar a hipótese da maior variabilidade espacial sob maior densidade amostral. Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva e à geoestatística, a fim de caracterizar a distribuição e a dependência espacial dos atributos estudados. Foi calculado o indicador de densidade amostral e realizado o mapeamento dessa variabilidade espacial. Foram avaliados também os coeficientes de correlação espacial entre os atributos de solo e planta com os aspectos produtivos do cafeeiro. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que há variabilidade espacial para os atributos do solo e da planta de café arábica, avaliados em função da densidade amostral. A maioria dos atributos avaliados na amostragem de 2 pontos  $ha^{-1}$  apresentou índice de dependência espacial fraco ou efeito pepita puro, contrariamente à densidade de 5 pontos  $ha^{-1}$ , que apresentou índice de dependência espacial predominantemente forte para a maior parte dos atributos de solo e planta. A maior densidade amostral demonstrou ser mais favorável à identificação dos padrões de variabilidade espacial dos atributos químicos de solo e da planta de café avaliados, à melhor visualização de zonas de manejo por meio dos mapas temáticos gerados e com melhores indicadores de qualidade da densidade amostral. Sob esta amostragem, verificou-se também que os atributos vegetativos correlacionaram-se positivamente com a produtividade do cafeeiro arábica.

**Palavras-chave:** cafeicultura de precisão, variabilidade espacial, geoestatística, mapeamento, *Coffea arabica*.

\***Orientador:** Rogério Peres Soratto, D.Sc., UNESP e **Coorientador:** Odair Lacerda Lemos, D.Sc.. UESB.

## ABSTRACT

FERREIRA, G.F.P. **Spatialization of soil and arabica coffee attributes in sample densities in the plateau of Vitória da Conquista-BA.** Vitória da Conquista – BA: UESB, 2020, 110p. (Thesis – Doctor Science in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science)\*

The chemical attributes of the soil and the phytotechnical aspects of arabica coffee can vary spatially within a cultivated area. Traditionally, the management practices adopted by coffee farmers are based on samples that consider the homogenization of these areas and use the average values representative of the characteristic under study to make agronomic decisions. However, many of these cultivated areas do not behave in a uniform manner regarding these soil and plant factors. In this sense, the precision farming techniques applied to coffee farming are able to diagnose the spatial variability found in coffee crops and propose solutions for the correction of these unevenness and establish more suitable management zones. The objective of this work was to evaluate the spatialization of the chemical, soil, vegetative, nutritional and productive attributes of arabica coffee, in two sample densities, in order to establish the sampling capable of better representing the cultivated area. The experiment was carried out in an adult commercial coffee plantation in the municipality of Barra do Choça, state of Bahia, and the chemical attributes of the soil were evaluated (0-20 cm: pH em água,  $P_{\text{Mehlich-1}}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ , H+Al, SB, t, T, V, e m) and subsoil (20-40 cm: pH em água,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  e m), vegetative attributes (plant height, crown diameter, stem diameter and leafing), nutritional attributes (leaf contents of macro and micronutrients) and productive attributes (coffee production per plant and fruit maturity index) in the sample densities of 2 e 5 pontos  $ha^{-1}$ . These treatments were established to test the hypothesis of greater spatial variability under higher sample density. The data obtained were submitted to descriptive statistical analysis and geostatistics, in order to characterize the distribution and spatial dependence of the attributes under study. Sample density indicator was calculated and thematic mapping of this spatial variability was performed. The correlation coefficients between soil and plant attributes with the productive aspects of Arabica coffee were also evaluated. From the results obtained, it was found that there is spatial variability for the chemical attributes of the soil and of the arabica coffee plant evaluated as a function of the sample density. Most of the attributes evaluated in the 2 points  $ha^{-1}$  sampling showed a weak spatial dependency index or pure nugget effect, in contrast to the density of 5 points  $ha^{-1}$ , which showed a predominantly strong spatial dependency index for most soil attributes. and plant. The higher sample density proved to be more favorable to the identification of the spatial variability patterns of the chemical attributes of the soil and the coffee plant evaluated, to a better visualization of management zones through the thematic maps generated and with better quality indicators of the sample density. Under this sampling, it was also found that the vegetative attributes were positively correlated with the productivity of arabica coffee.

**Keywords:** precision coffee farming, spatial variability, geostatistics, mapping, *Coffea arabica*.

---

\***Advisor:** Rogério Peres Soratto, D.Sc., UNESP and **Coadvisor:** Odair Lacerda Lemos, D.Sc. UESB.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localização do município de Barra do Choça-BA e dados geoclimáticos e georreferenciados da Fazenda São Miguel.....	32
<b>Figura 2.</b> Detalhamento da área experimental na Fazenda São Miguel: (a) aspecto vegetativo da lavoura cafeeira; (b) receptor GNSS geodésico; (c) local de demarcação de ponto amostral; e (d) mapa da área experimental com os pontos amostrais georreferenciados.....	33
<b>Figura 3.</b> Ilustração das etapas de: (a) coleta manual de solo utilizando trado holandês; (b) coleta de folhas do cafeeiro; (c) colheita de frutos de café; e (d) avaliação do grau de maturação dos frutos de café.....	34
<b>Figura 4.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: pH; P; K <sup>+</sup> ; Ca <sup>2+</sup> ; Mg <sup>2+</sup> e Al <sup>3+</sup> , na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	48
<b>Figura 5.</b> Semivariogramas da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: pH; P; K <sup>+</sup> ; Ca <sup>2+</sup> ; Mg <sup>2+</sup> e Al <sup>3+</sup> , na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	49
<b>Figura 6.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: H+Al; SB; t; T; V e m, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	50
<b>Figura 7.</b> Semivariogramas da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: H+Al; SB; t; T; V e m, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	51
<b>Figura 8.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos químicos do subsolo: pH; Ca <sup>2+</sup> ; Al <sup>3+</sup> e m, na profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	56
<b>Figura 9.</b> Semivariogramas da distribuição espacial dos atributos químicos do subsolo: pH; Ca <sup>2+</sup> ; Al <sup>3+</sup> e m, na profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	57
<b>Figura 10.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial dos macronutrientes foliares: N; P; K; Ca; Mg e S, expressos em g kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	62
<b>Figura 11.</b> Semivariogramas da distribuição espacial dos macronutrientes foliares: N; P; K; Ca; Mg e S, expressos em g kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	63
<b>Figura 12.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial dos micronutrientes foliares: Cu; Zn; Fe e Mn, expressos em mg kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	67
<b>Figura 13.</b> Semivariogramas da distribuição espacial dos micronutrientes foliares: Cu; Zn; Fe e Mn, expressos em mg kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	68

<b>Figura 14.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial de altura de planta (ALTU); diâmetro da copa (DCOP); diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	72
<b>Figura 15.</b> Semivariogramas da distribuição espacial de altura de planta (ALTU); diâmetro da copa (DCOP); diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	73
<b>Figura 16.</b> Mapas temáticos da distribuição espacial de produtividade 2019 (PROD19); índice de maturação 2019 (IMAT19); produtividade 2020 (PROD20) e índice de maturação 2020 (IMAT20) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .	77
<b>Figura 17.</b> Semivariogramas da distribuição espacial de produtividade 2019 (PROD19); índice de maturação 2019 (IMAT19); produtividade 2020 (PROD20) e índice de maturação 2020 (IMAT20) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .	78

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Estatística descritiva para os atributos químicos do solo, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	40
<b>Tabela 2.</b> Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos químicos do solo, profundidade de 0-20, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	46
<b>Tabela 3.</b> Estatística descritiva para os atributos químicos do subsolo, na profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	52
<b>Tabela 4.</b> Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos químicos do subsolo, profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	54
<b>Tabela 5.</b> Estatística descritiva para os macronutrientes foliares: N, P, K, Ca, Mg e S, expressos em g kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	58
<b>Tabela 6.</b> Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos macronutrientes foliares: N, P, K, Ca, Mg e S, expressos em g kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	61
<b>Tabela 7.</b> Estatística descritiva para os micronutrientes foliares: Cu, Zn, Fe e Mn, expressos em mg kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	64
<b>Tabela 8.</b> Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos micronutrientes foliares: Cu, Zn, Fe e Mn, expressos em mg kg <sup>-1</sup> , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	66
<b>Tabela 9.</b> Estatística descritiva para os atributos vegetativos de altura de planta (ALTU) (m), diâmetro da copa (DCOP) (m), diâmetro do caule (DCAU) (mm) e enfolhamento (ENFO), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	69
<b>Tabela 10.</b> Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos vegetativos altura de planta (ALTU) (m), diâmetro da copa (DCOP) (m), diâmetro do caule (DCAU) (mm) e enfolhamento (ENFO), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	70
<b>Tabela 11.</b> Estatística descritiva para os atributos produtivos de produtividade 2019 (PROD19) (L planta <sup>-1</sup> ), índice de maturação 2019 (IMAT19) (%), produtividade 2020 (PROD20) (L planta <sup>-1</sup> ) e índice de maturação 2020 (IMAT20) (%), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	74
<b>Tabela 12.</b> Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos produtivos de produtividade 2019 (PROD19) (L planta <sup>-1</sup> ), índice de maturação 2019 (IMAT19) (%), produtividade 2020 (PROD20) (L planta <sup>-1</sup> ) e índice de maturação 2020 (IMAT20) (%), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	75
<b>Tabela 13.</b> Matriz de correlação espacial entre atributos químicos do solo: pH, P, K, Ca, Mg e Al, na profundidade de 0-20 cm, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	80

<b>Tabela 14.</b> Matriz de correlação espacial entre atributos químicos do solo: H+Al, SB, t, T, V e m, na profundidade de 0-20 cm, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	81
<b>Tabela 15.</b> Matriz de correlação espacial entre os atributos químicos do subsolo: pH, Ca, Al e m, na profundidade de 20-40 cm, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	82
<b>Tabela 16.</b> Matriz de correlação espacial entre os macronutrientes foliares: N, P, K, Ca, Mg e S, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	83
<b>Tabela 17.</b> Matriz de correlação espacial entre os micronutrientes foliares: Cu, Zn, Fe e Mn com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	84
<b>Tabela 18.</b> Matriz de correlação espacial entre os atributos vegetativos de altura de plantas (ALTU), diâmetro da copa (DCOP), diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) com a produtividade em 2019 (PROD19), o índice de maturação em 2019 (IMAT19), a produtividade em 2020 (PROD20) e o índice de maturação em 2020 (FCER20), em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha <sup>-1</sup> .....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	alcance
Al	alumínio
ALTU	altura de plantas
DCOP	diâmetro de copa
DCAU	diâmetro de caule
DP	desvio padrão
Ca	cálcio
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
C <sub>0</sub>	efeito pepita
C <sub>1</sub>	contribuição
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	patamar
cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	centimol de carga por decímetro cúbico
Cu	cobre
CV	coeficiente de variação
ENFO	enfolhamento
EPP	efeito pepita puro
Fe	ferro
g kg <sup>-1</sup>	grama por quilograma
°C	graus Celsius
ha	hectare
H+Al	acidez potencial
IBC	Instituto Brasileiro do Café
ICO	Organização Internacional do Café
IDA	indicador de densidade amostral
IDE	índice de dependência espacial
IMAT	índice de maturação
K	potássio
kg	quilograma
kg planta <sup>-1</sup>	quilograma por planta
K-S	teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov
L planta <sup>-1</sup>	litros por planta
N	nitrogênio
m	saturação por alumínio
m	metro
mg kg <sup>-1</sup>	miligrama por quilograma
mm	milímetro
Mg	magnésio
Mn	manganês
P	fósforo
pH	acidez ativa
PROD	produtividade
PRRC	Plano de Renovação e Revigoração de Cafezais
%	porcentagem
S	enxofre
SB	soma de bases
sc ha <sup>-1</sup>	sacas por hectare
t	capacidade de troca de cátions efetiva
t ha <sup>-1</sup>	toneladas por hectare
T	capacidade de troca de cátions a pH 7,0
UESB	Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
UNESP	Universidade Estadual Paulista
V	saturação por bases
Zn	zinco

## 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil. O País é atualmente o maior produtor e exportador mundial de café e sua importância histórica se traduz pelo desenvolvimento de diversas regiões produtoras, tanto no âmbito econômico quanto no social. Entretanto, apesar da produção de café representar tamanha importância para diversas regiões, muitas lavouras ainda são manejadas considerando os métodos tradicionais, que são baseados na hipótese de homogeneização dos fatores relacionados à fertilidade do solo e às características fitotécnicas das plantas. A caracterização dos sistemas de produção de café no Brasil considera diversos padrões de tecnologia adotados nas principais práticas agrícolas (Matiello et al., 2016).

O cultivo de café no Brasil ocorre dentro de uma diversidade de fatores que podem influenciar significativamente a sua produtividade da cultura, e o manejo de forma homogênea pode levar a uma redução da rentabilidade para o produtor (Ferraz et al., 2018). Na lavoura cafeeira, normalmente há variação da produtividade das plantas no tempo e no espaço (Silva et al., 2013). Segundo Santinato (2016), o cafeeiro apresenta particularidades que contribuem para se ter elevada variabilidade espacial, seja em seus próprios atributos ou em outros ligados a ele, tais como os parâmetros de fertilidade do solo. Nesse contexto, a cafeicultura de precisão surge como uma importante ferramenta capaz de melhorar o gerenciamento da produção cafeeira, mostrando que o conhecimento de determinadas características do solo, associado à resposta de produtividade da planta de café, pode facilitar a aplicação localizada e racional dos insumos, com resultados ambientais e econômicos positivos (Ferraz et al., 2012a).

A cafeicultura de precisão refere-se à utilização de técnicas de agricultura de precisão na lavoura cafeeira (Silva e Alves, 2013), entretanto, a sua adoção, mesmo já sendo uma realidade, ainda se encontra em um estágio inicial (Ferraz et al., 2012a). As técnicas de manejo de precisão para as culturas perenes, como o café, ainda são limitadas (Faria et al., 2020). Os cafeicultores ainda necessitam de mais informações oriundas de pesquisas para que possam migrar do sistema convencional de manejo da lavoura, para o sistema baseado na agricultura de precisão (Ferraz et al., 2015).

As pesquisas com agricultura de precisão na cultura do café têm demonstrado variabilidade acentuada de atributos do solo e da produção (Barros et al., 2015). Seu uso



mais comum tem sido aplicado ao estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, entretanto, essa técnica pode ser aplicada também para atributos da planta, de forma a possibilitar o gerenciamento mais preciso do processo de acompanhamento do desenvolvimento desta (Ferraz et al., 2017a).

Com a cafeicultura de precisão, é possível a criação de mapas temáticos que direcionem as práticas de manejo para as regiões em que há limitações para o desenvolvimento das plantas (Carvalho et al., 2017a). Assim, a definição de zonas de manejo facilita a aplicação de insumos agrícolas em taxa variável (Valente et al., 2012). Para tanto, a geoestatística se apresenta como uma metodologia importante para análise de dados no âmbito da agricultura de precisão (Ferraz et al., 2017a), pois objetiva caracterizar a magnitude da variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e estimar as inter-relações desses atributos no espaço e no tempo (Bernardi et al., 2015), além de permitir estudar padrões confiáveis de amostragem. A determinação de uma grade de amostragem ideal é fundamental para a avaliação da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas. O tamanho dessa grade amostral está relacionado com a acurácia da amostragem e também com o custo (Bernardi et al., 2015).

A espacialização dos atributos químicos do solo e dos aspectos fitotécnicos das plantas de café, normalmente, ocorre dentro de uma área de cultivo e se faz necessário seu conhecimento e detalhamento a fim de estabelecer as zonas de manejo na lavoura. É importante destacar que a definição da densidade amostral se relaciona diretamente com o nível de detalhamento com o qual se deseja avaliar os atributos de solo e planta. Para tanto, é requerido um número adequado de amostras para que os dados analisados geoestatisticamente possam gerar mapas confiáveis. Considera-se que ainda são poucas as pesquisas conclusivas sobre a densidade de amostragem satisfatória para representar a distribuição espacial dos atributos químicos dos solos e das plantas de café no Brasil. Assim, se faz necessário novos estudos para ampliar as informações a respeito do uso da cafeicultura de precisão. Nesse sentido, a utilização de maiores densidades amostrais por hectare, que aquelas atualmente descritas na literatura, podem aumentar a confiabilidade para adoção desse sistema de manejo mais preciso.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e vegetativos, nutricionais e produtivos do cafeeiro arábica em duas diferentes densidades amostrais, a fim de definir a amostragem que melhor represente a espacialização desses atributos agronômicos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Panorama da cafeicultura brasileira

A cafeicultura é uma das mais tradicionais e importantes atividades econômicas do Brasil, cujo cultivo faz parte da própria história do país. O café é uma das *commodities* mais comercializadas no mundo e o Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador mundial deste produto, atendendo a diversos mercados consumidores, nacionais e internacionais. As duas espécies de café amplamente cultivadas no Brasil são a *Coffea arabica* L., denominada de café arábica; e *Coffea canephora* Pierre, denominada de café robusta. A produção na safra 2020 foi estimada em aproximadamente 63,08 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado (CONAB, 2020), o que representou aproximadamente 38,2% da produção mundial, já que esta foi estimada em torno de 165,05 milhões de sacas, segundo a Organização Internacional do Café - ICO (ICO, 2020).

A área atualmente cultivada com café no Brasil é de cerca de 2,16 milhões de hectares, sendo que a área em produção corresponde a 1,88 milhões de hectares (CONAB, 2020). A lavoura cafeeira é bastante difundida no território brasileiro e sua contribuição é historicamente relevante para a economia nacional, em função da geração de renda e empregos (Bliska et al., 2009a). Embora haja essa ampla difusão, a produção cafeeira predomina praticamente em seis Estados: Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Bahia e Rondônia (Bliska et al., 2009b; CONAB, 2020). O desenvolvimento da cafeicultura nacional e regional foi de suma importância para o crescimento do país e de algumas regiões e cidades, tanto no âmbito econômico quanto no social (Turco et al., 2013).

De maneira geral, a cafeicultura brasileira sucedeu-se ao longo dos anos por momentos distintos, ocasionados por diversos fatores que envolvem as práticas agronômicas de cultivo e suas tecnologias (Matiello et al., 2016). Atualmente, dentre as tecnologias existentes, destaca-se a cafeicultura de precisão, que visa através de princípios da geoestatística gerar diagnósticos localizados de características do solo e da planta, contribuindo, assim, para melhor gerenciar as áreas de cultivo e facilitar a aplicação localizada e racional dos insumos, proporcionando resultados agronômicos, ambientais e econômicos satisfatórios (Silva e Alves, 2013), e tornando a atividade mais sustentável.

### 2.1.1 Cafeicultura no estado da Bahia

Na Bahia, a cafeicultura comercial surgiu a partir da década de 1970, através do Plano de Renovação e Revigoração de Cafezais – PRRC (Oliveira et al., 2007), proposto pelo extinto Instituto Brasileiro do Café – IBC (Dutra Neto, 2004), que impulsionou a modernização da cafeicultura baiana, consolidando essa atividade em diversas regiões do estado (Silva et al., 2018). A partir de então, a Bahia passou a fazer parte do cenário da cafeicultura comercial brasileira, recebendo financiamentos governamentais para o plantio desta cultura (Oliveira et al., 2007). Essa atividade teve, e continua tendo, grande influência no desenvolvimento econômico de vários municípios baianos (Chalfoun e Reis, 2010).

A cafeicultura tem, portanto, importância considerável na economia agrícola da Bahia, que atualmente ocupa a quarta posição em produção de café no Brasil, tendo produzido 3,98 milhões de sacas de 60 kg na safra 2020 (das espécies *C. arabica* e *C. canephora*), em uma área produtiva de 106,88 mil hectares, contribuindo com aproximadamente 6% da produção nacional (CONAB, 2020). O Estado da Bahia possui um parque cafeeiro expressivo e compreendido por três regiões produtoras principais: a do Atlântico (Sul e Extremo Sul), onde é cultivado *C. canephora*; a do Cerrado (Oeste) e a do Planalto, onde é cultivado *C. arabica* (Matiello, 2000). Na região do Planalto da Bahia estão localizados os mais antigos cafezais do Estado (Bliska et al., 2009a). Essa região está subdividida nos Planaltos de Vitória da Conquista, da Chapada Diamantina e de Itiruçu/Vale do Jiquiriçá/Brejões (Fernandes, 2011).

A região do planalto de Vitória da Conquista apresenta altitude média acima de 700 metros e temperatura média anual em torno de 21°C, onde se encontram doze municípios produtores de café: Vitória da Conquista, Barra do Choça, Poções, Planalto, Encruzilhada, Ribeirão do Largo, Itambé, Caatiba Iguai, Nova Canaã, Boa Nova e Ibicuí (Dutra Neto, 2004). Ao longo dos últimos anos, essa região tem apresentado baixas produtividades de café devido a diversos fatores, principalmente aqueles relacionados aos aspectos edafoclimáticos e de manejo, que influenciam no desenvolvimento e na produção da cultura. Dada a importância da cafeicultura para as regiões produtoras da Bahia, faz-se necessário aporte de pesquisas que sejam capazes de gerar conhecimentos e resultados que irão contribuir com o melhor desenvolvimento e sustentabilidade da produção cafeeira regional.

## 2.2 Cultura do café arábica

### 2.2.1 Aspectos fitotécnicos

O cafeeiro arábica é uma planta nativa de sub-bosques das florestas da Etiópia e sul do Sudão, localizados em altitudes que variam de 1.600 a 2.000 m. Nessa região, o clima é ameno e úmido, com temperaturas oscilando entre 17 °C e 19 °C nos meses mais frios, e entre 22 °C e 26 °C nos meses mais quentes (Livramento, 2010). O cafeeiro arábica produz poucas flores em seu ambiente nativo sombreado e, portanto, não desenvolveu, ao longo de sua evolução, mecanismos para produzir elevada carga de frutos (DaMatta et al., 2008).

Entretanto, o café expandiu-se como cultura e foi adaptado às mais variadas condições ecológicas, pois esta planta apresenta grande capacidade de se aclimatar às modificações de ambiente, mediante alterações morfológicas, bioquímicas e fisiológicas (Rena et al., 1998). O bom desenvolvimento vegetativo e produtividades alcançadas pelos cafeeiros em muitas das regiões onde está sendo cultivado, demonstra a grande adaptabilidade da espécie *C. arabica*, pois, em sua grande maioria, são regiões de climas contrastantes. Desde que foi introduzido no Brasil, em 1727, o cafeeiro foi conduzido nas mais diversas formas de manejo, tipos de solo, clima, arranjos de espaçamento, submetidos a estresses ambientais, procurando-se sempre a máxima produtividade. O sucesso da expansão da cafeicultura no Brasil foi possível, então, devido às pesquisas agrônômicas, realizadas por várias instituições (Livramento, 2010). Segundo Guerra et al. (2007), a tecnologia cafeeira no Brasil busca continuamente um sistema produtivo eficiente, competitivo e sustentável. Petek e Patrício (2007) ressaltaram a necessidade de constante desenvolvimento tecnológico para a cultura cafeeira.

O cafeeiro arábica leva dois anos para completar o ciclo fenológico (Camargo e Camargo, 2001). Basicamente, o padrão sazonal de crescimento do cafeeiro é dividido em duas situações: crescimento vegetativo e crescimento reprodutivo (Livramento, 2010). No primeiro ano do ciclo fenológico, há formação de novos ramos plagiotrópicos; e no segundo ano do ciclo, ocorre a floração, seguida da formação dos “chumbinhos” e da expansão, granação e maturação dos frutos (Martinez et al., 2015). A produção de grãos do cafeeiro se dá em gemas novas, e a emissão dessas gemas depende do crescimento dos ramos plagiotrópicos (Dubberstein et al., 2017).

O ciclo fenológico do cafeeiro pode variar de acordo com a região em que está estabelecida a cultura (Laviola et al., 2007a) e, em determinados estádios de desenvolvimento da planta, as fases vegetativa e reprodutiva podem ocorrer concomitantemente (Livramento, 2010). Um aspecto particular da cafeicultura brasileira é o padrão bienal de produção de café, caracterizado pela alta e baixa produção de grãos em anos alternados. Assim, o equilíbrio entre a capacidade vegetativa e produtiva da planta é importante para a estabilidade da produção ao longo dos anos (Martinez et al., 2015). Apesar do evento da bienalidade estar associada às características fisiológicas da planta, que necessita vegetar em um ano para produzir bem no ano seguinte (Rena e Maestri, 1985), existe uma alta relação, segundo Matiello et al. (2016), entre o manejo nutricional e a bienalidade do café, já que, em anos de alta produção, o cafeeiro sofre um esgotamento devido ao elevado metabolismo para garantir todo o potencial produtivo. A bienalidade é comumente atribuída à diminuição das reservas das plantas em anos com altas produtividades, o que faz com que, em virtude do menor crescimento dos ramos plagiotrópicos, a produção no ano seguinte seja baixa (DaMatta et al., 2007). Em decorrência da alternância anual de grande e pequena produção, a planta de café extrai e exporta quantidades variáveis de nutrientes do solo de um ano para outro (Silva et al., 2001). Assim, o emprego de boas práticas de manejo, visando suprimento nutricional adequado, pode reduzir o efeito da bienalidade, levando as plantas a apresentarem uma produção menos oscilante entre anos alternados (Valadares et al., 2013).

A busca por conhecimentos sobre o padrão de crescimento da planta é relevante para um manejo adequado, pois esta característica está diretamente vinculada à produção (Dubberstein et al., 2017). As condições favoráveis ao crescimento do cafeeiro são, normalmente, também vantajosas para uma maior produtividade (Matiello et al., 2016). As características vegetativas e produtivas do cafeeiro definem a capacidade da planta em produzir frutos e a produtividade é a sua principal característica, que resulta da quantidade de frutos produzida em cada planta, associada a um número adequado de plantas por área. Essa produtividade está relacionada aos fatores ambientais de solo e clima, ao fator genético e aos tratos culturais adotados na lavoura (Matiello et al., 2016).

### 2.2.2 Fertilidade do solo

A cafeicultura brasileira está implantada, em sua grande maioria, em solos de baixa fertilidade, com predominância de acidez elevada, altos teores de alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ), baixos teores de matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio e potássio, baixa disponibilidade de micronutrientes e baixo índice de saturação por bases (Matiello et al., 2016), a exemplo dos Latossolos. Esses solos apresentam avançado estágio de intemperização e são, de maneira geral, muito profundos, fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou alumínicos, e têm baixa capacidade de troca de cátions (CTC) da fração argila (EMBRAPA, 2013). Nessas condições, a fertilidade deve ser reconstituída para o bom desenvolvimento e produtividade dos cafeeiros (Matiello et al., 2016). O café depende, portanto, das condições químicas do solo, determinadas pela acidez e fertilidade, para seu crescimento e produção (Botelho et al., 2010).

O solo, através de suas características físicas, químicas e biológicas, deve fornecer suporte adequado ao cafeeiro, influenciando diretamente sobre o volume e a profundidade das raízes e condicionando o desenvolvimento e a produção na parte aérea da planta (Matiello et al., 2016). O cafeeiro necessita de solos que permitam boa expansão em volume e profundidade de seu sistema radicular e que ofereçam condições hídricas e nutricionais equilibradas (Martinez e Neves, 2015). O solo, como um componente fundamental da produção, pode imprimir, em níveis variáveis, dependendo de suas características, facilidades ou dificuldades no sentido da obtenção de produtividades compatíveis com os níveis de investimento na cafeicultura (Botelho et al., 2010).

Dessa maneira, as características dos solos devem ser bem conhecidas, de forma a permitir que se retire o máximo proveito dos seus parâmetros favoráveis ou se contorne da melhor maneira aqueles que podem atribuir limitações à produtividade (Botelho et al., 2010). A presença de nutrientes, bem como seu bom uso e manejo, são aspectos fundamentais que garantem a boa qualidade dos solos (Lopes e Guilherme, 2007). A fertilidade do solo em uso agrícola constitui-se num dos fatores de maior importância para que a planta expresse seu potencial máximo de produtividade (Cogo et al., 2003). Dentre os fatores, o manejo inadequado da fertilidade do solo é um dos principais causadores da baixa produtividade do cafeeiro (Guimarães e Reis, 2010).

A produção agrícola, em busca de produtividade crescente, exige o uso de corretivos e fertilizantes em quantidades adequadas, de forma a atender critérios

racionais, que permitam conciliar o resultado econômico positivo com a preservação dos recursos naturais do solo e do meio ambiente natural e isso não pode ser conseguido com a adoção de práticas de manejo generalizadas, ignorando as particularidades dos solos de diferentes locais (Raij, 2011). O suprimento adequado de nutrientes ao cafeeiro é essencial para obtenção de alta produtividade (Clemente et al., 2013) e os desafios da cafeicultura voltam-se, agora, para a construção da fertilidade do solo sob todos os aspectos da sustentabilidade, com o uso racional de corretivos e fertilizantes (Guimarães e Reis, 2010). O uso racional desses insumos é de suma importância para a manutenção da cafeicultura sustentável, economicamente rentável e ambientalmente correta (Guimarães e Reis, 2010). Tanto a correção e a fertilização dos solos, quanto a utilização de técnicas adequadas de manejo, são essenciais para a obtenção de boas produtividades (Amaral et al., 2011a).

A avaliação da fertilidade do solo envolve, em síntese, processos de amostragem, métodos de análise, técnicas de diagnóstico dos resultados e modelos de interpretação e de recomendação de corretivos e fertilizantes (Cantarutti et al., 2007). A análise de solo é uma ferramenta consagrada, porém, há necessidade de se empregá-la adequadamente para se conhecer os fatores que a limitam e permitir a adoção de programas de calagem e adubação mais adequados (Rozane et al., 2011).

A amostragem do solo é a primeira e principal etapa de um programa de avaliação da fertilidade do solo, pois é com base na análise química da amostra do solo que se realiza a interpretação e que se definem as doses de corretivos e de adubos (Cantarutti et al., 1999). Essa recomendação de insumos requer conhecimentos técnicos indispensáveis, tais como: o diagnóstico das deficiências, a avaliação da fertilidade do solo, a análise da demanda de macro e micronutrientes pelo cafeeiro, além do exame criterioso do potencial atual e metas desejadas de produtividade em cada talhão ou lavoura (Matiello et al., 2016).

### **2.2.3 Exigências nutricionais**

O cafeeiro arábica apresenta elevada demanda por nutrientes (Martinez e Neves, 2015). Dessa maneira, a nutrição mineral constitui um dos requisitos mais importantes para que o cafeeiro possa expressar o seu potencial produtivo (Guerra et al., 2007). Entretanto, a demanda de nutrientes pelo cafeeiro não varia apenas em virtude da produção, pois quando a frutificação é baixa, o crescimento de ramos plagiotrópicos, a

formação de folhas e ramos novos substituem o fruto como dreno de carboidratos e nutrientes (Malavolta et al., 2002). Assim, o conhecimento da exigência em nutrientes por parte da planta tem importância fundamental para definir a correta adubação e permitir que se obtenham produtividades máximas e econômicas (Guimarães e Reis, 2010).

Um dos aspectos importantes em estudos de nutrição mineral do cafeeiro relaciona-se, portanto, com a absorção e acumulação de elementos requeridos pelos diferentes órgãos de plantas em cada um dos estádios fenológicos da cultura (Khalajabadi e Jiménez, 2015). É importante ressaltar também que o conhecimento dos teores de nutrientes em vários órgãos do vegetal permite inferir sobre as exigências metabólicas desenvolvidas em cada compartimento, fornecendo base para o entendimento dessas variações e suas implicações nas respostas dos vegetais (Amaral et al., 2011b).

O cafeeiro, na primeira fase de desenvolvimento, destina a maior parte dos nutrientes absorvidos à sua formação, isto é, ao crescimento das raízes, tronco, ramos e folhas. Depois que a planta atinge certo grau de desenvolvimento e inicia o fenômeno da frutificação, esta também passa a consumir uma parte dos nutrientes absorvidos. Entre os 2,5 e os 3,5 anos de idade, as exigências nutricionais de macronutrientes do cafeeiro aumentam bastante, devido ao início da produção de grãos. Nessa fase, o cafeeiro extrai grandes quantidades de N e K, em ordem decrescente de exigência: N>K>Ca>Mg>S>P (Guimarães e Reis, 2010). Em relação aos micronutrientes, alguns estudos envolvendo sua importância nutricional em cafeeiros já foram realizados no Brasil (Carmo et al., 2012; Ferreira et al., 2013; Poltronieri et al., 2016). Os principais micronutrientes requeridos pelo cafeeiro são: B, Cu, Fe, Mn e Zn, os quais, apesar de requeridos em pequenas quantidades, são de grande importância para o crescimento, desenvolvimento e produção (Laviola et al., 2007b). Nos frutos, a tendência na acumulação de micronutrientes se apresenta na seguinte ordem: Mn>Fe>B>Cu>Zn (Khalajabadi e Jiménez, 2015). Segundo Martinez e Neves (2015), carências de macronutrientes são mais comuns em lavouras de produtividade média e baixa, enquanto que problemas com micronutrientes estão presentes em uma ampla faixa de produtividade.

Quando o cafeeiro se encontra em pleno regime de produção, a maior porcentagem dos nutrientes absorvidos é destinada à frutificação e outra parte é consumida na formação de ramos e folhas novas (Guimarães e Reis, 2010). O cafeeiro



tem, portanto, como característica uma grande exportação de nutrientes da área (Farnezi et al., 2009), principalmente através dos frutos (Martinez e Neves, 2015). Pesquisas pioneiras demonstraram que, aos cinco anos de cultivo, o cafeeiro exporta, através da colheita, em relação ao conteúdo total da planta: 45% de N; 56% de P; 62% de K (Cietto et al., 1991a); 25% de Ca; 32% de Mg; 37% de S (Cietto et al., 1991b); 30% de B; 46% de Cu; 26% de Fe; 14% de Mn e 25% de Zn (Cietto e Haag, 1989). Parecido (2020) constatou que a demanda de nutrientes pelos frutos de café foi na seguinte ordem: K>N>Ca>Mg>P>S>Fe>Mn>B>Cu>Zn. A maior parte da acumulação de macronutrientes no cafeeiro ocorre na expansão, formação de grãos e estágio de maturação dos frutos (Dubberstein et al., 2016). Segundo Laviola et al. (2007a), o acúmulo de Ca, Mg e S, em frutos de café, é maior no estágio granação-maturação.

A elevada quantidade de nutrientes extraídos pelo cafeeiro gera cada vez mais a necessidade de aplicação de adubos e corretivos por parte dos produtores, a fim de maximizar sua produção, além de obter outros benefícios proporcionados pela adequada nutrição das plantas, como o aumento da qualidade do café e a resistência a pragas e doenças (Corrêa et al., 2001). Para que a produção agrícola seja uma atividade sustentável, é necessário que os nutrientes removidos do solo sejam repostos por meio da aplicação de fertilizantes e estes alcancem elevados índices de aproveitamento (Cunha et al., 2010). Pesquisas com adubação do cafeeiro têm apresentado diferentes efeitos na fertilidade do solo, no estado nutricional das plantas e na produtividade das lavouras (Guimarães et al., 2002).

A quantidade de nutrientes a ser aplicada depende da idade da lavoura, do teor de elementos no solo e da produtividade esperada para o ano seguinte (Lopes, 1998). Seu fornecimento deve coincidir com o período de maior demanda de nutrientes para garantir o crescimento vegetativo e a frutificação do cafeeiro (Laviola et al., 2006; 2008). Assim, para o estabelecimento de um programa apropriado de adubação, é necessário identificar os principais problemas inerentes à nutrição da planta e, posteriormente, determinar quais os nutrientes são limitantes, suas quantidades, épocas e formas de aplicação corretas (Martinez et al., 2003).

A diagnose nutricional de plantas pode ser realizada por meio da avaliação dos resultados da análise química foliar e sua premissa é a existência de relação significativa entre o suprimento de nutrientes e os níveis dos elementos nas folhas, o que, por sua vez, estaria associado com as produções (Raij, 2011). Segundo Matiello et al. (2016), a análise foliar é um instrumento útil para indicar o estado nutricional das plantas e,

sempre que possível, deve ser correlacionada com os resultados da análise de solo. Sousa et al. (2018) demonstraram a importância da utilização da análise foliar como ferramenta de avaliação do estado nutricional da cultura do café, uma vez que a técnica está de acordo com os princípios teóricos que a fundamentam.

O uso da análise dos tecidos foliares é justificável para diagnose da planta porque as folhas são os órgãos que melhor refletem o estado nutricional e refletem as ações do suprimento de nutrientes existentes no solo ou incorporados com adubação (Malavolta et al., 1997). Assim, para o estabelecimento de um programa apropriado de adubação do cafeeiro, é necessário identificar os principais problemas inerentes à nutrição da planta (Martinez et al., 2003), visto que a deficiência nutricional nas lavouras cafeeiras pode ter grande impacto sobre a produtividade e seus custos de produção (Amaral et al., 2011a). A tendência moderna em propriedades agrícolas organizadas, que planejam corretamente as práticas de correção e adubação, é a utilização da análise de solo e da análise foliar como técnicas de direcionamento dessas práticas de manejo (Raij, 2011).

### **2.3 Cafeicultura de precisão**

A agricultura de precisão, no contexto da cafeicultura, vem sendo denominada de “Cafeicultura de Precisão”, e pode ser definida como o conjunto de técnicas e tecnologias capazes de analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta (Ferraz et al., 2012c). Constitui, portanto, uma importante ferramenta para melhorar o gerenciamento da produção cafeeira, mostrando que o conhecimento de determinadas características do solo, associado à resposta de produtividade da planta, pode facilitar a aplicação localizada e racional de insumos, com resultados ambientais e econômicos positivos (Ferraz et al., 2012a). A agricultura de precisão utiliza os insumos de forma mais eficiente do que a agricultura convencional (Caon e Genú, 2013). O elevado preço dos corretivos e fertilizantes também exige que as práticas de manejo da lavoura cafeeira sejam realizadas de forma mais eficiente para que ocorra sua máxima otimização (Effgen et al., 2008).

No âmbito da agricultura de precisão, o uso da geoestatística é importante para análise de dados (Ferraz et al., 2017b) e seu objetivo, aplicado à agricultura de precisão, é caracterizar a magnitude da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas e fazer mapas, utilizando o princípio da variabilidade espacial (Vieira, 2000), a fim de se

identificar inter-relações desses atributos no espaço e no tempo (Nascimento et al., 2014). A hipótese básica da geoestatística é a de que a diferença entre os valores de determinado atributo em dois pontos no espaço é menor que a diferença entre os valores do mesmo atributo obtidos em dois pontos mais distantes entre si (Alves e Silva, 2013). Almeida e Guimarães (2016) citaram que a geoestatística constitui uma ferramenta imprescindível para descrever o comportamento dos atributos avaliados na área. Assim, o uso da geoestatística na cafeicultura de precisão ganha destaque, pois pode contribuir com o produtor de café na identificação da variabilidade espacial dos fatores produtivos, possibilitando o melhor gerenciamento de sua lavoura (Ferraz et al., 2012c).

A teoria da geoestatística é baseada na observação de que a variabilidade espacial de uma determinada variável apresenta uma estrutura que pode ser modelada (Journel e Huijbregts, 2003). Para tanto, o semivariograma é a principal ferramenta utilizada para analisar o grau de dependência espacial entre as variáveis analisadas dentro de um campo experimental, definindo parâmetros necessários para a estimação de valores em locais não amostrados, pela técnica de krigagem. Esta consiste num método de interpolação que utiliza a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo (Figueiredo, 2016), fazendo com que estas estimativas se tornem mais confiáveis, o que permite a confecção de mapas temáticos mais próximos da realidade (Ferraz, 2012). Segundo Grego et al. (2014), o método da krigagem estima valores desconhecidos utilizando os semivariogramas, que são os modelos da variação dos dados em função da distância. Uma adequada descrição da dependência espacial é fundamental para revelar tanto o grau ou a magnitude da continuidade espacial de um atributo em estudos de variabilidade espacial, quanto o seu modo de variação, ou seja, sua estrutura (Seidel e Oliveira, 2014). Ainda, segundo estes autores, a partir dos parâmetros estimados do modelo teórico ajustado ao semivariograma experimental, é possível construir uma medida dessa dependência espacial. O modelo de ajuste do semivariograma mais utilizado em estudos geoestatísticos na cafeicultura é o esférico (Ferraz et al., 2017b).

Com a cafeicultura de precisão é possível, então, a criação de mapas temáticos que direcionem as práticas de manejo (Carvalho et al., 2017a). O reconhecimento de padrões em propriedades do solo e da planta é a etapa inicial para a divisão das lavouras em zonas de manejo (Santos et al., 2003). Carvalho (2016) comprovou a importância da cafeicultura de precisão no gerenciamento da lavoura, uma vez que ela permitiu identificar locais que apresentam condições limitantes ao desenvolvimento das plantas e

que necessitam de operações de manejo de solo e planta. Ferraz et al. (2017b) verificaram que os mapas de enfolhamento, altura de planta e diâmetro de copa do cafeeiro arábica podem ser utilizados na identificação de distorções no desenvolvimento da planta. Jacintho et al. (2017) verificaram que há correlação dos atributos do solo e das características agronômicas das plantas, sendo propício à geração de mapas temáticos e definição de zonas de manejo capazes de auxiliar os cafeicultores no uso racional dos recursos e insumos na cultura. Segundo Carvalho (2016), os mapas de produtividade podem ser utilizados como primeiro passo na identificação de locais em que há limitação para o desenvolvimento da lavoura, quando comparados com mapas de variáveis do sistema solo-planta. Ferraz (2012) considera que os mapas podem ainda ser utilizados no gerenciamento da colheita, tanto manual, quanto mecanizada ou semimecanizada.

A literatura científica demonstra que pesquisas com agricultura de precisão na cultura do cafeeiro têm sido feitas com a finalidade de avaliar a dependência espacial de atributos físicos do solo (Carvalho et al., 2013; Silva e Lima, 2013; Andrade et al., 2018;), atributos químicos do solo (Almeida e Guimarães, 2017a; Silva et al., 2010a), atributos fitotécnicos das plantas (Ferraz et al., 2017b), uso de fertilizantes à taxa variável (Barros et al., 2015; 2016), produtividade (Sanchez et al., 2005; Silva et al., 2008; Molin et al., 2009; Rodriguez-Garay et al., 2016), maturação e desprendimento de frutos (Figueiredo et al., 2017), além de estudos relacionados aos aspectos fitossanitários do cafeeiro (Almeida e Guimarães, 2017b; Costa et al., 2015; Lima, 2009; Alves, 2008).

A evolução da cultura do café arábica no Brasil dependerá, em grande parte, de mais pesquisas a serem realizadas com a cafeicultura de precisão. Certamente, tais pesquisas são favorecidas pela importância da economia cafeeira para o país, bem como pelo elevado valor econômico e investimento tecnológico na cultura pelos cafeicultores brasileiros. A utilização da cafeicultura de precisão no manejo do solo e da planta é importante para otimizar as operações de campo, de forma a garantir o bom desenvolvimento da cultura (Ferraz, 2012).

### **2.3.1 Variabilidade espacial de atributos químicos do solo na cafeicultura**

O conhecimento da variabilidade de atributos químicos é importante para o manejo do solo, planejamento de esquemas de amostragem e gerenciamento de práticas

agrícolas (Silva et al., 2010a). O manejo convencional da fertilidade do solo baseia-se na utilização de teores médios de referência dos nutrientes para o cálculo da dose de fertilizante a ser aplicada em glebas selecionadas e separadas, por serem as mais homogêneas entre si (Vieira et al., 2010). Entretanto, as características do solo cultivado variam no espaço (distância e profundidade) e no tempo (Alves et al., 2006).

Considerando a existência da variabilidade espacial dos atributos do solo, o conhecimento da mesma são de grande importância e devem ser incorporados no planejamento do manejo das culturas, tratando o solo de maneira diferenciada em cada porção do terreno, em busca do aumento da eficiência de produção, uniformidade e máxima exploração do potencial produtivo (Ragagnin et al., 2010). A variabilidade espacial de atributos deve ser considerada no planejamento agrícola, no intuito melhor favorecer as aplicações de fertilizantes, aumentando a produtividade e diminuindo custos e problemas ambientais (Marques Júnior et al., 2008).

A recomendação de corretivos e fertilizantes à taxa variada, por meio do mapeamento das áreas com uso de ferramentas geoestatísticas, permite o aumento da produtividade das culturas, melhorando a eficiência do manejo do solo, além de promover uma economia na quantidade de insumos aplicados (Carneiro et al., 2017). Molin et al. (2010) observaram que a aplicação de fertilizantes em taxas variáveis em área cultivada com a cultura do café proporcionou produtividade superior em 34%, quando comparada àquela onde foram aplicadas doses em taxa fixa. Ferraz et al. (2011) verificaram que adubações em lavouras de café baseadas na tecnologia da agricultura de precisão foram economicamente mais vantajosas do que o modo convencional de adubação, principalmente em áreas maiores. Portanto, o conhecimento de determinados atributos do solo, associado à resposta de produção do cafeeiro, pode possibilitar a aplicação racional, localizada e individualizada dos insumos, com resultados econômicos ambientais garantidos (Silva et al., 2007).

As aplicações convencionais de fertilizantes, atualmente realizadas pelos agricultores, implicam em aplicações excessivas em determinadas áreas do campo e insuficientes em outras (Silva et al., 2007). Ferraz (2012) constatou que a recomendação de  $P_2O_5$ , baseada em amostragem em malha, foi reduzida em 25,7%, quando comparada à amostragem convencional. Já para  $K_2O$ , a amostragem em malha levou à recomendação de dose média 11,6% maior que amostragem utilizada convencionalmente pelos cafeicultores. A aplicação de corretivos e fertilizantes utilizando-se taxas variáveis, em regiões específicas no solo, possibilita minimizar os

custos de produção e melhorar a eficiência do uso dos insumos agrícolas em lavouras cafeeiras (Ferraz et al., 2011; Barros et al., 2015).

### **2.3.2 Variabilidade espacial de atributos fitotécnicos do cafeeiro arábica**

O uso mais comum da cafeicultura de precisão é no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, porém, essa técnica pode ser aplicada também para atributos da planta, de forma a possibilitar o gerenciamento mais preciso do processo de acompanhamento de seu desenvolvimento (Ferraz et al., 2017c). A busca por conhecimentos sobre o padrão de crescimento da planta é relevante para um manejo adequado, pois esta característica está diretamente vinculada à produção (Dubberstein et al., 2017). Ferraz et al. (2017b) constataram que a análise de dados de altura de planta, diâmetro de copa, enfolhamento, produtividade e índice de maturação, dentre outros, por meio das técnicas estatísticas e da geoestatística, possibilitaram caracterizar a variabilidade espacial dos atributos das plantas de café em estudo, permitindo o mapeamento dessas variáveis.

Em relação à nutrição mineral, a agricultura de precisão se torna importante para a caracterização e a descrição da variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade das culturas, visando à correlação desses dados para auxiliar o manejo da adubação, sobretudo no que se refere à aplicação localizada e em taxas variáveis de fertilizantes (Vieira et al., 2010). Uma prática que vem se tornando comum por produtores rurais é o monitoramento do estado nutricional foliar das lavouras cafeeiras, visando recomendações balanceadas e econômicas (Carvalho et al., 2017b). Pesquisa feita por Silva et al. (2013) revelou que a análise espacial permitiu a avaliação do estado nutricional dos cafeeiros, considerando a variabilidade que existe no campo. Assim, determinar o estado nutricional das plantas traz diversas contribuições à cafeicultura, principalmente quando esse estado é avaliado, considerando-se a variação espacial existente nos campos de produção (Silva e Lima, 2012). O mapeamento do estado nutricional de plantas possibilita visualizar diferentes regiões em uma área de cultivo, proporcionando aos cafeicultores critérios diferenciados na aplicação de adubos via foliar e via solo (Oliveira et al., 2010).

No tocante à produtividade do cafeeiro, estudos realizados por Leal (2002) e Oliveira (2003) constataram a existência de variabilidade espacial nas lavouras. Segundo Alves et al. (2009), as análises espaciais de produtividade tendem a possibilitar

o gerenciamento mais eficiente do processo produtivo. Além da produtividade, outros parâmetros ligados à planta de café, que devem ter a variabilidade espacial conhecida, são os estádios de maturação dos frutos (Santinato, 2016), visto que o rendimento da colheita é influenciado por este grau de maturação. Segundo Ferraz (2012), o estudo da variabilidade espacial pode indicar os locais mais propícios a se iniciar a colheita, além de indicar mais precisamente quando iniciar esta operação.

### **2.3.3 Amostragem de solo e planta em cafeicultura de precisão**

O entendimento da variabilidade espacial existente na lavoura cafeeira exige uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragens (Figueiredo, 2016). Ferraz (2012) constatou que o sistema de amostragem de solo convencional, baseados nos teores médios dos atributos químicos, pode conduzir a erros na dosagem de corretivos e fertilizantes, demonstrando que a amostragem georreferenciada é mais eficaz. A escolha de uma rede de amostragem é fundamental, portanto, para o bom desempenho na aplicação de técnicas de agricultura de precisão para a cultura do café (Ferraz et al., 2017a). Segundo Figueiredo et al. (2018), o tamanho da malha a ser utilizada na amostragem é um fator importante no mapeamento de cafezais. Para Ferraz et al. (2017a), a utilização de uma malha com tamanho insatisfatório pode gerar mapas que não refletem a realidade do campo e, assim, podem gerar erros nas recomendações técnicas, o que poderia resultar em perdas aos seus usuários.

A amostragem georreferenciada de solo pode ser realizada basicamente de duas formas, sistemática ou aleatória. Na amostragem sistemática, segue-se um padrão de coleta predefinido, onde os pontos de amostragem são regularmente dispostos sobre a área. Em relação à amostragem aleatória, os pontos amostrais são distribuídos na área sem qualquer sistematização, de modo que não tenham equidistância entre si (Cherubin et al., 2016). No Brasil, a amostragem sistemática com malhas regulares, para caracterizar a variabilidade dos atributos químicos do solo, é a forma mais difundida e utilizada nas áreas manejadas com agricultura de precisão (Cherubin et al., 2015), servindo para o mapeamento das propriedades do solo e a aplicação de corretivos e fertilizantes em taxas variáveis (Bernardi e Inamasu, 2014). Assim, a partir da análise da variabilidade espacial, por meio da amostragem de solo georreferenciada, tomam-se as decisões necessárias para que se possa prescrever operações e aplicações dos insumos

em dosagens prescritas e de forma localizada (Molin, 2010). Desse modo, as amostras de solo devem representar, com exatidão, a área que será corrigida e, ou, adubada, de forma que o processo de nutrição das plantas seja o mais eficiente e econômico possível (Alvarez e Guarçoni, 2003).

A grade de amostragem é fundamental para a avaliação da variabilidade espacial dos atributos dos solos e para estabelecer um programa de recomendação de correção e adubação do solo, utilizando as ferramentas de agricultura de precisão (Bernardi et al., 2015). De acordo com Nanni et al. (2011), a malha de amostragem utilizada nas mais diversas culturas é em torno de um ponto a cada dois a três hectares e, em algumas culturas, até um ponto é usado a cada quatro hectares. Segundo Caon e Genú (2013), a densidade de uma amostra por hectare é a mais recomendada na elaboração de mapas de atributos químicos do solo.

Em relação à cultura do café, poucos estudos se referenciam ao tamanho da grade amostral ideal, havendo, assim, grande necessidade de mais pesquisas com essa finalidade. A literatura apresenta estudos que verificaram que a aplicação da metodologia de dois pontos por hectare foi a mais recomendada, possibilitando, assim, observar a ocorrência da variabilidade espacial de alguns atributos químicos do solo, da folha e produtividade do cafeeiro (Carvalho et al., 2017a; Carvalho 2017b; Ferraz et al., 2017; Figueiredo et al., 2018). Melo et al. (2017) consideraram a mesma malha amostral na determinação da produtividade por planta e para os atributo de solo. Porém, Ferraz (2012) constatou que as malhas de um ou dois pontos por hectare pode conduzir a grandes erros na avaliação dos atributos de solo e considerou que mais pontos amostrais a cada hectare é indicado para análise da variabilidade espacial. Nanni et al. (2011) reforçaram que é necessário a utilização de mais pontos amostrais por hectare.

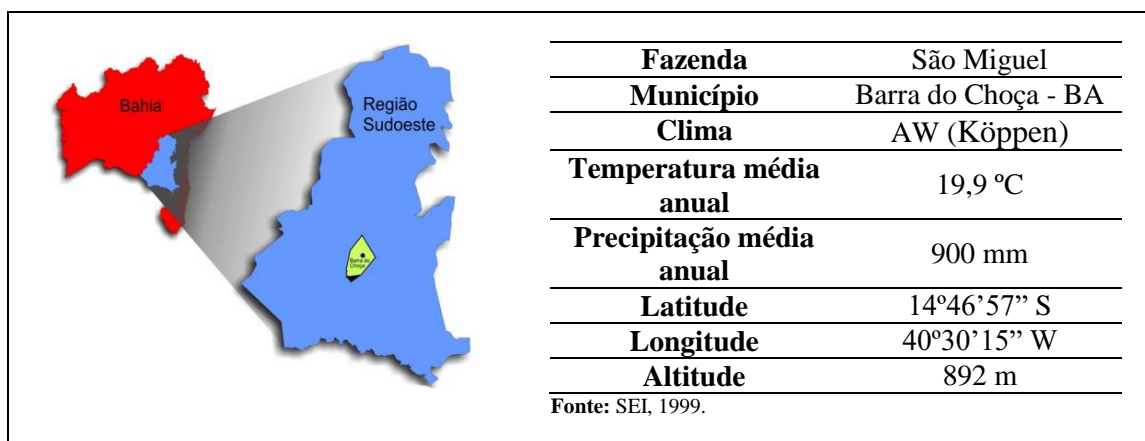
A amostragem georreferenciada de solo e plantas na cafeicultura ainda necessita de melhores definições, especialmente quanto à dimensão da malha ou densidade amostral, que sejam capazes de demonstrar a variabilidade dos atributos avaliados e definir zonas de manejo que permitam o gerenciamento localizado da cultura (Guarçoni et al., 2017). Ferraz (2012) informou também que não existem trabalhos científicos que apresentaram ou desenvolveram uma metodologia capaz de comparar diferentes malhas amostrais na cafeicultura de precisão. Este autor propôs, em seu trabalho, a definição de um indicador de malha amostral ótimo para melhor representar os dados dos atributos de solo e planta testados, em função da amostragem realizada, e contribuir, assim, com informações mais confiáveis à cafeicultura de precisão.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização da área experimental

O experimento foi desenvolvido na Fazenda São Miguel, localizada no município de Barra do Choça, região cafeeira do planalto de Vitória da Conquista, estado da Bahia. O mapa de localização do município de Barra do Choça e os dados geoclimáticos e georreferenciados da referida fazenda estão apresentados na Figura 1.



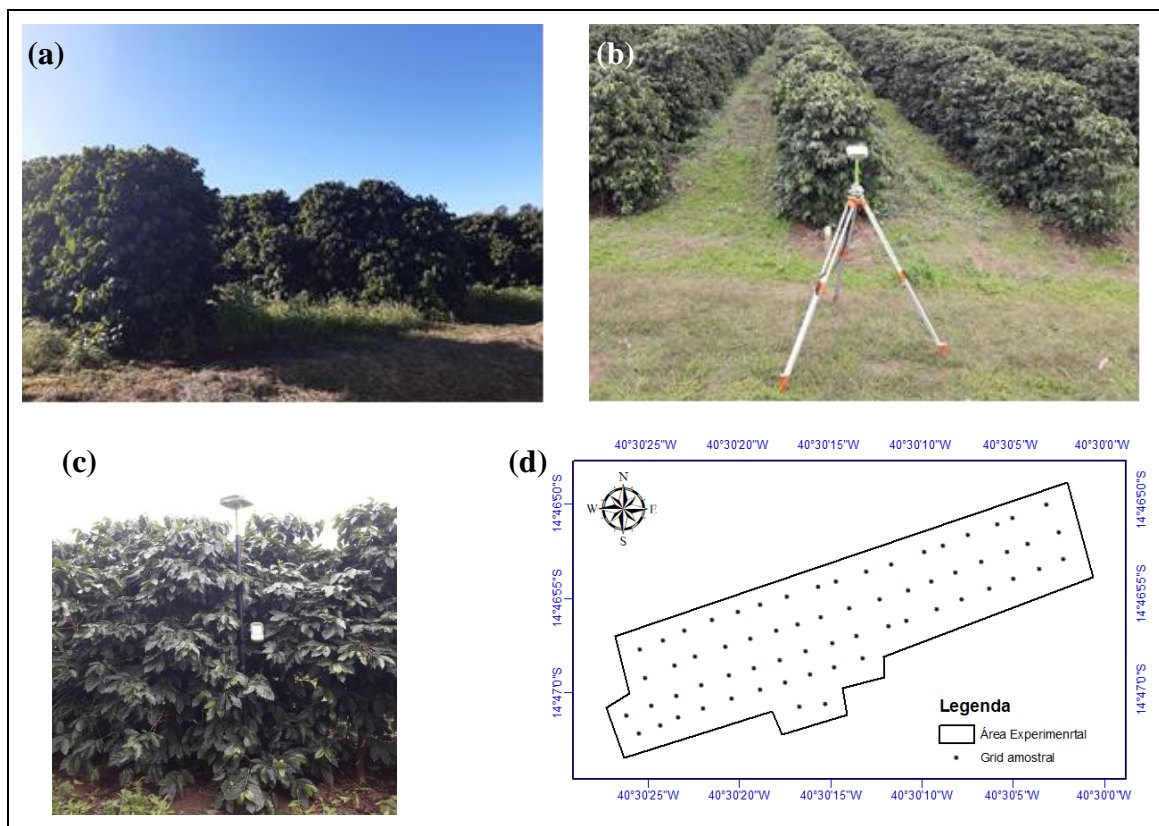
**Figura 1.** Mapa de localização do município de Barra do Choça-BA e dados geoclimáticos e georreferenciados da Fazenda São Miguel.

A área da lavoura estudada é de aproximadamente 12,6 hectares, implantada no ano de 2013, com cafeeiro arábica cv. Catuai Vermelho IAC 144, no espaçamento de 3,8 m entre fileiras e 0,7 m entre plantas, totalizando 3.760 plantas ha<sup>-1</sup>, sob regime de sequeiro e cultivado a pleno sol. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Amarelo distrófico, segundo a classificação da Embrapa (2013), com a camada de 0-20 de classe textural argilo-arenosa (450 g kg<sup>-1</sup> de argila) e a camada de 20-40 cm argilosa (540 g kg<sup>-1</sup> de argila). O relevo é plano com suave declividade. O manejo de implantação adotado nesta lavoura considerou a utilização da prática de calagem em área total na dosagem de 3,0 t ha<sup>-1</sup> incorporado à camada arável do solo. No ano de 2015, foi realizada a gessagem com aplicação superficial na linha de cultivo do cafeeiro, sob a projeção da copa das plantas, na dosagem de 2,0 t ha<sup>-1</sup>. As práticas de adubação nas safras 2018/2019 e 2019/2020 foram igualmente realizadas, considerando as análises de solo feitas na ocasião, com amostragem baseada na forma tradicional da área de cultivo e atendendo à demanda produtiva da lavoura. Foram aplicados fertilizantes nitrogenados e potássicos, em doses parceladas, utilizando as fontes de

ureia (45% N) e cloreto de potássio (60%  $K_2O$ ), respectivamente, e adubo fosfatado, em única aplicação, utilizando o fertilizante superfosfato simples granulado (18%  $P_2O_5$ ). Foi utilizado também o resíduo orgânico curtido “cama de frango” como fonte de matéria orgânica, sob a projeção da copa das plantas, na dosagem de  $2,5 \text{ kg planta}^{-1}$ . E, uma vez ao ano, aplicou-se (fase de expansão dos frutos de café) fertilizante foliar contendo micronutrientes. Os demais tratos culturais (desbrota, capina das entrelinhas e pulverizações com defensivos agrícolas) foram realizados de acordo com a necessidade de manejo da lavoura.

### 3.2 Georreferenciamento dos pontos amostrais

A área experimental foi demarcada com base nas coordenadas geográficas obtidas pelo receptor GNSS – *Global Navigation Satellite System* – geodésico, marca-modelo *Javad Triumph 1* (com erro médio de posicionamento de 5mm), sendo os pontos georreferenciados e localizados na linha de cultivo dos cafeeiros e espaçados numa malha regular de  $45 \times 45 \text{ m}$ , totalizando 64 pontos amostrais (Figura 2).



**Figura 2.** Detalhamento da área experimental na Fazenda São Miguel: (a) aspecto vegetativo da lavoura cafeeira; (b) receptor GNSS geodésico; (c) local de demarcação de ponto amostral; e (d) mapa da área experimental com os pontos amostrais georreferenciados.

Os pontos amostrais foram identificados com estacas de madeira devidamente enumeradas. Em cada ponto, foram demarcadas 10 (dez) plantas de café sequencialmente, as quais foram referendadas para todas as amostragens de solo e foliar, bem como para todas as mensurações fitotécnicas realizadas durante o experimento. A figura 3 ilustra etapas de amostragens de solo e folhas, bem como de aspectos relacionados à colheita na área experimental.



**Figura 3.** Ilustração das etapas de: (a) coleta manual de solo utilizando trado holandês; (b) coleta de folhas do cafeeiro; (c) colheita de frutos de café; e (d) avaliação do grau de maturação dos frutos de café.

### 3.3 Amostragem e análise química de solo cultivado com cafeeiro arábica

A coleta de solo para análise química foi realizada em agosto/2019, após findar a colheita, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, sob a projeção da copa das 10 plantas de café correspondentes ao ponto amostral, em ambos os lados, utilizando equipamento manual trado holandês. Dessa forma, foram coletadas um total de 20 amostras simples, que constituíram a amostra composta representativa do ponto

amostral, as quais foram encaminhadas ao Laboratório de Química do Solo da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, onde foram realizadas análises químicas dos parâmetros: pH em água, alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), hidrogênio + alumínio (H+Al), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) trocáveis, potássio ( $\text{K}^+$ ) e fósforo (P) disponíveis, e calculados os índices de soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC total (T), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%), segundo metodologia da EMBRAPA (1997).

O pH em água foi obtido mediante utilização de peagâmetro imerso em suspensão solo/água, na proporção de 1:2,5, sendo a leitura realizada diretamente no aparelho. O teor de  $\text{Al}^{3+}$  do solo foi obtido através da extração com KCl 1 N e titulação com NaOH 0,025 N, sendo o teor de  $\text{Al}^{3+}$ , expresso em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , equivalente ao volume gasto na titulação. Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  do solo foram obtidos mediante extração com KCl 1 N e titulação com EDTA 0,025 N, sendo os resultados expressos em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . O teor de P disponível foi determinado mediante extração com Mehlich-1 (HCl 0,05 N +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 N) e leitura em fotocolorímetro, sendo o resultado expresso em  $\text{mg}/\text{dm}^3$ . O teor de  $\text{K}^+$  disponível foi determinado mediante extração com Mehlich-1 e leitura em fotômetro de chamas, sendo o resultado expresso em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . A acidez potencial (H+Al) foi obtida pelo método SMP (Shoemaker, Mclean & Pratt), sendo o resultado expresso em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . A soma de bases trocáveis foi determinada a partir da seguinte equação:  $\text{SB} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)$ , sendo o resultado expresso em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . O cálculo da capacidade de troca catiônica efetiva foi determinado a partir da seguinte equação:  $t = \text{SB} + \text{Al}^{3+}$ , sendo o resultado expresso em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . O cálculo da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 foi determinado a partir da seguinte equação:  $T = \text{SB} + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ , sendo o resultado expresso em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . A saturação por bases trocáveis foi determinada a partir da seguinte equação:  $V = \text{SB} \times 100 / T$ , sendo o resultado expresso em porcentagem (%). A saturação por alumínio foi determinada a partir da seguinte equação:  $m = \text{Al}^{3+} \times 100 / t$ , sendo o resultado expresso em porcentagem (%) (EMBRAPA, 1997). Os resultados dos atributos químicos do solo foram interpretados segundo proposta de Alvarez V. et al. (1999) (ANEXO).

### **3.4 Amostragem e análise química foliar do cafeeiro arábica**

A coleta de tecido foliar para análise química nutricional do cafeeiro arábica foi realizada coletando-se uma amostra constituída de um par de folhas indicadoras,

compostas pelo 3º ou 4º nó a partir da ponta de ramos laterais produtivos, nos dois lados do renque do cultivo, na porção mediana do cafeeiro, conforme Malavolta (2006), nas 10 plantas úteis de cada ponto georreferenciado, totalizando, portanto, 40 folhas por unidade amostral. A coleta de folhas para análise dos teores dos nutrientes foi realizada em março/2019, no estágio fenológico de granação dos frutos.

Após a coleta, as amostras de folhas foram acondicionadas em sacos de papel e posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, *campus* de Vitória da Conquista, onde foram lavadas com água corrente destilada, solução detergente (0,1%), solução ácido clorídrico (0,3%) e água deionizada, e tempo de imersão de aproximadamente 30 segundos. Posteriormente, as amostras de folhas foram secadas em estufa de ventilação forçada de ar a 60-65 °C, por 72 horas. Posteriormente, as folhas foram moídas em moinho tipo Willey, equipado com peneira fina (com malha de 20 mesh ou 0,85 mm) para análise química de macro e micronutrientes.

A análise química das folhas foi realizada no Laboratório de Relação Solo-Planta da Universidade Estadual Paulista – UNESP, *campus* de Botucatu, para determinação dos teores dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S), expressos em g kg<sup>-1</sup>; e dos micronutrientes (Cu, Zn, Fe e Mn), expressos em mg kg<sup>-1</sup>, conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). Os teores de N total das amostras foram determinados pelo método de Kjeldahl. Após digestão nítrico-perclórica, o P foi determinado pelo método colorimétrico em solução de vanadato-molibdato. Os teores de K foram determinados por espectrofotometria de emissão de chama. Os teores de Ca, Mg, Cu, Zn, Fe e Mn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. E os teores de S total, determinados por turbidimetria. Os resultados da análise química foliar foram interpretados conforme Malavolta (2006) (ANEXO).

### **3.5 Amostragem e mensurações vegetativas e produtivas do cafeeiro arábica**

Os atributos vegetativos de altura da planta (ALTU), diâmetro da copa (DCOP), diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) foram mensurados em maio/2019, período antecedente à colheita. Os atributos produtivos de produtividade (PROD) e de índice de maturação (IMAT) foram mensurados em duas safras consecutivas, sendo a primeira colheita realizada em junho/2019 e a segunda colheita em agosto/2020.

A medida de altura da planta foi obtida utilizando-se uma régua graduada, a partir da superfície do solo até o ápice do cafeeiro, utilizando a medida metro (m). A medida de diâmetro da copa também foi obtida com auxílio de régua graduada, a partir das extremidades dos ramos plagiotrópicos das laterais da planta, localizados no terço mediano, com resultados expressos em metro (m). O diâmetro do caule foi mensurado com paquímetro digital numa altura de 10 cm, a partir da superfície do solo, e os resultados apresentados em milímetro (mm). A avaliação do enfolhamento foi realizada com base na escala visual proposta por Boldini (2001), atribuindo-se notas que variaram de acordo com a porcentagem de enfolhamento das plantas, sendo 1 (0 a 20% de enfolhamento); 2 (21 a 40%); 3 (41 a 60%); 4 (61 a 80%) e 5 (81 a 100%). A produtividade do cafeeiro foi obtida através de colheita manual sobre o pano, sendo colhidos todos os frutos das plantas e os resultados expressos em litros por planta ( $L \text{ planta}^{-1}$ ). Após a colheita, foi separada, em cada ponto, uma amostra representativa e homogênea de 1,0 kg de frutos para contabilizar o quantitativo de frutos cereja (índice de maturação), sendo os resultados expressos em porcentagem (%).

### **3.6 Análises estatísticas**

Os dados obtidos foram analisados através de análise estatística descritiva, para avaliar a sua distribuição; e geoestatística, para caracterizar a sua dependência espacial. Na análise estatística descritiva, foram calculados os valores mínimos, máximos, média, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria dos atributos químicos do solo e vegetativos, nutricionais e produtivos do cafeeiro arábica, a fim de caracterizar a distribuição dos dados. Foi realizado também o teste de normalidade Kolmogorov–Smirnov, através do programa computacional IBM SPSS *Statistics*, versão 20. O coeficiente de variação foi interpretado segundo Warrick e Nelson (1980), sendo  $CV < 12\%$ : baixo;  $12\% < CV < 60\%$ : médio; e  $CV > 60\%$ : alto.

A análise geoestatística foi realizada para a caracterização da estrutura e da magnitude da dependência espacial dos atributos químicos do solo e fitotécnicos do cafeeiro. Para tanto, foram realizados os semivariogramas e estimados os coeficientes do modelo teórico, denominados de efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ) e alcance (A), conforme descrito por Bachmaier e Backers (2008). O índice de dependência espacial (IDE) foi avaliado segundo classificação de Cambardella et al. (1994), que considera “forte” os semivariogramas que tem efeito pepita  $< 25\%$  do patamar; “moderado”,



quando está entre 25 e 75%; e “fraco”, quando > 75%. O modelo matemático para semivariogramas, adotado para todos os atributos avaliados, foi o “esférico”, visto que o mesmo é muito utilizado em estudos de variabilidade espacial em lavouras cafeeiras (Ferraz et al., 2017b). A escolha do modelo de semivariograma a ser utilizado é considerado um dos aspectos mais importantes da geoestatística. O semivariograma foi estimado pela seguinte equação:

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

Após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada a krigagem ordinária para possibilitar a interpolação dos dados, a fim de visualizar os padrões de distribuição espacial através de mapas. Utilizou-se para a análise geoestatística e para a confecção dos mapas temáticos o sistema computacional ArcGis 10.7.

Realizou-se a correlação espacial entre os atributos químicos do solo, nutricionais e vegetativos das plantas de café com o desempenho dos atributos produtivos do cafeeiro arábica (produtividade e índice de maturação), em função da densidade amostral. Para tanto, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (r), a 5% de probabilidade pelo teste “t”, para verificar o grau de associação entre os atributos em estudo. A correlação de Pearson pode ser utilizada com quaisquer dados de natureza numérica sem qualquer requerimento relacionado à escala de medida ou ao tipo de distribuição das variáveis (Zimmermann, 2014). Posteriormente, fez-se a classificação dessa correlação, baseada nos seguintes intervalos: 0,0-0,1 (muito baixa); 0,1-0,3 (baixa); 0,3-0,5 (moderada); 0,5-0,7 (alta); 0,7-0,9 (muito alta); e 0,9-1,0 (quase perfeita), segundo a proposta de Hopkins (2000).

### **3.7 Indicador de densidade amostral**

O indicador de qualidade da amostragem para cada atributo avaliado foi determinado através da metodologia proposta por Ferraz (2012), denominado Indicador de Malha Ótima (IMO), sendo o mesmo calculado a partir do Índice de Exatidão (IE), que determina a exatidão entre as densidades amostrais testadas e do Índice de Precisão (IP), que compara a precisão entre as amostragens. O Índice de Exatidão (IE) é calculado pela fórmula  $IE = 1 - |EA|/|mEA|$ , em que EA é o valor, em módulo, do Erro Absoluto e mEA é o maior valor, em módulo, do Erro Absoluto. O Índice de Precisão

(IP) é calculado pela fórmula  $IP = 1 - DP_{EA}/mDP_{EA}$ , em que  $DP_{EA}$  é o valor do Desvio Padrão do Erro Absoluto e  $mDP_{EA}$  é o maior valor do Desvio Padrão do Erro Absoluto. De posse desses dados, foi calculado este indicador, aqui denominado de Indicador de Densidade Amostral (IDA), que leva em consideração a ponderação entre o Índice de Exatidão e o Índice de Precisão, através da seguinte equação:  $IDA = (0,5 \times IE) + (0,5 \times IP)$ . O IDA varia de 0 (zero) a 1 (um), sendo que quanto mais próximo de 1 mais exata e/ou precisa é a malha amostral, e quanto mais próximo de 0 mais inexata e/ou imprecisa é a amostragem. Utilizou-se para os cálculos o programa editor de planilhas Microsoft Excel<sup>®</sup>.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Espacialização e mapeamento dos atributos do solo e do cafeeiro arábica

#### 4.1.1 Atributos químicos do solo cultivado com cafeeiro arábica

Os dados referentes aos atributos químicos do solo, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade, cuja análise estatística descritiva dos mesmos estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os atributos químicos do solo, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	Mín.	Máx.	Méd.	D.P.	CV(%)	Assim.	K	K-S
2 pontos ha <sup>-1</sup>									
pH	H <sub>2</sub> O	5,8	6,9	6,24	0,31	4,97	0,602	0,055	0,158
P	mg dm <sup>-3</sup>	29	143	59,73	30,38	50,86	1,718	2,552	0,143
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,59	2,18	1,29	0,37	28,68	0,184	0,645	0,104
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	4,8	7,0	5,61	0,55	9,80	0,560	0,417	0,123
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,7	3,6	2,53	0,46	18,18	0,082	0,015	0,116
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,0	0,1	0,09	0,03	33,33	3,059	8,085	0,130
H+Al	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,8	6,3	3,80	1,10	28,95	0,770	0,888	0,131
SB	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7,50	12,20	9,47	1,08	11,40	0,521	0,410	0,143
t	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7,60	12,20	9,50	1,07	11,26	0,555	0,351	0,121
T	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	12,00	15,70	13,30	1,02	7,67	0,781	-0,089	0,175
V	%	54	86	71,45	7,40	10,36	-0,431	0,806	0,152
m	%	0	1	0,09	0,29	32,22	3,059	8,085	0,130
5 pontos ha <sup>-1</sup>									
pH	H <sub>2</sub> O	5,8	7,0	6,27	0,30	4,78	0,51	-0,49	0,132
P	mg dm <sup>-3</sup>	29	146	56,36	25,95	46,04	1,637	2,596	0,164
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,59	2,21	1,24	0,32	25,81	0,504	0,580	0,098
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	3,3	7,2	5,57	0,72	12,93	-0,193	0,649	0,072
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,2	3,6	2,48	0,48	19,35	-0,286	0,144	0,076
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,0	0,1	0,01	0,03	30,00	3,22	8,637	0,136
H+Al	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,8	7,8	3,78	1,15	30,42	1,054	2,003	0,151
SB	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	5,6	12,20	9,32	1,21	11,98	-0,006	0,657	0,074
t	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	5,8	12,20	9,34	1,18	11,63	0,064	0,525	0,068
T	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	11,2	15,70	13,13	0,95	7,24	0,141	-0,211	0,061
V	%	41	86	71,10	8,20	11,53	-0,90	2,080	0,110
m	%	0	1	0,08	0,27	37,50	3,22	8,637	0,136

Atb. = atributo; Und. = unidade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Méd. = média; D.P. = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; K = curtose; K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov.

De acordo com os dados obtidos, verifica-se que há variação considerável entre os valores de alguns atributos químicos do solo e também de acordo com a densidade amostral. O conhecimento dos atributos químicos do solo é importante para a recomendação de uso e manejo adequado de corretivos e fertilizantes na lavoura

cafeeira, visto que as ocorrências de variabilidade espacial de alguns desses atributos influenciam diretamente no desempenho vegetativo e produtivo das plantas. Essa análise conduz à interpretação, principalmente, das condições de acidez (ativa, trocável e potencial), da disponibilidade de nutrientes na solução e do complexo sortivo do solo. A área da lavoura foi manejada historicamente de forma convencional, baseada na média dos valores obtidos como sendo a área homogênea, mas a estatística descritiva demonstra haver diferenças de condições de fertilidade do solo.

Considerando as características de acidez do solo, a análise dos dados de pH, Al e sua saturação (m), e H+Al conduziram às interpretações que seguem, conforme a densidade amostral utilizada. O pH é uma das mais importantes determinações em análise da fertilidade do solo, pois sua medida serve como referência e indicador. A acidez ativa (pH) do solo da área experimental apresentou valores mínimos de 5,8 e máximos de 7,0, para ambas as densidades amostrais avaliadas, que são classificados, respectivamente, como “acidez média” e acidez neutra”. O CV dos dados foi considerado “baixo” (4,97 e 4,78%) (Tabela 1). Cherubin et al. (2014) encontraram valores de pH da água apresentando baixa dispersão (CV<15%). Nessas condições, no que diz respeito ao atributo químico pH isoladamente, o mesmo não constitui fator limitante ao desempenho produtivo da lavoura. Pode-se inferir, de maneira geral, que os valores encontrados são possivelmente decorrentes do manejo de correção da acidez pela prática da calagem a que esse solo foi submetido no plantio e ao longo dos anos de cultivo. Normalmente esse atributo atende aos requisitos mínimos para o cultivo do cafeeiro arábica. Segundo Raij (2011), a acidez ativa é avaliada pela medida de pH e tem efeito direto ou indireto sobre a maioria dos nutrientes, afetando sua disponibilidade para as plantas. Guimarães e Reis (2010) informaram que a produtividade de café arábica, em pesquisas feitas no estado do Paraná, estavam diretamente correlacionadas com o pH do solo. Segundo este levantamento, 75% das lavouras altamente produtivas estavam localizadas em solos cujo pH era de 6,0 a 7,1; já os cafezais medianamente produtivos apareciam em solos com pH entre 5,1 e 6,0; e as baixas produções estavam situadas em solo onde o pH era de 4,6 a 5,1.

Os teores de Al trocável apresentaram valores mínimos, médios e máximos classificados como “muito baixo”, nas duas densidades amostrais avaliadas no experimento (Tabela 1). Fato semelhante foi constatado para a saturação por alumínio (m), que corresponde à fração da CTC efetiva (t) ocupada pelo Al trocável. Evidencia-se, com esses dados obtidos, que a prática de calagem empregada na área experimental,

na ocasião de implantação da lavoura, colaborou para neutralizar essa acidez, que é prejudicial ao desenvolvimento e produção do cafeeiro arábica. Grande parte da cafeicultura brasileira encontra-se implantada em solos ácidos, com presença de Al na solução do solo (Matiello et al., 2016). No Brasil, os principais estados produtores de café utilizam dois métodos principais para a calagem, sendo eles: o método da elevação da saturação por bases do solo (V) e o método da neutralização do  $Al^{3+}$  e elevação dos teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . Esses métodos são baseados em conceitos distintos, porém amplamente aceitos e utilizados (Prezotti e Guarçoni, 2013). Mendonça et al. (2007) verificaram que, em saturações mais altas que 30%, o  $Al^{3+}$  restringiu a superfície específica da raiz das plantas de café arábica.

Os valores da acidez potencial (H+Al), independente da densidade amostral, apresentaram valores mínimos e máximos, como “acidez baixa” e “acidez alta”, respectivamente (Tabela 1). O CV (28,95%), para este atributo, classifica-se como “médio”. O H+Al corresponde à soma da acidez trocável com a acidez não trocável (hidrogênio de ligação covalente), caracteriza o poder tampão de acidez do solo e sua estimativa acurada é fundamental para se estimar a capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7,0 (Campos et al., 2017).

Em relação à disponibilidade dos nutrientes P, K, Ca e Mg no solo, avaliados sob as diferentes densidades amostrais, obteve-se diferentes interpretações. A fração do teor de P disponível, analisado sob as densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $ha^{-1}$ , apresentou valores mínimos, médios e máximos, classificados como “muito bom” (Tabela 1). Alvarez V. et al. (1999) propõem para esta classe valores  $>18,0 mg dm^{-3}$ . O coeficiente de variação (50,86%) dos dados é considerado “médio”. Tais valores são decorrentes da prática rotineira de adubação fosfatada na lavoura, embora existam zonas com maior teor e outras com menor teor de P, observando-se uma grande amplitude nos valores obtidos. Essa grande amplitude revela os problemas que podem ocorrer, quando se utiliza a média dos valores para o manejo da adubação fosfatada do solo. Assim, em alguns locais da área, a aplicação de fertilizante poderá ser inferior à dosagem necessária à produção do cafeeiro, enquanto que em outras áreas, a aplicação será de acordo com as necessidades da planta e, em outras localidades, poderá haver aplicação excessiva do elemento P. Os Latossolos são naturalmente pobres neste elemento.

Os teores de K no solo, interpretados segundo Alvarez V. et al. (1999), apresentaram, em ambas as densidades amostrais, valores mínimos e máximos como sendo “muito bom” (Tabela 1). Dessa forma, atende à demanda do cafeeiro arábica por

ser este o segundo nutriente mais requerido em sua nutrição mineral. Entretanto, há de se considerar o fato de que o K possa ocupar uma alta porcentagem das bases na CTC do solo (ideal de 3-5%) e interferir na absorção de outros elementos. Além disso, a fonte de adubo potássico mais utilizada na cafeicultura regional é o cloreto de potássio (KCl), merecendo atenção quanto ao risco de salinizar o solo com doses excessivas, que representaria um fator limitante para a cafeicultura, pois causa efeitos imediatos nas plantas, sobretudo o desequilíbrio nutricional. Além disso, há riscos de perda de  $K^+$  por lixiviação. O coeficiente de variação (28,68%) para os teores de K no solo é considerado “médio”. Cherubin et al. (2015) constatou que o uso de malhas amostrais menores ou iguais a 100 x 100 m, com uma ou mais amostras por hectare, é indicado para caracterizar a variabilidade espacial de P e K em áreas sob agricultura de precisão.

Os elementos Ca e Mg, analisados sob densidade amostral de 2 pontos  $ha^{-1}$ , apresentam em valores mínimos, médios e máximos teores considerados como sendo “muito bom”. Tal condição indica que houve aplicação de calcário para correção da acidez do solo e para o fornecimento de bases Ca e Mg, observando-se as exigências nutricionais do cafeeiro arábica por estes elementos. O coeficiente de variação para Ca foi “baixo” (9,80%) e para Mg “médio” (18,18%). Parecido (2020) observou que a aplicação de calcário na faixa de cultivo de cafeeiro promoveu a redução da acidez e elevação nos teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  do solo, sob a projeção na copa das plantas, principalmente na camada superficial. Segundo Oliveira et al. (2008), a análise dos dados pelo método espacial possibilitou identificar zonas de déficit ou excesso de calagem e de adubação na área, que não poderiam ser definidas com o método convencional de amostragem.

Na condição de maior densidade amostral, 5 pontos  $ha^{-1}$ , os valores mínimos e máximos para o Ca também se caracterizaram como sendo “muito bom”. Para o Mg, o valor mínimo encontrado é classificado como “bom” e o máximo como sendo “muito bom”. O CV, para ambos os elementos, foi classificado como “médio”. O Ca é, via de regra, muito mais abundante no solo do que o Mg (Raij, 2011). Um fator a ser considerado na área experimental é que, historicamente, na época de implantação dessa lavoura, houve a aplicação de calcário para correção da acidez da camada superficial do solo. Segundo Raij (2011), o aspecto mais importante do efeito da calagem é a longa duração de seus benefícios. A preocupação quanto ao manejo convencional reside, no entanto, quanto ao risco de aplicação de subdoses e doses excessivas, tendo em vista o uso da agricultura baseada na média. Guarçoni (2017) considerou que a necessidade de

calagem deve ser estimada de forma criteriosa, caso contrário, podem ser aplicadas doses insuficientes, ou pior, excessivas, que, de uma forma ou de outra, irão acarretar queda na produtividade das lavouras de café em relação ao seu potencial produtivo. Assim, o uso dos princípios da cafeicultura de precisão se torna muito importante.

Considerando o complexo sortivo do solo, que constitui o conjunto de partículas trocadoras de íons no solo (S.B., V, t e T), avaliados sob as densidades amostrais experimentais, obteve-se as interpretações que seguem. A SB, que reflete os teores somados de Ca, Mg e K trocáveis, apresentou valores mínimos de  $7,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , para avaliação sob menor densidade amostral; e  $5,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , sob maior densidade amostral, o que confere classificação de “muito bom” e “bom”, respectivamente. Independente da classificação proposta por Alvarez V. et al. (1999), a análise desses valores demonstra que a amostragem de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  conseguiu identificar zonas com teores menores. Entretanto, quanto aos valores máximos, as duas densidades amostrais localizaram pontos com valores de  $12,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , considerados como sendo “muito bom”. O CV, para estes dados, foi “baixo” (11,40% e 11,98%) (Tabela 1). Evidencia-se, novamente, que a calagem realizada na área incrementou Ca e Mg, que são as bases que mais participam da CTC do solo.

O índice de saturação por bases (V) reflete a porcentagem de bases que ocupam a CTC do solo a pH 7,0. Em relação aos valores referentes ao V, analisados sob as densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , a classificação propõe, para os valores mínimos, como sendo “médio”; e máximos, como sendo “muito bom” (Tabela 1). O CV em ambas as densidades amostrais foi “baixo” (10,36% e 11,53%). Os valores médios conduzem à interpretação de “bom” que, sob a ótica da cafeicultura convencional, dispensa o uso momentâneo de calcário. Segundo Ribeiro et al. (1999), o valor de V = 60% vem sendo considerado como adequado para a cultura do cafeeiro. Porém, na análise detalhada dos dados do presente trabalho, observa-se que existem valores de V aquém do ideal para a cultura cafeeira, quando foi constatado o teor mínimo de 54% em amostragem de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , e de 41% em amostragem de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  (Tabela 1). Matiello et al. (2016) consideram que se deve elevar a V a 60% em solos com  $\text{CTC} < 7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; V de 50% em solos com CTC entre 7 e  $10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; e V de 40% em solos com  $\text{CTC} > 10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Já Raij et al. (1997) recomendam elevar V a 50% e Guimarães et al. (1999) V a 60%, considerando-se 0-20 cm de profundidade efetiva. Todavia, para Guarçoni e Sobreira (2017), o método da V pode gerar doses insuficientes de calcário para suprir as plantas com Ca e Mg, caso a CTC do solo seja baixa.

Em relação à t, determinada ao pH natural do solo; e T determinada ao pH 7,0, valores mínimos e máximos obtidos na estatística descritiva para ambas as densidades amostrais, apresentam valores de “bom” e “muito bom”, com CV “baixo” (t: 11,26% e 11,63%; T: 10,36% e 11,53%). A troca de cátions em solos implica na existência de substâncias ou materiais com a propriedade de regular a retenção e a liberação de elementos químicos em forma disponível para as plantas e essa propriedade se manifesta na superfície das partículas da fração argila e da matéria orgânica do solo (RAIJ, 2011). Os Latossolos têm CTC da fração argila baixa, inferior a  $17 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (EMBRAPA, 2013). Segundo Raij (2011), nas regiões tropicais úmidas, o mineral de argila predominante é a caulinita, mineral de argila do tipo 1:1, cuja CTC é baixa, da ordem de 5 a  $10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Este autor considera ainda que, por suas características mineralógicas, os solos tropicais úmidos apresentam cargas dependentes de pH, ou seja, a elevação do pH contribui com o aumento das cargas negativas do solo. A CTC medida a pH 7,0 tem valor relativamente constante e trata-se de uma característica de solo inalterável a curto prazo, por práticas agrícolas, podendo-se alterar apenas a proporção relativa dos cátions que a ocupam (Raij, 2011). Considera-se que alguma variação dos valores obtidos da CTC do solo, cultivado com o cafeeiro na lavoura experimental, pode ser devida à contribuição da matéria orgânica acumulada no solo nos anos de cultivo.

Reitera-se, mediante os dados obtidos, que o procedimento de amostragem deve ser realizado criteriosamente, para ser fielmente representativo da área amostrada e conduzir, assim, às interpretações e recomendações corretas, proporcionando ganhos econômicos, produtivos e ambientais, uma vez que as doses de corretivos e fertilizantes serão calculadas e aplicadas mais assertivamente. Segundo Guarçoni (2017), caso os fertilizantes e corretivos não sejam aplicados em quantidades suficientes ao solo, ocorrerá redução de produtividade da cultura cafeeira.

Observou-se, pela análise estatística descritiva, indícios de variabilidade espacial dos atributos químicos do solo analisados, com causas possivelmente dependentes, tanto do uso e manejo, como também relativos a aspectos intrínsecos do próprio solo. De posse de todas essas informações a respeito das condições de fertilidade do solo, faz-se necessário identificar os locais exatos onde se encontram os valores que variaram dos mínimos até os máximos, a fim de estabelecer as práticas de manejo localizadas e preconizadas pela cafeicultura de precisão. Para tanto, a geoestatística se torna fundamental para identificar a variabilidade espacial dos respectivos atributos químicos do solo. Assim, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura da dependência

espacial de todos os atributos químicos do solo em estudo, de acordo com a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup> e 5 pontos ha<sup>-1</sup> (Tabela 2)

**Tabela 2.** Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos químicos do solo, profundidade de 0-20, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	2 pontos ha <sup>-1</sup>		IDE	IDA
					A			
pH	H <sub>2</sub> O	0,074*	0,000	0,074	779,18	1,000	-	-
P	mg dm <sup>-3</sup>	452,52	84,096	536,619	160,36	0,843	fraco	0,53
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,063*	0,000	0,063	779,18	1,000	-	-
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,215	0,071	0,286	163,45	0,762	moderado	0,74
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,143*	0,000	0,143	779,18	1,000	-	-
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,007*	0,000	0,001	779,18	1,000	-	-
H+Al	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,488	0,336	0,824	168,18	0,592	moderado	0,84
SB	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,563	0,298	0,861	229,27	0,654	moderado	0,82
t	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,536	0,343	0,879	228,74	0,610	moderado	0,83
T	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,672	0,136	0,808	249,23	0,732	moderado	0,82
V	%	22,659	15,031	37,690	194,81	0,601	moderado	0,83
m	%	0,077*	0,000	0,077	779,18	1,000	-	-
					5 pontos ha <sup>-1</sup>			
pH	H <sub>2</sub> O	0,077	0,007	0,084	807,01	0,917	fraco	0,63
P	mg dm <sup>-3</sup>	396,135	43,390	439,525	807,02	0,901	fraco	0,65
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,018	0,042	0,060	89,45	0,200	forte	0,88
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm	0,028	0,540	0,568	78,46	0,049	forte	0,91
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm	0,184	0,035	0,219	81,66	0,740	moderado	0,85
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm	0,000	0,001	0,001	124,95	0,667	moderado	0,82
H+Al	cmol <sub>c</sub> dm	0,060	1,190	1,250	80,46	0,048	forte	0,90
SB	cmol <sub>c</sub> dm	0,000	1,455	1,455	83,72	0,000	forte	0,91
t	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,000	1,405	1,405	83,72	0,000	forte	0,92
T	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,000	0,759	0,759	79,80	0,000	forte	0,90
V	%	126,520	25,158	151,678	807,09	0,734	moderado	0,81
m	%	0,039	0,040	0,079	129,31	0,494	moderado	0,85

Atb. = atributo; Und. = unidade; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>1</sub>: contribuição; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; A = alcance; IDE = índice de dependência espacial; IDA = indicador de densidade amostral; \*EPP = Efeito Pepita Puro.

A análise do semivariograma dos atributos químicos do solo revelou diferenças, de acordo com a densidade amostral (Tabela 2). Em relação às características de acidez do solo sob amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, constatou-se efeito pepita puro (C<sub>0</sub>) para pH, Al e m, com alcance de 779,18 m para todos os atributos. O efeito pepita puro é um importante parâmetro do semivariograma e indica a variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada (Ferraz, 2012). Segundo Machado (2007), o efeito pepita puro é a indicação de que os atributos são espacialmente independentes, apresentam distribuição casual ou de que o espaçamento de amostragem usado é maior que o necessário para revelar a dependência espacial e de que a única estatística aplicável é a clássica. Apenas H+Al apresentou IDE “moderado”. Entretanto,

os atributos de acidez, quando amostrados sob densidade de 5 pontos  $ha^{-1}$ , apresentaram IDE “fraco” para pH, “moderado” para Al e m, e “forte” para H+Al. Figueiredo (2016) encontrou IDE fraco e moderado para H+Al nas malhas amostrais avaliadas.

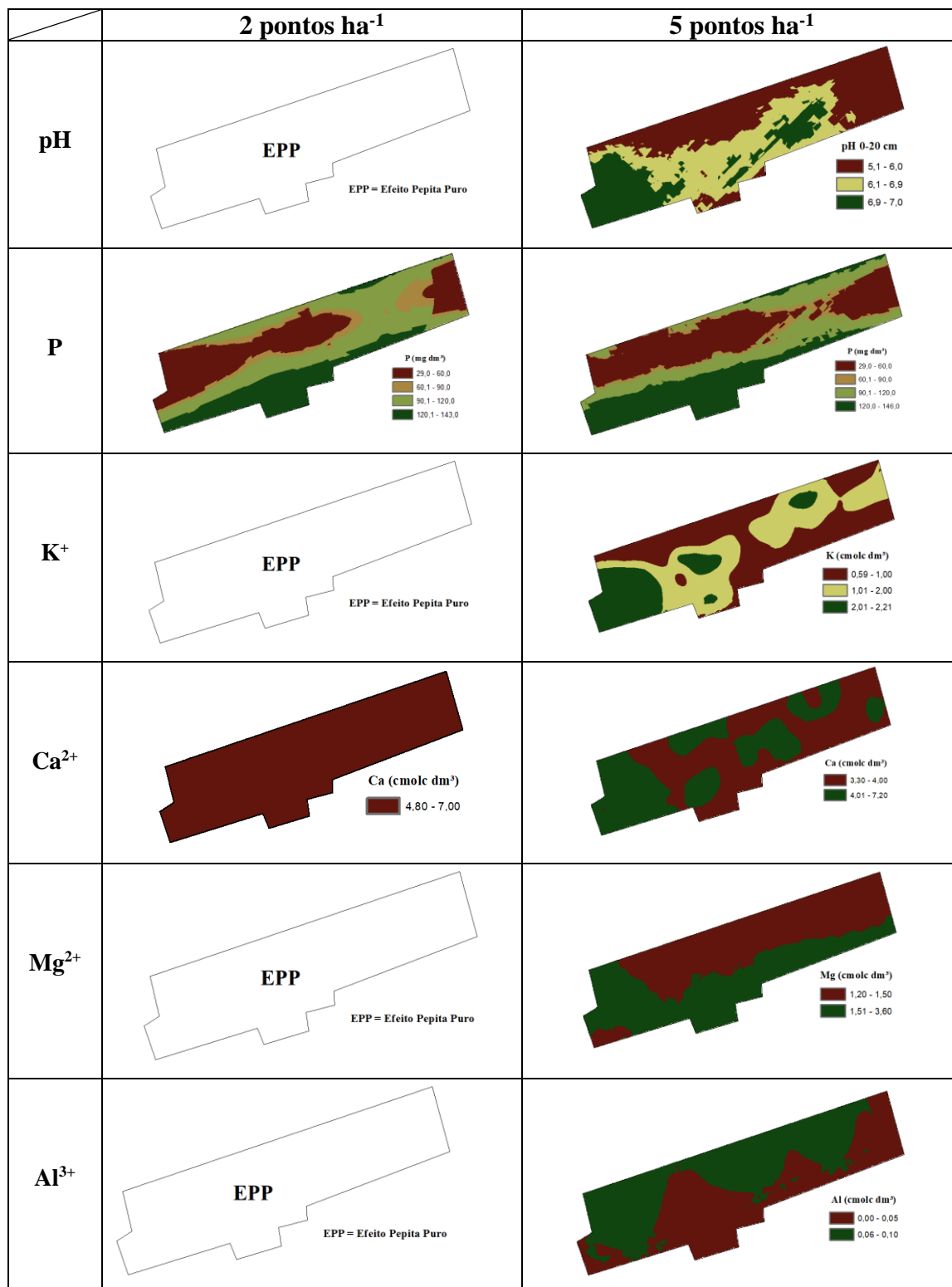
Quanto à disponibilidade de nutrientes, a menor densidade amostral demonstrou efeito pepita puro para K e Mg, e IDE “fraco” para P e Ca. Sob maior densidade, P apresentou IDE “fraco”, Mg apresentou IDE “moderado”, enquanto K e Ca apresentaram IDE “forte”. O alcance obtido para Ca, Mg e K foi de 78,46; 81,66 e 89,45 m, respectivamente (Tabela 2). Segundo Santos et al. (2013), o uso do alcance do semivariograma no processo de amostragem é importante para a correta distribuição do número de amostras para determinação dos atributos químicos do solo, de acordo com a escala de estudo. Melo et al. (2017) não encontraram dependência espacial para o fósforo e Carvalho et al. (2013), avaliando malhas amostrais, encontraram, para o atributo Ca, valores de alcance na faixa de 102,1 a 245,0 m.

Para os atributos do complexo sortivo do solo, sob amostragem de 2 pontos  $ha^{-1}$ , o IDE foi “moderado” para S.B., V e t e “fraco” para T. Os alcances foram de 194,81 a 249,23 m. Já para a amostragem de 5 pontos  $ha^{-1}$ , o índice de dependência espacial foi considerado “forte” para SB, t e T e “moderado” para V. O alcance registrado de 80,46 m, 83,72 m e 79,80 m para SB, t e T (Tabela 2). Segundo Figueiredo (2016), o IDE para soma de bases (SB) de todas as áreas avaliadas, em ambos os anos amostrados, foi considerado “fraco”.

Os dados do indicador de densidade amostral (IDA) obtidos revelou que a maior densidade amostral foi superior à amostragem de 2 pontos  $ha^{-1}$ , utilizando-se a metodologia proposta por Ferraz (2012). Figueiredo (2016) também avaliou este índice e concluiu em seu trabalho que este indicador permitiu identificar que a densidade de 2 pontos  $ha^{-1}$  (a maior utilizada em seu experimento) foi a que melhor representou a variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo.

Os mapas temáticos dos atributos químicos do solo e seus respectivos semivariogramas, referentes à profundidade de coleta de 0-20 cm, nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $ha^{-1}$ , estão ilustrados nas Figuras 4, 5, 6 e 7 seguintes.

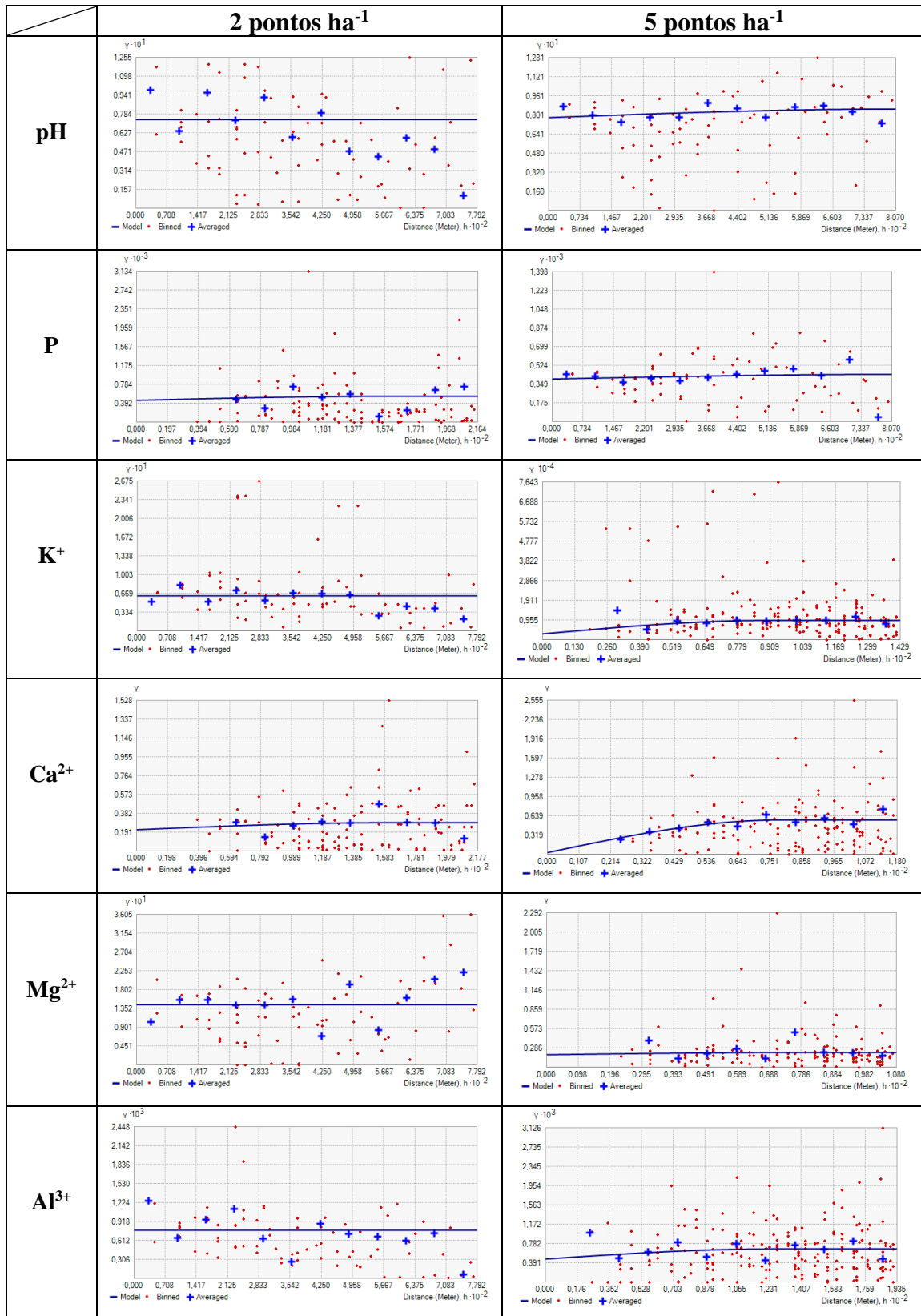




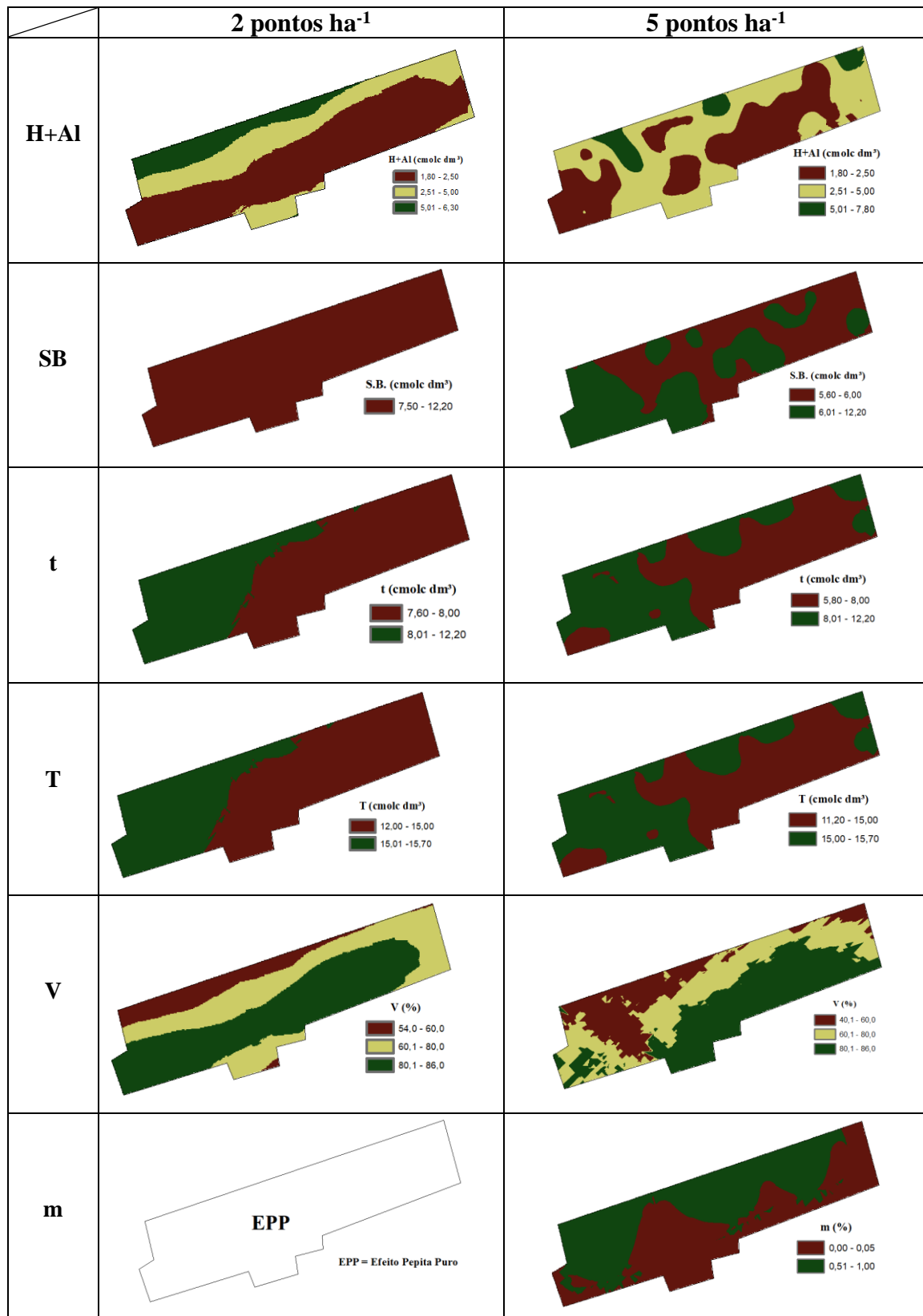
**Figura 4.** Mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: pH; P; K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

Verificou-se que, sob maior densidade amostral, os mapas gerados apresentam definições características de zonas de manejo, quando comparados ao mapeamento sob

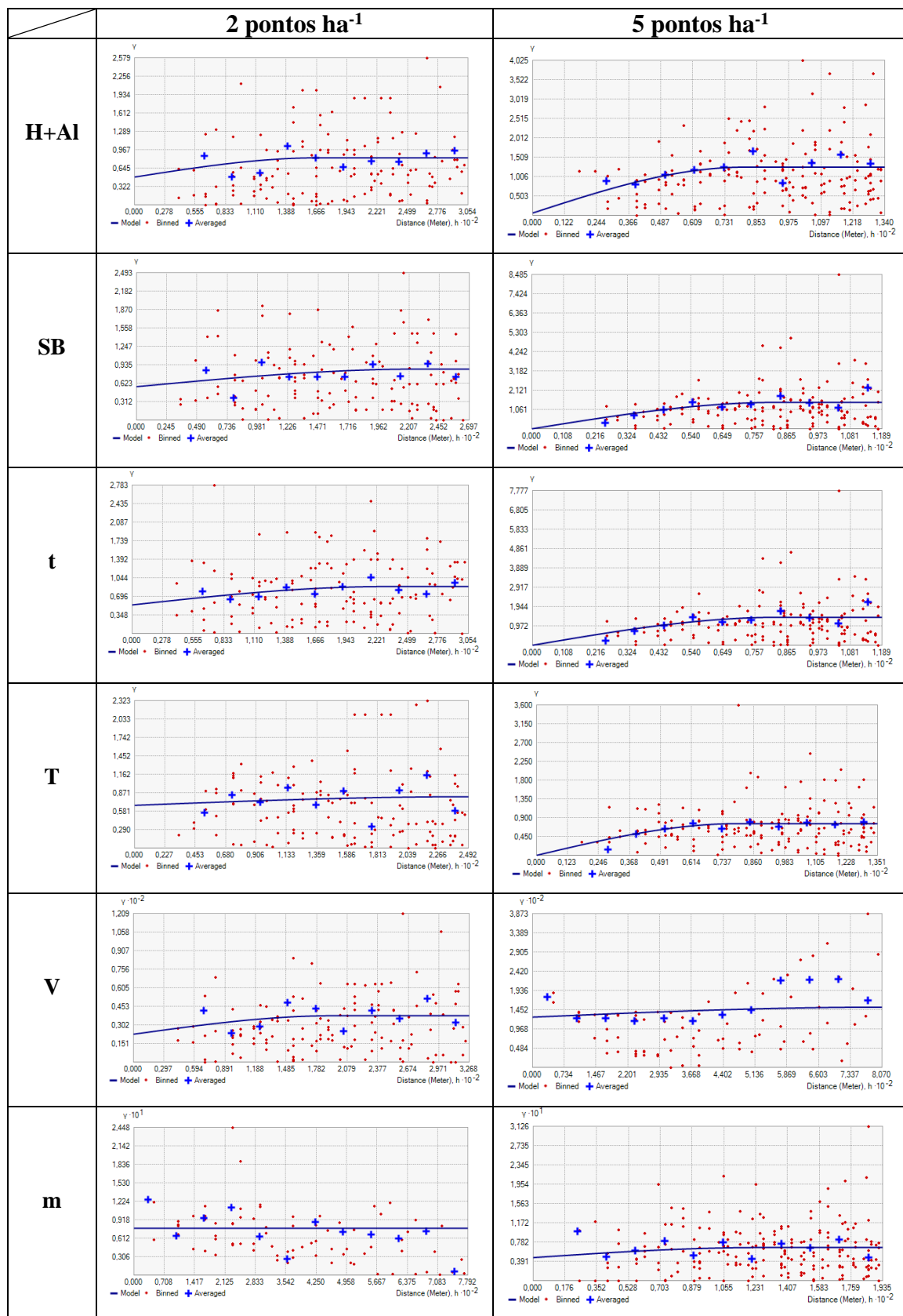
menor densidade de amostragem, apresentando maior confiabilidade para intervenções agrônômicas mais assertivas.



**Figura 5.** Semivariogramas da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: pH; P; K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.



**Figura 6.** Mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: H+Al; SB; t; T; V e m, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.



**Figura 7.** Semivariogramas da distribuição espacial dos atributos químicos do solo: H+Al; SB; t; T; V e m, na profundidade de 0-20 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

#### 4.1.2 Atributos químicos do subsolo cultivado com cafeeiro arábica

Os dados da análise estatística descritiva dos atributos químicos do subsolo, referentes à profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, estão apresentados na Tabela 3. Os mesmos apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

**Tabela 3.** Estatística descritiva para os atributos químicos do subsolo, na profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	Mín.	Máx.	Méd.	D.P.	CV(%)	Assim.	K	K-S
2 pontos ha <sup>-1</sup>									
pH	H <sub>2</sub> O	5,2	6,1	5,75	0,29	5,04	-0,296	-1,082	0,209
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,7	5,8	4,25	0,99	23,29	0,058	-1,170	0,118
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,0	0,3	0,105	0,09	85,71	0,772	0,297	0,293
m	%	0	5	1,64	1,62	98,78	0,951	-0,108	0,244
5 pontos ha <sup>-1</sup>									
pH	H <sub>2</sub> O	5,1	6,1	5,78	0,25	4,33	-0,731	-0,001	0,170
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,4	5,8	4,36	0,87	19,95	-0,321	-0,544	0,083
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,0	0,8	0,09	0,12	133,33	3,741	21,167	0,328
m	%	0	13	1,45	1,97	135,86	3,545	18,265	0,279

Atb. = atributo; Und. = unidade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Méd. = média; D.P. = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; K = curtose; K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov.

A análise das condições químicas do subsolo, sob amostragem de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, revelam ambos os teores mínimos de pH em água, classificados como “acidez média”; e teores máximos, classificados como “acidez fraca”; o CV foi considerado “baixo”. Quanto aos teores de Ca, os valores mínimos encontrados foram classificados como “bom” e teores máximos considerados como “muito bom”, porém, o coeficiente de variação dos dados foi considerado “médio”. Os teores de pH obtidos são um indicativo das condições relacionadas aos demais atributos químicos do solo.

Considerando os teores de Al<sup>3+</sup> na camada subsuperficial, constatou-se que os valores mínimos (ausência de Al<sup>3+</sup>) classificam a acidez trocável como sendo “muito baixa”, em ambas as densidades amostrais analisadas. Os valores máximos, contudo, diferiram de acordo com a amostragem realizada, sendo classificada a acidez trocável como “média” (0,3 e 0,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), nas densidades amostrais em 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os teores percentuais mínimos e máximos de m, nas densidades de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, se apresentam como referência “muito baixo” (0%). O coeficiente de variação, entretanto, foi considerado “alto” (85,71% e 133,33%) (Tabela 3).

Constata-se, sob maior densidade amostral, que foi possível localizar a existência de localidades com maiores teores de Al no subsolo, quando comparada à eficiência da menor densidade amostral. Nessas circunstâncias, alguns teores de Al encontrados na amostragem de 5 pontos ha<sup>-1</sup> podem ser suficientes para recomendar o uso do gesso agrícola, conforme os critérios estabelecidos por Raij (2011) e Alvarez V. et al. (1999), sendo indicada a prática de manejo de gessagem localizada, baseada nos princípios da cafeicultura de precisão. Soratto e Crusciol (2008) evidenciaram efeitos positivos da gessagem aplicadas superficialmente sobre as características químicas do solo, promovendo incremento nos teores de Ca e redução dos teores de Al trocável nas camadas superficiais do solo. São escassos na literatura resultados de pesquisa que avaliam a variabilidade espacial do subsolo em lavoura cafeeira.

A análise das condições químicas do subsolo, principalmente aquelas relacionadas à acidez e disponibilidade de nutrientes, é importante para se estabelecer um sistema de manejo capaz de proporcionar um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular do cafeeiro, especialmente no tocante ao uso de gesso agrícola, visto que a prática da gessagem preconiza a melhoria das condições químicas do subsolo. Segundo Raij (2011), as condições diagnósticas são dadas por: a)  $Ca^{2+} < 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; b)  $Al^{3+} > 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , associado com saturação por alumínio (m)  $> 40 \%$ . Alvarez V. et al. (1999) recomendam que o gesso deve ser aplicado quando na camada subsuperficial (20-40 cm) houver  $Ca^{2+} \leq 0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e/ou  $Al^{3+} > 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e/ou, ainda, quando a saturação por alumínio (m) for maior do que 30 %. Portanto, a inclusão do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos do subsolo se faz necessária para o manejo localizado da produção cafeeira.

Percebe-se, pela análise dos dados, efeitos positivos e duradouros da gessagem realizada aos 2 anos de implantação da lavoura. Todavia, pode-se atribuir a variação dos dados a uma possível desuniformidade na aplicação desse insumo. A identificação da variabilidade espacial dos respectivos atributos químicos do solo, dos locais onde se encontram os valores que variaram desde os mínimos até os máximos, foi realizada utilizando-se a geoestatística. Assim, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura da dependência espacial de todos os atributos avaliados, de acordo com a densidade amostral de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup> (Tabela 4).

**Tabela 4.** Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos químicos do subsolo, profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	A	IDE	IDA	
2 pontos ha <sup>-1</sup>								
pH	H <sub>2</sub> O	0,069	0,004	0,073	191,37	0,945	fraco	0,52
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,501	0,322	0,823	236,49	0,609	moderado	0,73
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,000	0,008	0,008	160,36	0,380	moderado	0,77
m	%	1,071	1,688	2,759	186,65	0,388	moderado	0,75
5 pontos ha <sup>-1</sup>								
pH	H <sub>2</sub> O	0,003	0,057	0,060	74,81	0,050	moderado	0,79
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,52	0,200	0,720	242,03	0,722	moderado	0,72
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,000	0,015	0,015	90,76	0,000	forte	0,92
m	%	0,000	4,667	4,667	91,36	0,000	forte	0,90

Atb. = atributo; Und. = unidade; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>1</sub>: contribuição; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; A = alcance; IDE = índice de dependência espacial; IDA = indicador de densidade amostral.

Na avaliação dos dados da amostragem em densidade de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, apenas o atributo de acidez ativa (pH) apresentou índice de dependência espacial “fraco”. Para o Ca e a saturação por alumínio (m), o IDE foi classificado como “moderado” e Al como “forte”. Os atributos estudados apresentaram diferentes alcances de dependência espacial, tendo o pH o valor de 191,37 m; Ca de 236,49 m; Al de 160,36 m; e saturação por alumínio (m) de 186,65 m.

Sob densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, o IDE foi classificado como “moderado” para pH e Ca, enquanto os atributos Al e m foram classificados com dependência espacial “forte”. Esses atributos químicos apresentaram alcances de dependência espacial menores para pH, Al e m, tendo os valores de 74,81; 90,76 e 91,36 m, respectivamente. Assim, sob maior densidade amostral, verifica-se variações em seus teores num espaço menor. Apenas o elemento Ca apresentou alcance de 242,03 m, ligeiramente superior ao constatado na densidade amostral 2 pontos ha<sup>-1</sup>.

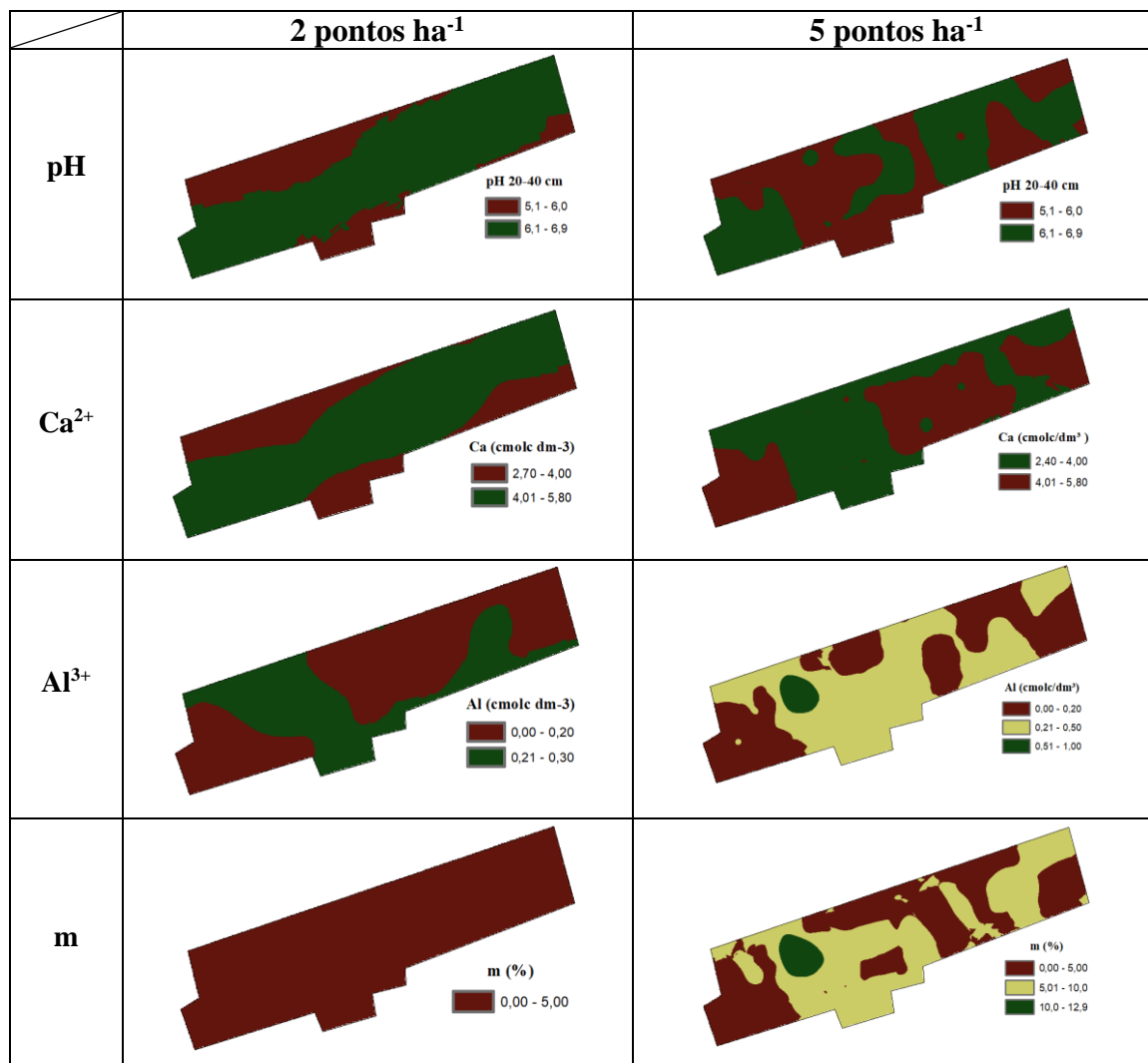
Constata-se que, para Al, em ambas as densidades amostrais, o índice de dependência espacial foi considerado “forte”, demonstrando haver dependência espacial dentro da área de cultivo. Esse diagnóstico pode estar relacionado a uma possível ocorrência descontinuada naturalmente no solo. Segundo Silva et al. (2010b), a variabilidade espacial dos atributos dos solos é resultado de processos pedogenéticos, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas. Pode também estar relacionado à prática da gessagem, realizada na área por ocasião da implantação do cafeeiro. Essa prática pode ter sido calculada equivocadamente e/ou tido a distribuição deste insumo de forma desuniforme na área. É fato que, em caso de estresse hídrico,

conforme cita Martinez e Neves (2015), a presença de alumínio na subsuperfície do solo poderá ser danosa ao cafeeiro, por limitar seu aprofundamento radicular. Como forma de se corrigir a toxidez por alumínio (Al) nas camadas mais profundas do solo e permitir que o sistema radicular do cafeeiro alcance maiores profundidades, via de regra, mais úmidas, a aplicação de gesso agrícola tem sido empregada em muitas propriedades cafeeiras (Ramos et al., 2013).

Os dados de IDA obtidos demonstram que, comparativamente, a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup> foi superior à amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup> para os atributos do subsolo avaliados, utilizando-se a metodologia proposta por Ferraz (2012). Os resultados apresentados evidenciam que a maior densidade avaliada neste experimento aumenta a confiabilidade para aplicação das técnicas de cafeicultura de precisão com intervenção localizada de uso de insumos que, neste caso, é o gesso. Entretanto, deve ser usado na dose certa e no local certo, visto que seu déficit ou seu excesso pode influenciar desuniformemente o crescimento e desenvolvimento das plantas, podendo resultar em perdas de produtividade. A confecção dos mapas temáticos permitiu a melhor visualização e definição de zonas de manejo localizado do subsolo.

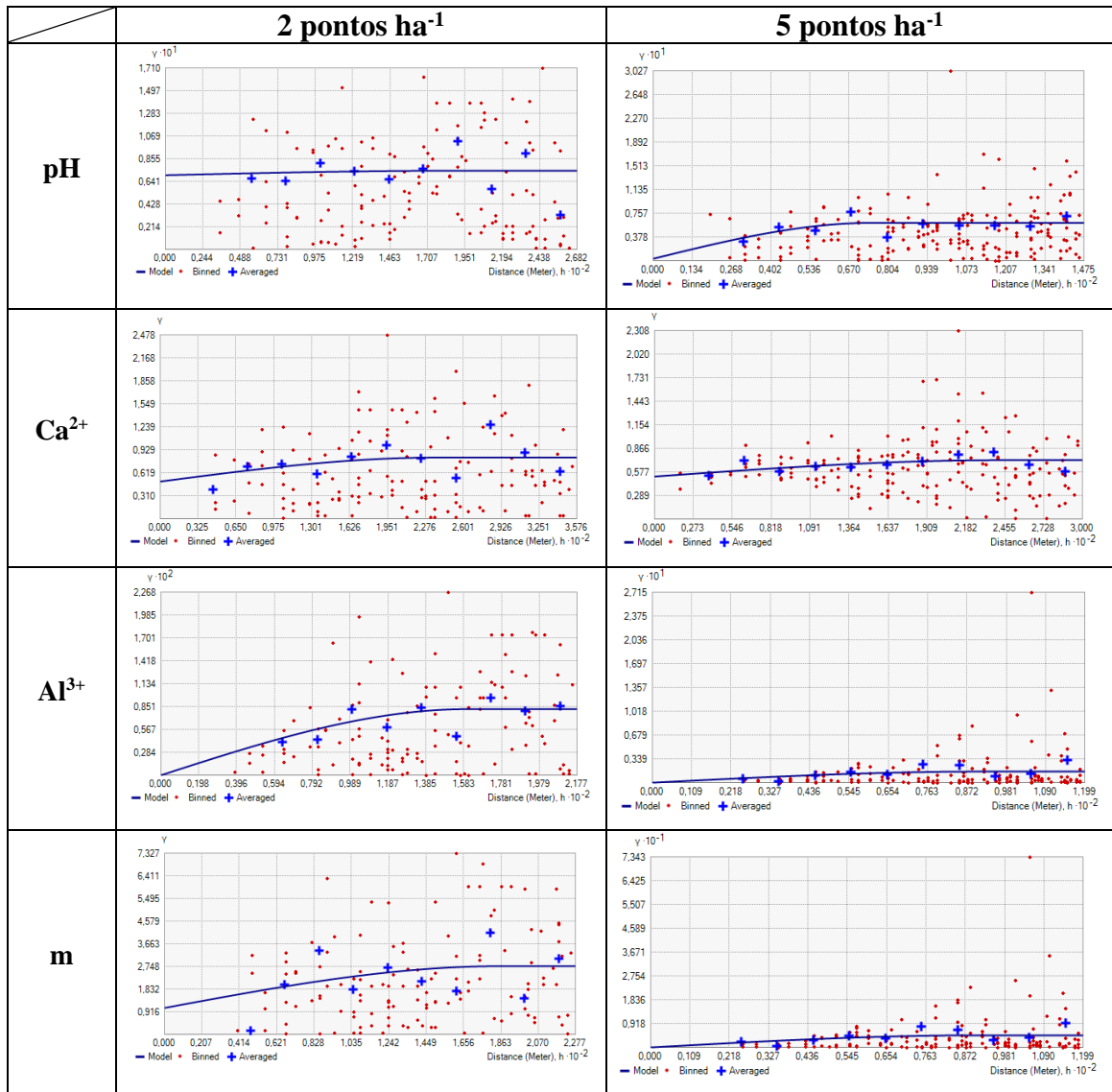
Os mapas temáticos e respectivos semivariogramas dos atributos químicos do subsolo, na profundidade de coleta de 20-40 cm, nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, estão ilustrados nas Figuras 8 e 9.





**Figura 8.** Mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos químicos do subsolo: pH; Ca<sup>2+</sup>; Al<sup>3+</sup> e m, na profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

Os mapas interpolados dos teores de pH, Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> e m (Figura 8) do subsolo também demonstraram zoneamento mais adequado para amostragem de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, haja vista que, na densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, o mapeamento desses atributos não apresentaram muitas distinções de zonas, caracterizando a área como sendo de maior homogeneidade. Os mapas obtidos têm uma considerável importância para diagnosticar os locais onde o subsolo apresentou teores com deficiência, adequados e excessivos dos atributos avaliados. A utilização de densidades amostrais insatisfatórias pode gerar distorções da realidade e gerar mapas que não refletem a realidade no campo.



**Figura 9.** Semivariogramas da distribuição espacial dos atributos químicos do subsolo: pH; Ca<sup>2+</sup>; Al<sup>3+</sup> e m, na profundidade de 20-40 cm, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

### 4.1.3 Macronutrientes foliares do cafeeiro arábica

Os dados dos atributos nutricionais macronutrientes do cafeeiro arábica obtidos apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade, e a análise estatística descritiva dos mesmos estão apresentados de acordo com a densidade amostral de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup> na Tabela 5.

**Tabela 5.** Estatística descritiva para os atributos nutricionais macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S, expressos em g kg<sup>-1</sup>, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	Mín.	Máx.	Méd.	D.P.	CV(%)	Assim.	K	K-S
2 pontos ha <sup>-1</sup>									
N	g kg <sup>-1</sup>	21,79	28,28	24,99	1,65	6,60	0,062	-0,513	0,107
P	g kg <sup>-1</sup>	0,39	2,06	1,19	0,63	52,94	-0,088	-1,954	0,149
K	g kg <sup>-1</sup>	20,45	28,79	24,47	2,27	9,28	-0,133	-0,686	0,121
Ca	g kg <sup>-1</sup>	8,50	16,00	12,51	1,62	12,95	-0,368	0,853	0,109
Mg	g kg <sup>-1</sup>	3,05	4,46	3,64	0,41	11,26	0,617	-0,024	0,117
S	g kg <sup>-1</sup>	0,35	1,37	0,97	0,23	23,71	-0,606	1,036	0,138
5 pontos ha <sup>-1</sup>									
N	g kg <sup>-1</sup>	21,79	28,28	24,88	1,50	6,03	0,131	-0,265	0,057
P	g kg <sup>-1</sup>	0,39	2,20	1,20	0,64	53,33	-0,101	-1,823	0,122
K	g kg <sup>-1</sup>	14,79	29,58	24,49	2,71	11,07	-0,654	1,362	0,074
Ca	g kg <sup>-1</sup>	8,51	25,32	13,01	2,34	17,99	2,149	11,234	0,154
Mg	g kg <sup>-1</sup>	2,46	8,30	3,76	0,75	19,95	3,522	20,796	0,151
S	g kg <sup>-1</sup>	0,35	1,95	1,01	0,27	26,73	0,598	2,461	0,131

Atb. = atributo; Und. = unidade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Méd. = média; D.P. = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; K = curtose; K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov.

Considerando os dados obtidos sob a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, os teores de N demonstram, pelos valores mínimos, haver zonas “deficientes”; e pelos valores máximos, a existência de zonas com teores “adequados”, conforme classificação de Malavolta (2006). O coeficiente de variação foi considerado “baixo” (6,60%). Para os dados obtidos sob a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, os teores de N se comportaram de forma semelhante quanto à classificação dos teores mínimos e máximos, bem como quanto ao coeficiente de variação (6,03%), que foi “baixo” (Tabela 5). O N é o elemento mais exigido pelo cafeeiro, e seu suprimento adequado é fundamental para garantir o crescimento vegetativo e a produção de café (Martinez e Neves, 2015).

Os teores de P também demonstram, pelos valores mínimos, haver zonas “deficientes”; e pelos valores máximos, a existência de zonas com teores “adequados”, conforme Malavolta (2006), sob a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup>. Os dados obtidos sob a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup> apresentam valores mínimos também

classificados como “deficientes” e valores máximos classificados como “alto”. O CV para os teores foliares de P, obtidos em ambas as densidades amostrais, foi considerado “médio” (52,94% e 53,33%) (Tabela 5). Dentre os macronutrientes, o P é um dos menos requeridos pelo cafeeiro, porém, a sua carência retarda o crescimento e produção das plantas (Martinez e Neves, 2015).

Os teores mínimos de K, obtidos na densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, são classificados como “adequado”, no entanto, os valores máximos desse macronutriente estão “excessivos”. O coeficiente de variação foi considerado “baixo” (9,28%). Assim, sob essa amostragem, verifica-se que não há deficiência desse elemento nas plantas na área experimental. Entretanto, fato importante é reconhecer as zonas com teores excessivos, visto que os teores elevados de K nas folhas podem interferir na absorção de outros nutrientes, a exemplo do Ca e Mg, resultando em desequilíbrio nutricional. Já para os dados obtidos sob a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, os teores mínimos foram classificados como “marginal” e os valores máximos estão “excessivos”, os quais podem ser realmente prejudiciais. O CV também foi considerado “baixo” (11,07%) (Tabela 5). Segundo Martinez e Neves (2015), o K é o segundo elemento mais exigido pelo cafeeiro e sua demanda aumenta com a idade e a produtividade da lavoura.

Para o macronutriente Ca, sob amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, os valores mínimos são classificados como “marginal” e os valores máximos como “alto”. Já na amostragem de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, os valores mínimos também são classificados como “marginal”, porém os valores máximos como “excessivos”, conforme Malavolta (2006) propõe para o cafeeiro arábica. O coeficiente de variação foi considerado “médio” para ambas as densidades amostrais (12,95% e 17,99%) (Tabela 5). O Ca é o terceiro nutriente mais exigido pelo cafeeiro (Martinez e Neves, 2015). Segundo estes autores, quando a concentração de Ca é baixa na solução do solo, as plantas têm o crescimento radicular limitado e o excesso pode induzir deficiência de Fe e Zn. Possivelmente, a própria prática da calagem pode ter contribuído para tanto, sob hipótese de distribuição desuniforme no solo, criando áreas com baixos teores de Ca e outras com excesso.

No tocante ao Mg, os dados obtidos sob a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup> demonstram, pelos valores mínimos (3,05 g kg<sup>-1</sup>), haver zona “marginal”; e pelos valores máximos (4,46 g kg<sup>-1</sup>), a existência de zonas com teores “excessivos”. O CV foi considerado “baixo” (11,26%). Quando analisado sob maior densidade amostral, ou seja, 5 pontos ha<sup>-1</sup>, os valores mínimos (2,46 g kg<sup>-1</sup>) revelam existência de zonas “deficientes” e pelos valores máximos (8,30 g kg<sup>-1</sup>) a existência de zonas com teores

foliares de Mg, classificados como “excessivo”. O coeficiente de variação (19,95%) foi considerado “médio” (Tabela 5). Os dados demonstram que maior densidade amostral foi capaz de encontrar maior amplitude da classificação dos teores foliares desse macronutriente. O desequilíbrio pode ocasionar perdas de produtividade do café. Segundo Martinez e Neves (2015), a deficiência pode ocorrer quando se usa calcário calcítico ou quando são empregadas doses excessivas de K na adubação do cafeeiro.

Os teores foliares de S revelaram pela amostragem feita sob densidade de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, que os valores mínimos (0,35 g kg<sup>-1</sup>) são classificados como “deficientes”. Os valores máximos obtidos para a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup> foram de 1,37 g kg<sup>-1</sup>, classificado como “marginal”. Para a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, foi de 1,95 g kg<sup>-1</sup>, teor tido como “adequado”, demonstrando ser esta densidade amostral capaz de identificar uma maior amplitude de classificação dos teores foliares de S. O CV foi considerado “médio” para ambas as densidades amostrais (23,71% e 26,73%) (Tabela 5). A deficiência em S pode ocorrer em virtude da pobreza em matéria orgânica ou uso de fertilizantes que não contenham este elemento (Martinez e Neves, 2015). Entretanto, o uso de superfosfato simples na adubação da lavoura experimental contribui com teores de enxofre para a nutrição mineral do cafeeiro.

A análise foliar do cafeeiro, no contexto do manejo nutricional, é importante para identificar a ocorrência de deficiências e/ou suficiências, visto que o fornecimento regular e balanceado dos nutrientes é fundamental para a produção de café. A correta interpretação dos resultados de análises foliares gera informações confiáveis que auxiliam na recomendação de fertilizantes, no equilíbrio nutricional das plantas e, conseqüentemente, no aumento da produtividade do cafeeiro arábica. Os valores médios encontrados para os macronutrientes revelam que a lavoura cafeeira apresenta desequilíbrio nutricional, em ambas as densidades amostrais, visto que os teores foliares foram classificados, segundo Malavolta (2006), como “marginal”, para N e P; “adequado”, para K, Ca e Mg; e “deficiente”, para S. Desequilíbrios no fornecimento desses macronutrientes ao cafeeiro podem induzir a planta a sofrer perdas de produção e de qualidade do café.

A variabilidade espacial dos respectivos macronutrientes foliares foi detectada utilizando-se a ferramenta da geoestatística, para assim quantificar a sua magnitude e estrutura da dependência espacial de acordo com a densidade amostral de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup> através do semivariograma (Tabela 6).

**Tabela 6.** Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos nutricionais macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S, expressos em  $\text{g kg}^{-1}$ , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$

Atb.	Und.	$C_0$	$C_1$	$C_0+C_1$	A	IDE	IDA
2 pontos $\text{ha}^{-1}$							
N	$\text{g kg}^{-1}$	1,540*	0,000	1,540	779,181	1,000	-
P	$\text{g kg}^{-1}$	0,207*	0,000	0,207	779,181	1,000	-
K	$\text{g kg}^{-1}$	3,584*	0,000	3,584	779,181	1,000	-
Ca	$\text{g kg}^{-1}$	1,105*	0,000	1,105	779,181	1,000	-
Mg	$\text{g kg}^{-1}$	0,070	0,006	0,076	779,181	0,921	fraco
S	$\text{g kg}^{-1}$	0,028*	0,000	0,028	779,181	1,000	-
5 pontos $\text{ha}^{-1}$							
N	$\text{g kg}^{-1}$	1,137	0,294	1,431	87,796	0,795	moderado
P	$\text{g kg}^{-1}$	0,000	0,236	0,236	78,460	0,000	forte
K	$\text{g kg}^{-1}$	0,000	5,768	5,768	83,530	0,000	forte
Ca	$\text{g kg}^{-1}$	0,979	3,960	4,939	117,540	0,198	forte
Mg	$\text{g kg}^{-1}$	0,000	0,587	0,587	104,652	0,000	forte
S	$\text{g kg}^{-1}$	0,033	0,003	0,036	98,760	0,917	fraco

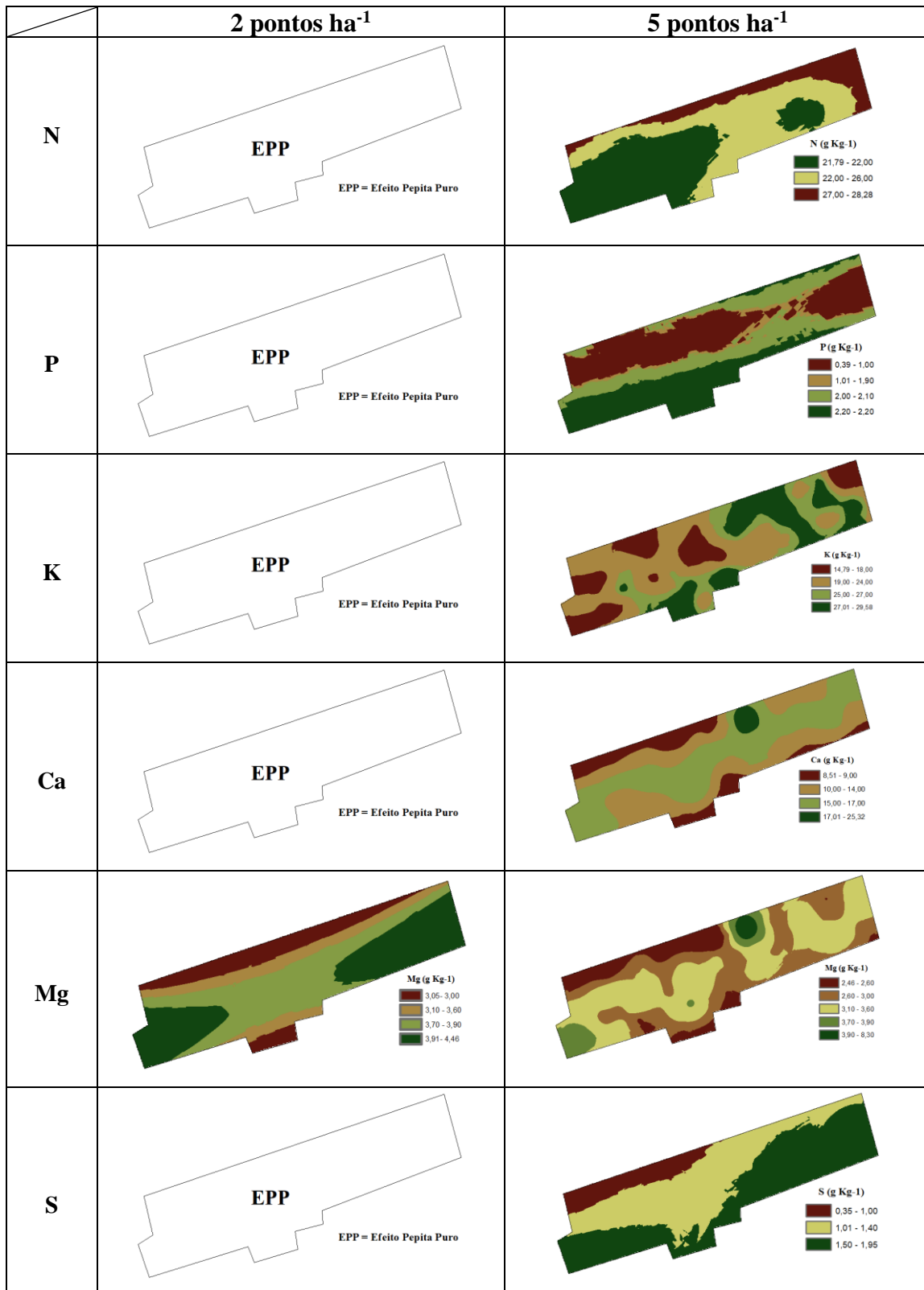
Atb = atributo; Und. = unidade;  $C_0$  = efeito pepita;  $C_1$ : contribuição;  $C_0 + C_1$  = patamar; A = alcance; IDE = índice de dependência espacial; IDA = indicador de densidade amostral; \*EPP = Efeito Pepita Puro.

Na avaliação dos dados da amostragem em densidade de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , os macronutrientes N, P, K, Ca e S apresentaram efeito pepita ( $C_0$ ) puro, ou seja, não tem dependência espacial, ocorrendo de forma aleatória na lavoura. Apenas para Mg observa-se índice de dependência espacial (IDE), porém classificado como “fraco”, de acordo com a classificação sugerida por Cambardella et al. (1994). Já para densidade amostral de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , verificou-se índice de dependência espacial “forte”, para P, K, Ca e Mg; “moderado”, para N; e “fraco” apenas para S.

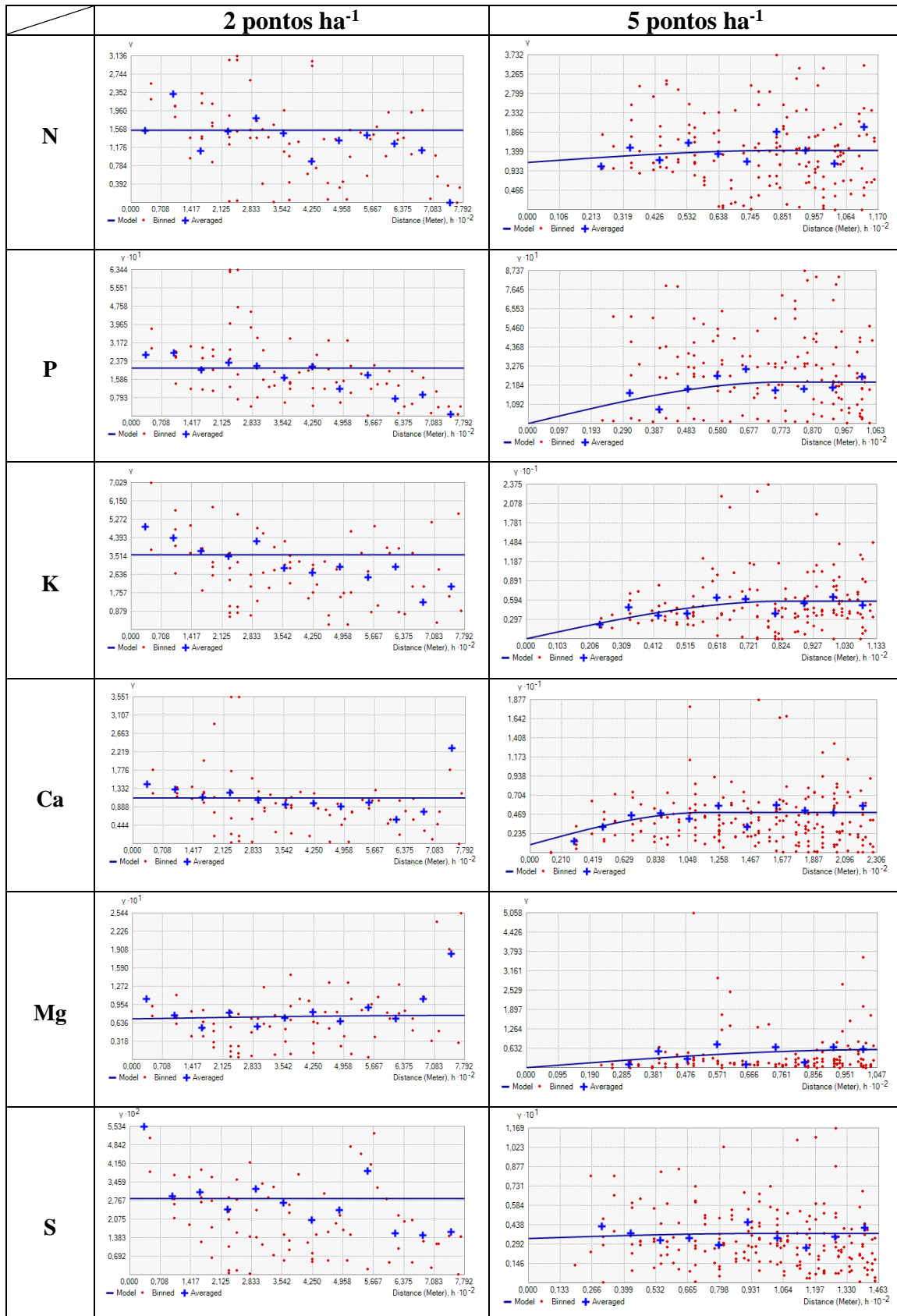
Os dados de IDA obtidos, quando comparados entre as duas densidades amostrais analisadas, demonstrou que a densidade amostral de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  foi superior à amostragem de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$  para os macronutrientes foliares avaliados, utilizando-se a metodologia proposta por Ferraz (2012).

Assim, constata-se que, sob a maior densidade amostral, a distribuição espacial dos macronutrientes não é aleatória, ou seja, tem alguma dependência espacial na lavoura. Isso torna propício, portanto, a utilização das técnicas da cafeicultura de precisão para diagnosticar essa variabilidade e propor soluções para sua correção localizada. Para tanto, a geração de mapas temáticos com informações georreferenciadas que identificam visualmente as zonas onde o manejo deve ser diferenciado é muito importante.

Os mapas temáticos e respectivos semivariogramas dos macronutrientes foliares do cafeeiro arábica, avaliados nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , estão ilustrados nas Figuras 10 e 11.



**Figura 10.** Mapas temáticos da distribuição espacial dos macronutrientes foliares: N; P; K; Ca; Mg e S, expressos em  $\text{g kg}^{-1}$ , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ .



**Figura 11.** Semivariogramas da distribuição espacial dos macronutrientes foliares: N; P; K; Ca; Mg e S, expressos em g kg<sup>-1</sup>, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.



#### 4.1.4 Micronutrientes foliares do cafeeiro arábica

Os dados obtidos dos atributos nutricionais micronutrientes do cafeeiro arábica apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade, e a análise estatística descritiva dos mesmos estão apresentados de acordo com a densidade amostral de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup> na Tabela 7.

**Tabela 7.** Estatística descritiva para os atributos nutricionais micronutrientes: Cu, Zn, Fe e Mn, expressos em mg kg<sup>-1</sup>, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	Mín.	Máx.	Méd.	D.P.	CV(%)	Assim.	K	K-S
2 pontos ha <sup>-1</sup>									
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	3,46	34,63	12,59	8,84	70,21	1,145	0,587	0,189
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	13,07	31,78	21,63	5,19	23,99	0,190	-0,860	0,109
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	34,97	268,14	96,46	58,40	60,54	1,675	2,945	0,204
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	14,15	99,08	59,40	23,52	39,60	0,177	-0,774	0,138
5 pontos ha <sup>-1</sup>									
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	1,73	65,80	13,66	11,66	85,36	1,962	5,457	0,181
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	12,77	65,65	21,60	7,71	35,69	3,215	16,216	0,137
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	11,65	443,02	113,54	86,08	75,81	2,183	5,097	0,236
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	14,15	125,82	60,28	20,56	34,11	0,551	0,455	0,111

Atb. = atributo; Und. = unidade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Méd. = média; D.P. = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; K = curtose; K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov.

A partir dos teores de micronutrientes obtidos nas análises foliares de amostras georreferenciadas, coletadas na área experimental, foi possível realizar diagnóstico da condição nutricional da lavoura nas duas densidades amostrais analisadas. Considerando as práticas da cafeicultura convencional, que trabalha com as médias amostrais, e analisando os teores médios dos micronutrientes Cu, Zn, Fe e Mn, verifica-se que, independente da densidade amostral, seus teores foliares são classificados, respectivamente, como “adequado”, “alto”, “adequado” e “marginal”. Sob essa ótica de diagnose e interpretação, decisões de adubação podem ser subestimadas ou superestimadas, podendo ocasionar mais desequilíbrios no fornecimento desses nutrientes. Assim, a cafeicultura de precisão pode localizar as zonas de suficiência e deficiência de micronutrientes, propondo estratégias de correção localizadas.

Os teores foliares de Cu revelaram pela amostragem feita, sob densidades de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, que os valores mínimos são classificados como “deficiente” e os valores máximos como “excessivo”. O coeficiente de variação foi considerado “alto” para ambas as densidades amostrais (70,21% e 85,36%) (Tabela 7). Segundo Prado (2008), a menor disponibilidade de cobre nas plantas está relacionada ao maior teor de matéria orgânica do solo. A toxidez é mais provável de se ocorrer que a deficiência, devido ao

uso de fungicidas cúpricos no programa de controle da ferrugem em lavouras cafeeiras (Martinez e Neves, 2015).

Para o micronutriente Zn, sob amostragem de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , os valores mínimos são classificados como “adequado” e os valores máximos como “excessivo”, conforme Malavolta (2006) propõe para o cafeeiro arábica. O CV foi considerado “médio” (23,99% e 35,69%) para ambas densidades amostrais (Tabela 7). Constata-se, sob as amostragens realizadas, que não há deficiência deste elemento nas plantas na área experimental. Entretanto, é necessário o monitoramento da situação nutricional, em razão do Zn ser um elemento muito exportado pelo café durante a colheita (Prado, 2008).

Considerando os teores foliares obtidos para o Fe, sob amostragem de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , os valores mínimos são classificados como “deficientes” e os valores máximos como “excessivos” (Tabela 7). Segundo Martinez e Neves (2015), a deficiência de Fe pode ocorrer quando se empregam doses elevadas de calcário ou em condições de calagem incipiente e excesso de Mn. O CV do Fe foi classificado como “alto”.

Quanto ao Mn, os teores foliares demonstram, pelos valores mínimos, haver zonas todas como “deficientes” e pelos valores máximos a existência de zonas com teores classificados como “marginais”, conforme Malavolta (2006), sob a densidade amostral de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$ . Os dados obtidos sob a densidade amostral de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  apresentaram valores mínimos também classificados como “deficientes” e valores máximos classificados como “adequados”. O CV para os teores foliares de Mn, obtidos em ambas as densidades amostrais, foi considerado “médio” (39,60% e 34,11%) (Tabela 7). Porém, a maior densidade amostral conseguiu detectar maior amplitude dos teores foliares de Mn. Segundo Martinez e Neves (2015), o Mn é o micronutriente mais acumulado no cafeeiro, após o Fe, e sua deficiência se associa a pH e matéria orgânica elevados.

Constatou-se, portanto, deficiência nutricional para Cu, Fe e Mn em pontos amostrais analisados sob as duas densidades. Demonstra-se, com isso, a inviabilidade de amostragem convencional para análise de micronutrientes, visto que, sob os princípios da amostragem georreferenciada, os valores foram extremos, desde deficientes até excessivos. Segundo Martinez et al. (2003), de modo geral, os solos adequados à cafeicultura normalmente apresentam baixa disponibilidade de alguns micronutrientes.

Os dados de IDA obtidos demonstram que, comparativamente, a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup> foi superior à amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup> para micronutrientes foliares avaliados, utilizando-se a metodologia proposta por Ferraz (2012). As exigências nutricionais de micronutrientes pelo cafeeiro são específicas e o diagnóstico de seu estado nutricional é indispensável no sistema intensivo de produção. A cafeicultura tecnicamente produtiva requer equilíbrio nutricional para garantir a produção e os micronutrientes se tornam essenciais nesse propósito. A magnitude e a estrutura da dependência espacial dos micronutrientes em estudo, baseando-se na densidade amostral de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos nutricionais micronutrientes: Cu, Zn, Fe e Mn, expressos em mg kg<sup>-1</sup>, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	A	IDE	IDA	
2 pontos ha <sup>-1</sup>								
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	59,980	5,13	65,110	160,35	0,921	fraco	0,49
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	16,960*	0,000	16,960	779,18	1,000	-	-
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	1,220*	0,000	1,220	779,18	1,000	-	-
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	302,98*	0,000	302,980	779,18	1,000	-	-
5 pontos ha <sup>-1</sup>								
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	100,352	9,879	110,231	113,74	0,910	fraco	0,58
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	0,000	53,876	53,876	78,46	0,000	forte	0,92
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	1,783	1,711	3,494	78,46	0,510	moderado	0,77
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	68,177	269,900	338,077	78,46	0,202	forte	0,86

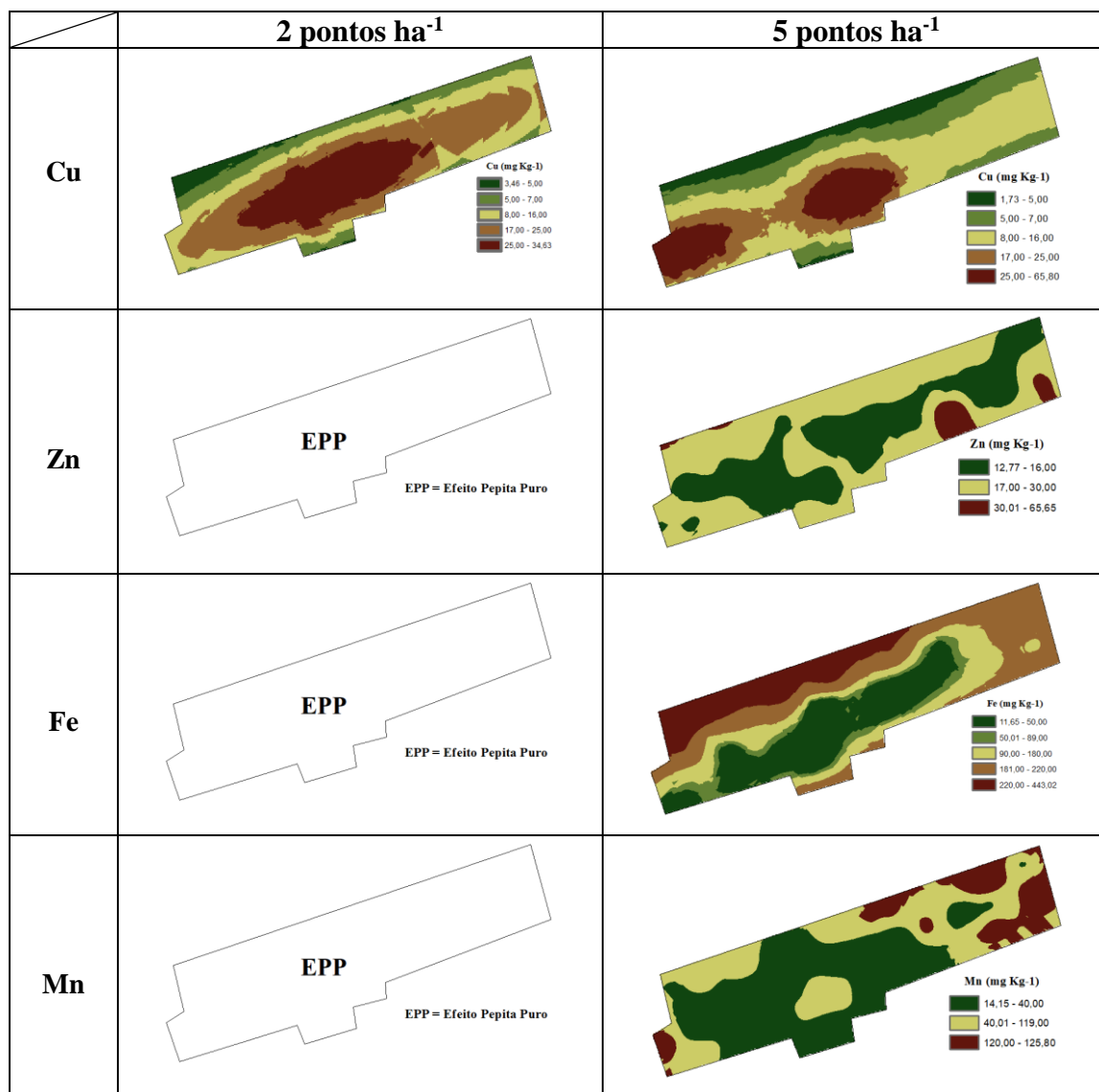
Atb = atributo; Und. = unidade; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>1</sub>: contribuição; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; A = alcance; IDE = índice de dependência espacial; IDA = indicador de densidade amostral; \*EPP = Efeito Pepita Puro.

Na avaliação dos dados da amostragem em densidade de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, os micronutrientes Zn, Fe e Mn apresentaram efeito pepita (C<sub>0</sub>) puro, ou seja, não tem dependência espacial, ocorrendo de forma aleatória na lavoura. O índice de dependência espacial (IDE) para o micronutriente Cu, sob menor densidade, foi classificado como “fraco”, de acordo com Cambardella et al. (1994). Assim, sua ocorrência se dá de forma aleatória. O alcance do Cu foi de 160,35 m, enquanto para Zn, Fe e Mn situou-se em 779,18 m. Para a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, verificou-se IDE “fraco” para Cu; “forte” para Zn e Mn; e “moderado” para Fe, conforme proposta de Cambardella et al. (1994). Observou-se alcance de 78,46 m para Zn, Fe e Mn; e 113,74 m para Cu (Tabela 8).

Constatou-se que, sob maior densidade amostral, a distribuição espacial dos micronutrientes Cu, Zn, Fe e Mn não é aleatória, apresentando dependência localizada. Essa amostragem identifica mais precisamente as variações existentes na lavoura

cafeeira. Isso favorece, portanto, a utilização das técnicas da cafeicultura de precisão para diagnosticar e propor adubações mais assertivas, permitindo prescrever de forma mais precisa a fonte, a dosagem e a aplicação de fertilizantes contendo estes micronutrientes.

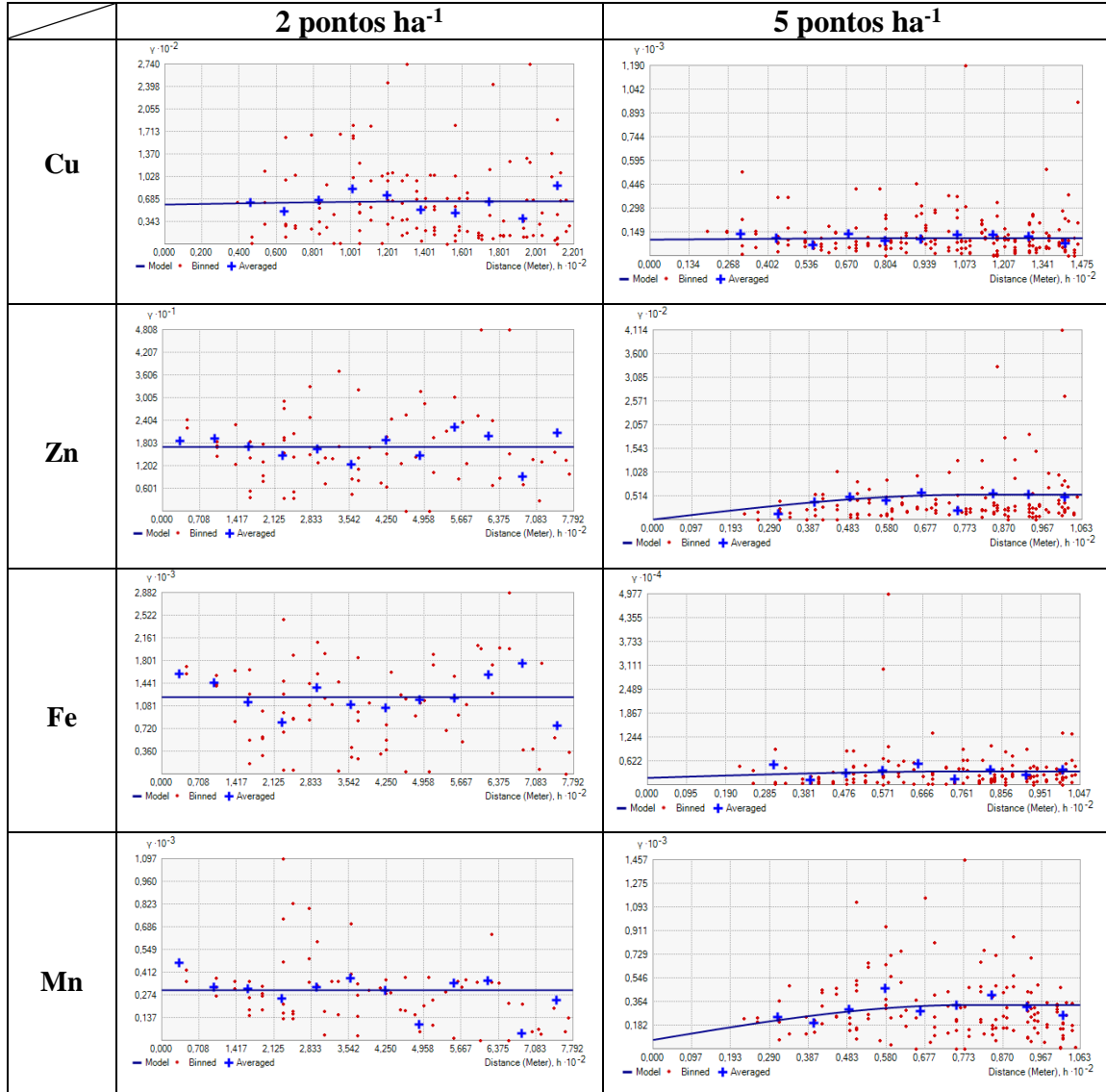
Os mapas temáticos e respectivos semivariogramas dos micronutrientes foliares do cafeeiro arábica, avaliados nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , estão ilustrados nas Figuras 12 e 13.



**Figura 12.** Mapas temáticos da distribuição espacial dos micronutrientes foliares: Cu; Zn; Fe e Mn, expressos em  $\text{mg kg}^{-1}$ , em densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ .

Os mapas interpolados dos teores foliares de macronutrientes e micronutrientes demonstraram zoneamento mais adequado para amostragem de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , visto que, na densidade amostral de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , apenas os nutrientes Mg e Cu não apresentaram

efeito pepita puro, porém ambos demonstraram índice de dependência espacial fraco. Os mapas obtidos têm uma considerável importância para diagnosticar os locais com deficiência e excessos dos nutrientes avaliados.



**Figura 13.** Semivariogramas da distribuição espacial dos micronutrientes foliares: Cu; Zn; Fe e Mn, expressos em mg kg<sup>-1</sup>, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

#### 4.1.5 Atributos vegetativos do cafeeiro arábica

Os dados da análise estatística descritiva dos atributos vegetativos do cafeeiro arábica, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, estão apresentados na Tabela 9. Os dados dos atributos vegetativos do cafeeiro arábica obtidos apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade.

**Tabela 9.** Estatística descritiva para os atributos vegetativos de altura de planta (ALTU) (m), diâmetro da copa (DCOP) (m), diâmetro do caule (DCAU) (mm) e enfolhamento (ENFO) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	Mín.	Máx.	Méd.	D.P.	CV(%)	Assim.	K	K-S
2 pontos ha <sup>-1</sup>									
ALTU	m	1,85	2,60	2,25	18,55	8,24	-0,066	-0,367	0,092
DCOP	m	1,45	1,92	1,68	12,98	7,72	-0,175	-0,846	0,100
DCAU	mm	40,84	64,64	51,08	5,09	9,96	0,535	1,369	0,101
ENFO	-	3,00	5,00	4,43	0,72	16,25	-0,960	-0,316	0,328
5 pontos ha <sup>-1</sup>									
ALTU	m	1,49	2,60	2,25	21,69	85,36	9,64	-0,956	1,198
DCOP	m	1,28	2,50	1,72	17,52	35,69	10,18	1,173	5,434
DCAU	mm	34,49	64,64	51,26	5,20	75,81	10,14	-0,497	1,142
ENFO	-	3,00	5,00	4,28	0,80	34,11	18,69	-0,592	-1,204

Atb. = atributo; Und. = unidade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Méd. = média; D.P. = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; K = curtose; K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov.

A média do atributo altura de plantas para as densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup> foi de 2,25 m. As plantas maiores da lavoura experimental foram detectadas em ambas as amostragens, porém a amostragem mais densa identificou áreas da lavouras com cafeeiros menos desenvolvidos (1,49 m), quando comparada à amostragem menos densa (1,85 m). O CV, para ambos, foi de 8,24 e 9,64%, ou seja, “baixo”.

Para o atributo diâmetro da copa, a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup> revelou valores que variaram de 1,45 a 1,92 m, com média de 1,68 m. Para a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, o diâmetro da copa médio foi de 1,72 m e detectou plantas com menor diâmetro (1,28 m) e na menor densidade amostral (Tabela 9). Segundo Ferraz et al. (2017), a altura de plantas e diâmetro da copa são importantes características indicativas do desenvolvimento do cafeeiro e estão intimamente relacionadas ao manejo imposto à lavoura. Esses autores encontraram valores médios de altura de 1,94 m e de diâmetro de copa de 1,75 m.

Para o atributo vegetativo diâmetro do caule, constatou-se valores mínimos de 40,84 mm, máximos de 64,64 mm e valores médios de 51,08 mm para densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup>. Para a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, o menor diâmetro

encontrado foi de 34,49 mm e o maior de 64,64 mm. Valores médios de diâmetro do caule, na maior densidade amostral, situaram-se em 51,26 mm. Estes valores indicam claramente que a amostragem mais densa identificou plantas menos desenvolvidas, o que normalmente se correlaciona com menores produtividades (Tabela 9). Segundo Miranda et al. (2005), o diâmetro de caule, juntamente com altura de planta, correlacionou-se positivamente com o aumento da produtividade do cafeeiro.

O enfolhamento apresentou valores médios de 4,43 e 4,28, para as respectivas densidades amostrais, conforme escala visual proposta por Boldini (2001), demonstrando que as plantas da lavoura apresentaram significativa presença de folhas. O CV foi de 16,25% para a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup> e de 18,69% para a amostragem de 5 pontos ha<sup>-1</sup> (Tabela 9). Jacintho (2016) encontrou em seu trabalho um coeficiente de variação baixo (3,67%) para o atributo enfolhamento. Segundo Matiello et al. (2016), a manutenção de um bom enfolhamento nos ramos da planta é condição primária para que o cafeeiro produza reservas necessárias à produção de frutos.

A identificação da variabilidade espacial desses atributos e seu consequente mapeamento podem colaborar com os cafeicultores na identificação de distorções de crescimento que estão ocorrendo em campo, de forma a possibilitar sua correção (Ferraz, 2012). Assim, faz-se necessário identificar a exata localização de onde se encontram os valores que variaram desde os mínimos até os máximos. Nesse contexto, a partir da análise geoestatística, é possível quantificar a magnitude e a estrutura da dependência espacial dos atributos vegetativos do cafeeiro arábica em estudo. Baseando-se nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial pelo semivariograma (Tabela 10).

**Tabela 10.** Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos altura de planta (ALTU) (m), diâmetro da copa (DCOP) (m), diâmetro do caule (DCAU) (mm) e enfolhamento (ENFO) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	A	IDE	IDA
2 pontos ha <sup>-1</sup>							
ALTU	m	155,123*	0,000	155,123	779,18	1,000	-
DCOP	m	63,068*	0,000	63,068	779,18	1,000	-
DCAU	mm	13,466*	0,000	13,466	779,18	1,000	-
ENFO	-	0,240	0,032	0,272	779,18	0,882	fraco 0,51
5 pontos ha <sup>-1</sup>							
ALTU	m	0,000	259,670	259,670	75,97	0,000	forte 0,83
DCOP	m	60,759	220,921	281,679	78,46	0,216	forte 0,87
DCAU	mm	0,000	14,384	14,384	78,46	0,000	forte 0,86
ENFO	-	0,149	0,422	0,571	85,84	0,261	forte 0,80

Atb = atributo; Und. = unidade; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>1</sub>: contribuição; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; A = alcance; IDE = índice de dependência espacial; IDA = indicador de densidade amostral; \*EPP = Efeito Pepita Puro.

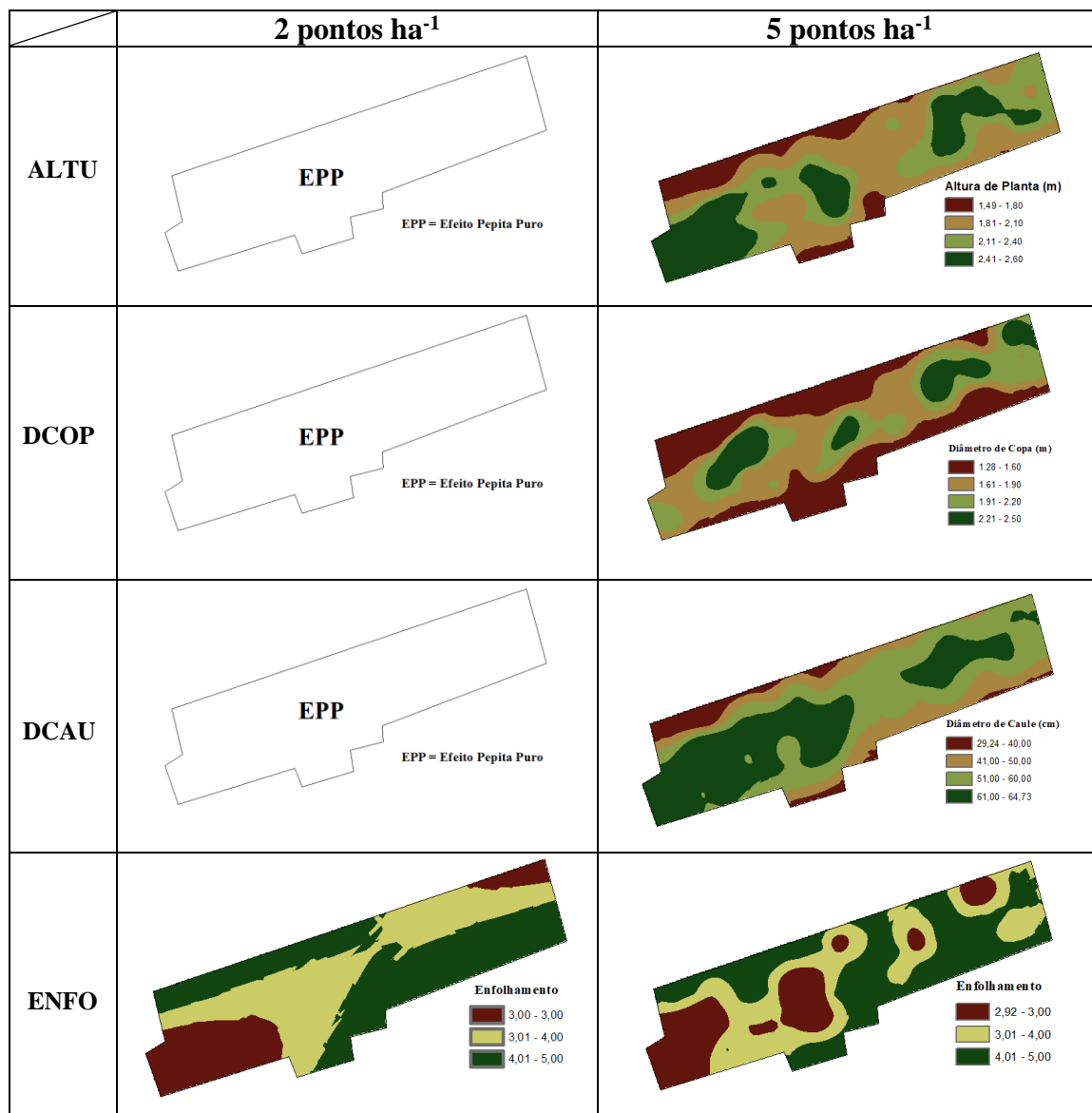
Na avaliação dos dados da amostragem em densidade de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , os atributos de altura de plantas, diâmetro da copa, diâmetro do caule apresentaram efeito pepita ( $C_0$ ) puro. Verifica-se que os valores de alcance são bastante elevados para todos eles (779,18 m), ou seja, há grande distância dentro da qual as amostras poderiam ser correlacionadas espacialmente (Tabela 10). Conforme Ferraz et al. (2017), o planejamento de uma amostragem de planta na área que contemplasse a variabilidade espacial existente de uma determinada variável ou mesmo de múltiplas variáveis, teria que levar em conta o valor do alcance, buscando-se definir uma malha cuja distância seja menor que o menor valor de alcance encontrado. Segundo Melo et al. (2017), a amostragem em malhas possui viabilidade agrônômica, contudo, eleva consideravelmente os custos para cafeicultura. Entretanto, a redução do número de pontos de amostragem nas malhas inviabiliza a geoestatística por não determinar a dependência espacial dos fatores em estudo.

Para os dados da amostragem em densidade de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , todos os atributos vegetativos avaliados apresentaram IDE classificado como “forte”. Os valores de alcance para altura de planta, diâmetro da copa, diâmetro do caule e enfolhamento foram de 75,97; 78,46; 78,46 e 85,84 m, respectivamente (Tabela 10). Ferraz et al. (2017b) encontraram alcance de 53,07 m para altura de planta e 99,60 m para enfolhamento.

Os dados do indicador de densidade amostral obtidos demonstram que a densidade amostral de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  também foi superior à amostragem de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$  para os atributos vegetativos do cafeeiro arábica, utilizando-se a metodologia proposta por Ferraz (2012). A maior densidade amostral se apresentou, portanto, mais confiável para amostragem dos atributos vegetativos do cafeeiro arábica, permitindo identificar distorções no desenvolvimento da planta.

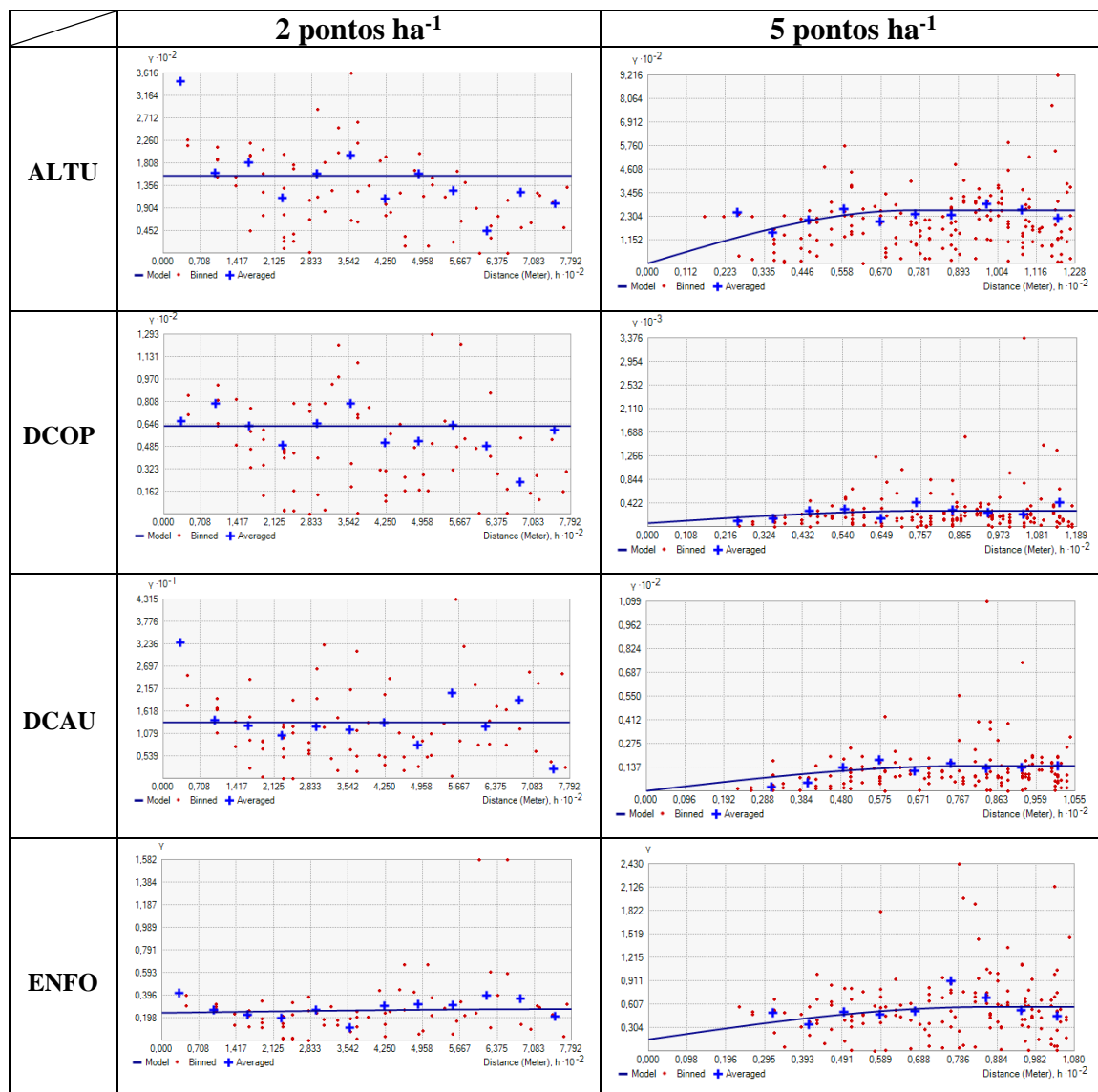
Os mapas temáticos e respectivos semivariogramas dos atributos vegetativos do cafeeiro arábica, nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , estão ilustrados nas Figuras 14 e 15.





**Figura 14.** Mapas temáticos da distribuição espacial de altura de planta (ALTU), diâmetro da copa (DCOP), diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

Os mapas com pontos interpolados, obtidos na densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, mostrou-se mais condizente com a realidade encontrada em campo, em relação à amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, sendo capaz de proporcionar um melhor gerenciamento das práticas de manejo a serem empregadas nas zonas específicas. Os resultados apresentados visualmente na Figura 14 evidenciam que a densidade amostral é de fato fundamental para a correta aplicação das técnicas de cafeicultura de precisão.



**Figura 15.** Semivariogramas da distribuição espacial de altura de planta (ALTU), diâmetro da copa (DCOP), diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

#### 4.1.6 Atributos produtivos do cafeeiro arábica

A análise estatística descritiva dos atributos produtivos do cafeeiro arábica, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, estão apresentados na Tabela 11. Os dados de produtividade e índice de maturação do cafeeiro arábica obtidos apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade.

**Tabela 11.** Estatística descritiva para os atributos produtivos de produtividade 2019 (PROD19) (L planta<sup>-1</sup>), índice de maturação 2019 (IMAT19) (%), produtividade 2020 (PROD20) (L planta<sup>-1</sup>) e índice de maturação 2020 (IMAT20) (%) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	Mín.	Máx.	Méd.	D.P.	CV(%)	Assim.	K	K-S
2 pontos ha <sup>-1</sup>									
PROD19	L planta <sup>-1</sup>	0,11	3,94	1,79	1,15	64,65	0,130	-1,068	0,160
IMAT19	%	41,53	82,62	67,22	12,19	18,13	-0,922	-0,462	0,227
PROD20	L planta <sup>-1</sup>	0,13	4,33	1,55	1,19	76,77	0,823	0,152	0,139
IMAT20	%	31,87	83,30	53,99	12,78	23,67	0,217	-0,047	0,081
5 pontos ha <sup>-1</sup>									
PROD19	L planta <sup>-1</sup>	0,09	4,80	2,08	1,30	62,50	0,045	-0,991	0,113
IMAT19	%	13,49	85,71	68,30	14,29	20,92	-1,927	4,192	0,219
PROD20	L planta <sup>-1</sup>	0,06	4,33	1,68	1,13	67,26	0,694	-0,093	0,101
IMAT20	%	19,97	83,30	51,51	12,66	24,58	0,358	0,847	0,111

Atb. = atributo; Und. = unidade; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Méd. = média; D.P. = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; K = curtose; K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov.

A análise de variância dos atributos produtivos mensurados também apresentou variação entre os dados, conforme a densidade amostral e ano da safra cafeeira. Verificou-se produtividade média de 1,79 L planta<sup>-1</sup> para a menor densidade amostral e de 2,08 L planta<sup>-1</sup> para a maior densidade de amostragem na safra de 2019. Para a safra do ano de 2020, os dados médios foram de 1,55 L planta<sup>-1</sup> para a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup> e de 1,68 L planta<sup>-1</sup> para a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup> (Tabela 11). Ferraz et al. (2017b) encontraram produtividade média na área experimental de 4,21 L planta<sup>-1</sup>. Os CV's, para ambas as densidades nas duas safras foi "alto".

Em relação ao índice de maturação, o percentual médio foi de 67,22% e de 68,30% na safra de 2019; e 53,99% e 51,51% na safra de 2020, para as densidades de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 11). Entretanto, pela análise dos dados mínimos e máximos, nas duas safras e nas duas densidades amostrais avaliadas, detectou-se que existem áreas com pequeno percentual de frutos maduros e outras com percentual elevado. Isso evidencia a importância do estudo da variabilidade espacial do índice de maturação no gerenciamento da colheita dos frutos maduros do cafeeiro. Segundo Silva et al. (2006), o índice de maturação favorece a definição do período de colheita da lavoura. Esses autores consideram que, quando o talhão apresenta IMAT de 75-80% (20-25% de frutos verdes), está no início da colheita. Ferraz et al. (2017b) encontraram em seu experimento valor médio de índice de maturação de frutos de café da ordem de 66,89%. Os CV's, para ambas as densidades nas duas safras, foram classificados como "médio".

A partir da análise geoestatística, quantificou-se pelo semivariograma a magnitude e a estrutura da dependência espacial dos atributos produtivos em estudo, baseando-se na densidade amostral de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup> (Tabela 12).

**Tabela 12.** Parâmetros estimados pelo semivariograma experimental e indicador de densidade amostral dos atributos produtivos de produtividade 2019 (PROD19) (L planta<sup>-1</sup>), índice de maturação 2019 (IMAT19) (%), produtividade 2020 (PROD20) (L planta<sup>-1</sup>) e índice de maturação 2020 (IMAT20) (%) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atb.	Und.	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	A	IDE	IDA
2 pontos ha <sup>-1</sup>							
PROD19	L planta <sup>-1</sup>	0,573*	0,000	0,573	779,18	1,000	-
IMAT19	%	67,456*	0,000	67,456	779,18	1,000	-
PROD20	L planta <sup>-1</sup>	0,824	0,087	0,911	779,18	0,905	fraco
IMAT20	%	37,671	58,260	95,930	168,18	0,393	moderado
5 pontos ha <sup>-1</sup>							
PROD19	L planta <sup>-1</sup>	0,530	0,334	0,864	74,80	0,613	moderado
IMAT19	%	122,083	23,484	145,567	182,54	0,839	moderado
PROD20	L planta <sup>-1</sup>	0,374	0,470	0,844	78,46	0,443	moderado
IMAT20	%	47,805	75,177	122,982	78,46	0,389	moderado

Atb = atributo; Und. = unidade; C<sub>0</sub> = efeito pepita; C<sub>1</sub>: contribuição; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; A = alcance; IDE = índice de dependência espacial; IDA = indicador de densidade amostral; \*EPP = Efeito Pepita Puro.

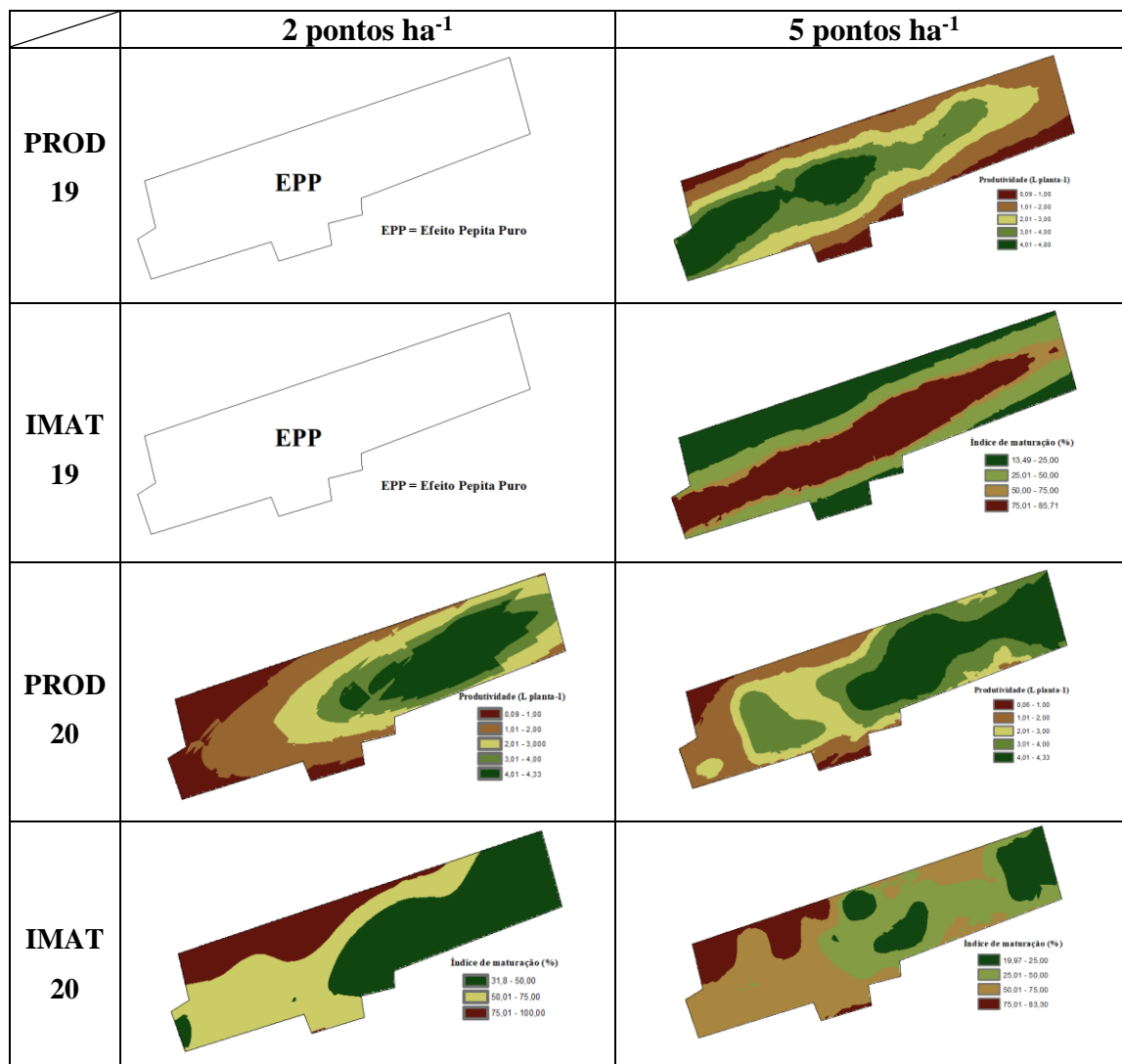
Na avaliação dos dados da amostragem em densidade de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, os atributos de produtividade 2019 e índice de maturação 2019 apresentaram efeito pepita (C<sub>0</sub>) puro. O índice de dependência espacial (IDE), para os atributos PROD19, IMAT19 e PROD20, foi classificado como “fraco”. Verifica-se que os valores de alcance para esses atributos são bastante elevados (779,181 m), ou seja, há grande distância dentro da qual as amostras poderiam ser correlacionadas espacialmente. Para o atributo de IMAT20, obteve-se classificação de “moderado” e seu valor de alcance foi menor que os demais, atingindo 168,180 m (Tabela 12).

Para os dados da amostragem em densidade de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, todos os atributos produtivos apresentaram índice de dependência espacial “moderado”, o que demonstra ser esta densidade amostral capaz de identificar dependência dos atributos avaliados na área, ou seja, sua distribuição no espaço não é aleatória. O alcance encontrado foi de 74,80 m (PROD19), 182,54 m (IMAT19) e 78,46 m (PROD20 e IMAT20) (Tabela 12). Silva et al. (2007) concluíram em seu trabalho que existiu variabilidade espacial da produtividade do cafeeiro, e que a dependência espacial desta variável foi considerada “forte”. Silva et al. (2008) também encontraram uma forte dependência espacial para a produtividade do cafeeiro em duas safras agrícolas.

A identificação da localização das regiões de alto e baixo potencial produtivo do café proporciona o benefício de adotar estratégias de manejo localizado. Fato característico relacionado ao cafeeiro arábica é a sua bienalidade de produção, que pode ser considerada como sendo o fenômeno da alternância de grandes e pequenas produções na planta e na lavoura ao longo das safras. É sabido pela literatura especializada que essa alternância bienal de produção é típica da fisiologia do *C. arabica*, que necessita vegetar em um ano para produzir bem na safra seguinte. Em anos de alta carga pendente, a planta direciona seus fotoassimilados para produção dos frutos. Nos anos de baixa carga pendente, estes são direcionados à formação de novas gemas vegetativas que gerarão novos ramos produtivos. Os dados obtidos indicam a ocorrência dessa bienalidade na área experimental, também demonstrado através do mapeamento.

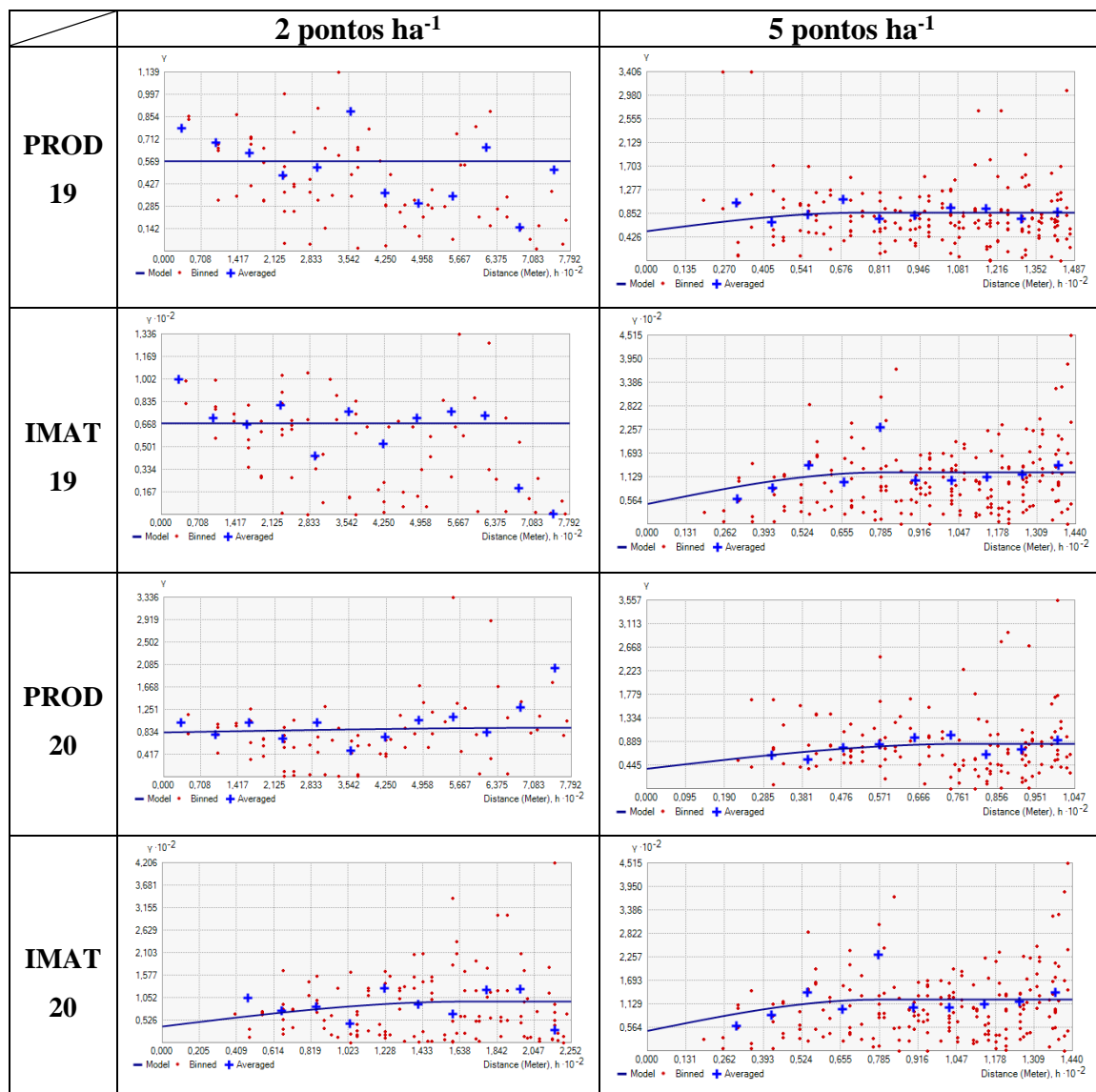
Os dados de IDA, relacionados aos atributos produtivos do cafeeiro arábica, demonstraram que a densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup> foi superior à amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup>. Considera-se que este indicador denota ser capaz de complementar as demais informações geoestatísticas através desse índice e, dessa forma, contribuir com mais informações para a cafeicultura de precisão.

Os mapas temáticos e respectivos semivariogramas dos atributos produtivos do cafeeiro arábica, nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>, estão ilustrados nas Figuras 16 e 17.



**Figura 16.** Mapas temáticos da distribuição espacial de produtividade 2019 (PROD19), índice de maturação 2019 (IMAT19), produtividade 2020 (PROD20) e índice de maturação 2020 (IMAT20) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

Os mapas temáticos de atributos produtivos do cafeeiro arábica dos anos de 2019 e 2020, analisados sob maior densidade amostral, também demonstraram visualmente um maior detalhamento de zonas específicas, tanto de produtividade quanto de regiões, com maior índice de maturação dos frutos. Evidencia-se, nos mapas de produtividade 2019 e 2020, a ocorrência de bienalidade produtiva do cafeeiro. Segundo Figueiredo (2016), os mapas apresentam informações completares para visualizar a variabilidade espacial dos fatores de produção das lavouras cafeeiras.



**Figura 17.** Semivariogramas da distribuição espacial de produtividade 2019 (PROD19), índice de maturação 2019 (IMAT19), produtividade 2020 (PROD20) e índice de maturação 2020 (IMAT20) em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

#### 4.2 Correlação espacial entre atributos de solo e planta com atributos produtivos do cafeeiro arábica

A produção do cafeeiro arábica é resultante da interação de diversos fatores relacionados às condições edafoclimáticas, aos fatores genéticos e às práticas de manejo da cultura. Assim, correlacionar a produtividade do cafeeiro com os atributos de solo e planta é importante para auxiliar na identificação daqueles fatores que a influenciam e estabelecer tratos culturais apropriados em função das zonas de manejo da lavoura.

A análise de correlação entre os atributos químicos do solo, nutricionais e vegetativos das plantas de café com o desempenho produtivo do cafeeiro arábica foi realizada a fim de demonstrar o grau de associação existente entre eles. As matrizes de correlações dos atributos supracitados, com o fator produtividade nas safras de 2019 e 2020, estão apresentadas em tabelas específicas.

A tabela 13 apresenta os dados de coeficiente de correlação espacial entre atributos químicos do solo (pH, P, K, Ca, Mg e Al), na profundidade de 0-20 cm, com os atributos produtivos dos anos de 2019 e 2020, em densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>. A tabela 14 apresenta os dados de coeficiente de correlação espacial entre os demais atributos químicos do solo (H+Al, S.B., t, T, V e m) e a produtividade nas duas safras sob mesmas condições de amostragem. Já a tabela 15 apresenta os dados de coeficiente de correlação espacial entre atributos químicos do subsolo (pH, Ca, Al e m), na profundidade de 20-40 cm, com os atributos produtivos do cafeeiro arábica

As tabelas 16 e 17 apresentam, respectivamente, o coeficiente de correlação espacial entre os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e os micronutrientes (Cu, Zn, Fe e Mn), com a produtividade do cafeeiro nos anos de 2019 e 2020, nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

Finalmente, a tabela 18 apresenta a matriz de correlação dos atributos vegetativos de altura de plantas (ALTU), diâmetro da copa (DCOP), diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) com os atributos de produtividade em 2019 (PROD19), índice de maturação em 2019 (IMAT19), produtividade em 2020 (PROD20) e índice de maturação em 2020 (FCER20), nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>.



**Tabela 13.** Matriz de correlação espacial entre atributos químicos do solo: pH, P, K, Ca, Mg e Al, na profundidade de 0-20 cm, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atributo	pH	P	K	Ca	Mg	Al	PROD19	PROD20
2 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>pH</b>	1							
<b>P</b>	0,24049	1						
<b>K</b>	0,65111*	-0,04458	1					
<b>Ca</b>	0,43073*	-0,51877*	0,65960*	1				
<b>Mg</b>	0,85942*	0,36704	0,70561*	0,23945	1			
<b>Al</b>	-0,28483	-0,45066*	-0,16975	0,30822	-0,65834	1		
<b>PROD19</b>	0,69311*	-0,27533	0,72567*	0,82379*	0,39375*	0,31876	1	
<b>PROD20</b>	0,16441	-0,12816	-0,16983	0,16335	0,07591	-0,18848	0,10003	1
5 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>pH</b>	1							
<b>P</b>	0,73221*	1						
<b>K</b>	0,33741*	0,21508	1					
<b>Ca</b>	0,54254*	0,28069*	0,51167*	1				
<b>Mg</b>	0,38380*	0,41179*	0,04924	0,26503*	1			
<b>Al</b>	-0,21093	-0,10889	-0,31105*	-0,28832*	0,1302	1		
<b>PROD19</b>	0,55193*	0,65046*	-0,22153	-0,06188	0,32086*	-0,04595	1	
<b>PROD20</b>	-0,18653	-0,11805	-0,39576*	-0,37754*	-0,19178	-0,13994	0,16097	1

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

**Tabela 14.** Matriz de correlação espacial entre atributos químicos do solo: H+Al, SB, t, T, V e m, na profundidade de 0-20 cm, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atributo	H + Al	SB	t	T	V	m	PROD19	PROD20
2 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>H + Al</b>	1							
<b>SB</b>	-0,68696*	1						
<b>t</b>	0,45991*	0,30338	1					
<b>T</b>	0,45991*	0,30338	1,00000	1				
<b>V</b>	-0,97355*	0,82821*	-0,26628	-0,26628	1			
<b>m</b>	0,47021*	-0,55624*	-0,08789	-0,08789	-0,53402*	1		
<b>PROD19</b>	-0,37558	0,75162*	0,43345*	0,43345*	0,51385*	-0,46563*	1	
<b>PROD20</b>	-0,58834*	-0,00224	-0,77974*	-0,77974*	0,4602*	-0,21851	0,10003	1
5 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>H + Al</b>	1							
<b>SB</b>	-0,66853*	1						
<b>t</b>	0,38277*	0,43004*	1					
<b>T</b>	0,38277*	0,43004*	1,00000	1				
<b>V</b>	-0,46016*	0,02546	-0,52502*	-0,52502*	1			
<b>m</b>	0,36277*	-0,04693	0,39217*	0,39217*	-0,45136*	1		
<b>PROD19</b>	-0,25947*	0,32241*	0,09774	0,09774	-0,18046	-0,04595	1	
<b>PROD20</b>	-0,07000	-0,28364*	-0,43957*	-0,43957*	0,25715*	-0,13994	0,16097	1

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

**Tabela 15.** Matriz de correlação espacial entre os atributos químicos do subsolo: pH, Ca, Al e m, na profundidade de 20-40 cm, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atributo	pH	Ca	Al	m	PROD19	PROD20
2 pontos ha <sup>-1</sup>						
<b>pH</b>	1					
<b>Ca</b>	0,89885*	1				
<b>Al</b>	-0,61709*	-0,69467*	1			
<b>m</b>	-0,77651*	-0,87540*	0,93351*	1		
<b>PROD19</b>	0,55892*	0,75687*	-0,21336	-0,46563*	1	
<b>PROD20</b>	0,41531*	0,26050	-0,14912	-0,21851	0,10003	1
5 pontos ha <sup>-1</sup>						
<b>pH</b>	1					
<b>Ca</b>	0,82928*	1				
<b>Al</b>	-0,78681*	-0,63585*	1			
<b>m</b>	-0,79218*	-0,62901*	0,94860*	1		
<b>PROD19</b>	0,19385	0,33374*	0,00694	0,04127	1	
<b>PROD20</b>	0,22565	0,24519*	-0,12514	-0,06707	0,16097	1

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

**Tabela 16.** Matriz de correlação espacial entre os macronutrientes foliares: N, P, K, Ca, Mg e S, com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atributo	N	P	K	Ca	Mg	S	PROD19	PROD20
2 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>N</b>	1							
<b>P</b>	-0,22772	1						
<b>K</b>	0,77578*	-0,53997*	1					
<b>Ca</b>	-0,6588*	-0,25423	-0,21139	1				
<b>Mg</b>	-0,57108*	-0,12591	-0,28325	0,91893*	1			
<b>S</b>	0,06542	-0,42981*	0,64947*	0,47714*	0,2781	1		
<b>PROD19</b>	0,56865*	0,46534*	0,12694	0,57074*	0,23609	0,37153	1	
<b>PROD20</b>	0,25941	0,23162	0,39943*	0,39012*	0,32356	0,49413*	0,10003	1
5 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>N</b>	1							
<b>P</b>	-0,37234*	1						
<b>K</b>	0,06680	0,19843	1					
<b>Ca</b>	-0,25283*	-0,10654	-0,0455	1				
<b>Mg</b>	-0,20889	0,01946	0,04878	0,88682*	1			
<b>S</b>	-0,22656	0,33753*	0,32565*	0,34547*	0,32306*	1		
<b>PROD19</b>	0,57998*	-0,22153	-0,30574*	0,57881*	0,32236*	0,01566	1	
<b>PROD20</b>	0,28572*	-0,39576*	0,22616	0,43127*	0,28031*	0,44219*	0,16097	1

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

**Tabela 17.** Matriz de correlação espacial entre os micronutrientes foliares: Cu, Zn, Fe e Mn com a produtividade em 2019 (PROD19) e a produtividade em 2020 (PROD20) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

Atributo	Cu	Zn	Fe	Mn	PROD19	PROD20
2 pontos ha <sup>-1</sup>						
<b>Cu</b>	1					
<b>Zn</b>	-0,8969*	1				
<b>Fe</b>	-0,8281*	0,82012*	1			
<b>Mn</b>	-0,41975*	0,32767	0,3193	1		
<b>PROD19</b>	0,68378*	-0,41965*	-0,62788*	-0,29559	1	
<b>PROD20</b>	0,59865*	-0,76047*	-0,54017*	0,05908	0,10003	1
5 pontos ha <sup>-1</sup>						
<b>Cu</b>	1					
<b>Zn</b>	-0,42433*	1				
<b>Fe</b>	-0,72397*	0,35208*	1			
<b>Mn</b>	-0,34805*	0,28952*	0,22505	1		
<b>PROD19</b>	0,61848*	-0,54354*	-0,4435*	-0,23657	1	
<b>PROD20</b>	0,18945	-0,20463	-0,46615*	0,19584	0,16097	1

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

**Tabela 18.** Matriz de correlação espacial entre os atributos vegetativos de altura de plantas (ALTU), diâmetro da copa (DCOP), diâmetro do caule (DCAU) e enfolhamento (ENFO) com a produtividade em 2019 (PROD19), o índice de maturação em 2019 (IMAT19), a produtividade em 2020 (PROD20) e o índice de maturação em 2020 (FCER20) nas densidades amostrais de 2 e 5 pontos ha<sup>-1</sup>

<b>Atributo</b>	<b>ALTU</b>	<b>DCOP</b>	<b>DCAU</b>	<b>ENFO</b>	<b>PROD19</b>	<b>IMAT19</b>	<b>PROD20</b>	<b>IMAT20</b>
2 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>ALTU</b>	1							
<b>DCOP</b>	0,93381*	1						
<b>DCAU</b>	0,94265*	0,95792*	1					
<b>ENFO</b>	-0,84801*	-0,6635*	-0,80541*	1				
<b>PROD19</b>	0,89040*	0,95958*	0,98180*	-0,70327*	1			
<b>IMAT19</b>	0,79958*	0,80133*	0,66568*	-0,42840*	0,63388*	1		
<b>PROD20</b>	0,14454	0,28928	0,02341	0,30659	0,10003	0,52344*	1	
<b>IMAT20</b>	-0,22194	-0,21316	0,00831	-0,10879	0,03977	-0,64201*	-0,67771*	1
5 pontos ha <sup>-1</sup>								
<b>ALTU</b>	1							
<b>DCOP</b>	0,75342*	1						
<b>DCAU</b>	0,90145*	0,77947*	1					
<b>ENFO</b>	-0,53758*	-0,27719*	-0,63695*	1				
<b>PROD19</b>	0,73942*	0,66044*	0,73118*	-0,36846*	1			
<b>IMAT19</b>	0,28783*	0,29568*	-0,20947	0,03787	-0,58115*	1		
<b>PROD20</b>	0,66677*	0,68531*	0,83426*	-0,68935*	0,63837*	-0,08839	1	
<b>IMAT20</b>	0,29768*	0,54375*	0,24524*	0,18247	0,58208*	-0,76708*	0,16097	1

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

A correlação dos dados do solo e planta (nutricionais e vegetativos) com a produtividade do cafeeiro, analisada sob a densidade amostral de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, considerou na discussão os atributos que tiveram índice de dependência espacial “moderado”, sendo eles: H+Al; SB; t; T; V e Ca (solo 0-20 cm) e Ca, Al e m (subsolo 20-40 cm), visto que a maioria dos dados revelaram IDE “fraco” e “efeito pepita puro” (demonstrando aleatoriedade de sua ocorrência no espaço).

A produtividade do cafeeiro na safra colhida em 2019, quando analisada conjuntamente com os atributos do solo (0-20 cm) (Tabelas 13 e 14), apresentou correlação positiva “muito alta” com o Ca, “alta” com a soma de bases (SB) e com o índice de saturação por bases (V%) e “moderada” com t e T. A correlação foi negativa “moderada” com acidez potencial (H+Al). Considerando os atributos do subsolo, a produtividade nessa safra se correlaciona de forma “alta” e “muito alta” com o pH e o teor de Ca. A correlação é negativa “muito baixa” e “baixa” com Al e sua saturação (m). A análise desses dados permite inferir que os benefícios das práticas de calagem e gessagem contribuíram para tornar as condições do solo e subsolo mais propícias ao desenvolvimento do cafeeiro arábica. Há de se considerar que a safra de 2019, no contexto geral da área experimental, foi de bienalidade positiva.

Entretanto, independente do local, a produtividade do cafeeiro nessa safra apresenta correlações importantes com atributos relacionados à fertilidade do solo (pH, K, Ca e Mg), nutricionais (macronutrientes principalmente e Cu) e com os atributos vegetativos (altura, diâmetro de copa e diâmetro de caule). Miranda et al. (2005) verificaram correlações positivas da produtividade com caracteres vegetativos, e os atributos vegetativos que mais contribuíram para o aumento da produtividade foram o comprimento dos ramos plagiotrópicos, altura de planta e diâmetro de caule.

A safra colhida em 2020 apresentou a seguinte correlação de produtividade com os atributos do solo (0-20 cm): negativa “moderada” com H+Al, SB, t e T; e positiva “moderada” e “baixa” com V e Ca. Considerando o subsolo (20-40 cm) (Tabela 15), a correlação positiva se deu com pH (moderada) e Ca (baixa), e correlação negativa “muito baixa” e “baixa” com Al e m, respectivamente. Molin (2008) destaca que é comum encontrar baixa correlação entre produtividade e fatores isolados. Esse resultado pode ser explicado devido ao grande número de fatores envolvidos na produção das lavouras. A safra 2020 foi considerada, de maneira geral, como de bienalidade negativa.

O índice de maturação na safra 2019, sob amostragem de 2 pontos ha<sup>-1</sup>, apresentou correlação positiva “muito alta” com os atributos vegetativos de altura de plantas e diâmetro de copa e correlação positiva “alta” com o diâmetro de caule (Tabela 18). Na safra de 2020, a maturação dos frutos apresentou correlação negativa e positiva “baixa” e “muito baixa” com os atributos vegetativos de altura de plantas, diâmetro de copa, diâmetro de caule e enfolhamento. Essa ocorrência possivelmente está relacionada à bialidade negativa em que se encontrava a lavoura na respectiva safra.

Os dados de correlação espacial entre os atributos de solo e planta (nutricionais e vegetativos) com produtividade do cafeeiro, sob densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup>, foram analisados com a maioria deles, por terem apresentado predominantemente índice de dependência espacial moderado e forte, com visualização de zonas de manejo através dos mapas. Molin (2002) afirma que os mapas de produtividade são ferramentas importantes por permitirem visualizar a variabilidade espacial e estabelecer zonas de manejo. Segundo Almeida e Guimarães (2016), nas zonas de manejo pode-se estudar a interação desses atributos de maneira rápida, ou seja, observando um mapa final da interação dos atributos do solo e, a partir deles, podendo verificar as suas interações com outros atributos relacionados à atividade cafeeira.

Os resultados se mostram mais confiáveis, sob maior densidade amostral, no sentido de definir zonas de manejo, já que, como citado anteriormente, o índice de dependência espacial da maioria dos atributos tem se mostrado como moderado e forte. Em relação aos atributos químicos do solo (0-20cm) (Tabelas 13 e 14), a correlação foi positiva “moderada” para Mg e SB. Jacintho (2016) verificou correlação positiva dos atributos do solo e das características agrônômicas das plantas com a produtividade ao definir as zonas de manejo na cultura do cafeeiro. Porém, na safra colhida em 2020, a correlação se mostrou negativa para a maioria dos atributos, possivelmente influenciada pela bialidade. No subsolo (Tabela 15), o teor de Ca teve correlação “moderada”, enquanto com o pH foi “baixa”, comportamento observado em ambas as safras produtivas.

Na safra 2019, a produtividade avaliada sob maior densidade amostral foi positiva “alta” com os teores foliares de N e Ca (Tabela 16). Segundo Martinez et al. (2003), a composição mineral dos tecidos vegetais do cafeeiro é influenciada por uma série de fatores pertinentes à própria planta e também ao ambiente, influenciando na produtividade. Nessa mesma safra, os teores foliares de Mg se correlacionou positivamente com a produtividade de forma “moderada”. Apesar do IDE ter sido fraco



para pH do solo e teor de P (0-20cm), estes atributos tiveram correlação “alta” com a produtividade na safra 2019. Dados de análise da safra 2020 mostrou que a correlação de produtividade com N e Mg foi “baixa”, sendo “moderada” apenas com o elemento Ca. Quanto à interação entre nutrientes, Ca e Mg mostrou uma correlação positiva “muito alta” na amostragem de 5 pontos ha<sup>-1</sup>.

O micronutriente que mais contribuiu para a produtividade no ano de 2019 foi o Cu (Tabela 17), porém, na safra seguinte (2020), essa correlação foi “baixa”. Os demais micronutrientes (Zn, Fe e Mn) apresentaram correlações “baixas” e/ou negativas, devido, possivelmente, ao desequilíbrio nutricional constatado na lavoura, conforme dados interpretados pelas classes propostas para o cafeeiro arábica por Malavolta (2006). Um problema constatado nas regiões produtoras de café refere-se à variabilidade espacial e temporal da produtividade das plantas, sendo muito comum, nas lavouras cafeeiras, plantas sem produção ao lado de plantas produtivas, bem como a bienalidade da produção, caracterizada pela variação de anos com alta e baixa produção (Carvalho et al., 2004), que é influenciada pela nutrição mineral das plantas.

A correlação entre os atributos vegetativos e a produtividade do cafeeiro é caracteristicamente positiva, também sob maior densidade amostral (Tabela 18). Na safra de 2019, a altura de planta e diâmetro de caule se correlacionou de forma “muito alta” e com diâmetro de copa se correlacionou de forma “alta”. Esses atributos fitotécnicos, mesmo sob bienalidade negativa da safra colhida em 2020, também apresentou correlação positiva “alta” com altura de planta e diâmetro de copa, e “muito alta” com diâmetro de caule. Miranda et al. (2005) detectaram que o diâmetro de caule e a altura de planta correlacionaram-se positivamente com o aumento da produtividade do cafeeiro. Carvalho et al. (2004) também verificaram que existe correlação positiva dos caracteres vegetativos (diâmetro de caule, número e comprimento dos ramos plagiotrópicos, altura de plantas) entre si e entre eles e a produtividade inicial do cafeeiro arábica. Segundo Martinez et al. (2007), as características vegetativas do cafeeiro (altura de planta, diâmetro da copa, diâmetro do caule, número de ramos plagiotrópicos e índice de área foliar) explicaram de maneira satisfatória a variação na produtividade. E esses fatores vegetativos, por sua vez, são influenciados pela nutrição mineral das plantas. Abranches et al. (2019) constataram que a adubação nitrogenada aumentou o diâmetro do caule, a altura de planta, os teores de N e o índice relativo de clorofila nas folhas, assim como a produtividade de grãos.

Em relação ao índice de maturação nas duas safras colhidas (Tabela 18), este se correlaciona de forma “baixa” com a maioria dos atributos vegetativos avaliados (altura de plantas, diâmetro de caule, diâmetro de copa e enfolhamento), possivelmente explicado pelo fato desse processo ser fisiológico e determinado por fatores hormonais das plantas de café. Apesar de constatada correlação baixa, o índice de maturação constitui um parâmetro bastante difundido entre os cafeicultores, conforme relatado por Ferraz (2012), e indica sobre o início da colheita, tendo o estudo da variabilidade espacial importância considerável sobre onde e quando realizá-la. O conhecimento local da maior concentração de frutos maduros contribui para proporcionar uma colheita seletiva que, por sua vez, objetiva alcançar produção de café com qualidade de bebida superior e, conseqüentemente, maior valorização do produto. Segundo Santinato (2016), num mesmo talhão, poderá haver cafeeiros com baixas, moderadas e elevadas produtividades e quantidades variáveis de frutos verdes, cerejas e secos.

A maximização da produtividade do cafeeiro arábica depende de uma série de fatores que a influencia, sejam eles edafoclimáticos ou de manejo da lavoura. Dentre esses fatores, destaca-se sobremaneira, segundo Almeida e Guimarães (2017), a relação entre os nutrientes no solo. O excesso de um nutriente pode inibir a absorção do outro, por antagonismo ou pela competição dos sítios de absorção, e interferir na nutrição do cafeeiro (Novais et al., 2007). Observou-se, neste trabalho, que independentemente da densidade amostral utilizada, houve uma correlação “muito alta” entre Ca e Mg no solo (0-20 cm), e entre pH e os teores de Ca do subsolo (20-40 cm). Uma correlação “alta” foi constatada entre teores de Al e sua saturação (m%) na profundidade de 20-40 cm. Sabe-se que essas condições químicas são importantes para a manutenção de uma lavoura cafeeira produtiva. Entretanto, correlações negativas entre teores foliares de nutrientes revelaram que há desbalanço nutricional na lavoura amostrada, ainda mais característico sob maior densidade amostral, uma vez que os dados da estrutura e magnitude de distribuição espacial, para a maioria dos atributos de solo e planta, foram mais característicos sob densidade amostral de 5 pontos ha<sup>-1</sup> que 2 pontos ha<sup>-1</sup>.

Constatou-se que os dados de correlação da produtividade do cafeeiro arábica com a maioria dos atributos de solo e nutrição mineral variaram em função da safra, ou seja, possivelmente influenciado pela bianalidade de produção, e se correlacionam sobremaneira com os atributos vegetativos. A análise geral do experimento demonstrou que a variabilidade espacial dos atributos de solo e planta, bem como seu mapeamento e correlação espacial com a produtividade foi mais bem caracterizados sob maior

densidade amostral, considerando a ocorrência de aleatoriedade ou dependência espacial fraca na menor densidade amostral para a maioria dos atributos avaliados.

## 5 CONCLUSÕES

As técnicas da geoestatística mostraram-se aplicáveis no diagnóstico de atributos químicos do solo e vegetativos, nutricionais e produtivos do cafeeiro arábica.

A densidade amostral influenciou diretamente na identificação da estrutura e magnitude da distribuição espacial dos atributos químicos do solo e nutricionais, vegetativos e produtivos do cafeeiro arábica avaliados.

A densidade amostral de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  demonstrou ser mais favorável à identificação de padrões de dependência espacial e mapeamento dos atributos químicos do solo e nutricionais, vegetativos e produtivos do cafeeiro arábica, quando comparada à amostragem de 2 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , permitindo assim a identificação de zonas propícias a manejos agronômicos específicos. Sob essa maior densidade de amostragem, constatou-se que atributos do solo e da planta correlacionaram-se positivamente com a produtividade do cafeeiro arábica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abranches, J.L.; Soratto, R.P.; Perdoná, M.J.; Parecido, R.J. Resposta do cafeeiro arábica a doses de ureia revestida e convencional em solo arenoso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, e00767, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00767>.
- Almeida, L. da S., Guimarães, E.C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 195-203, 2016.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v11i2.1041>
- Almeida, L. da S.; Guimarães, E.C. Distribuição espacial da CTC e da relação dos macronutrientes em um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiro. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 26, n. 4, p. 625-639, 2017a.  
<https://doi.org/10.32929/2446-8355.2017v26n4p625-639>
- Almeida, L. da S.; Guimarães, E.C. Use of geostatistics sustainable management of galls nematoides of coffee tree. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 471-479, 2017b.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v12i4.1323>
- Alvarez V., V.H.; Novais, R.F. de; Barros, N.F. de; Cantarutti, R.B.; Lopes, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G.; Alvarez V., V.H. (Eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.: il cap. 5, p. 25-32.
- Alvarez V., V.H.; Guarçoni, A. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo de uma unidade de amostragem em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 297-310, 2003.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000200010>
- Alves, E.A.; Queiroz, D.M. de; Pinto, F. de A. de C. Cafeicultura de precisão. In: Zambolim, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 189-223.
- Alves, M. de C.; Silva, F.M. da. Aquisição e interpretação de dados em cafeicultura de precisão. In: Silva, F.M. da; Alves, F. de C. (Eds). **Cafeicultura de Precisão**. Ed. Lavras, 2013. 227p.:il. Cap.5, p.81-105.
- Alves, G.F. **Estudo da variabilidade espacial da ocorrência do bicho-minero do cafeeiro (*Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville & Perrottet, 1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae)) em cultivo de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) orgânico em formação, usando geoestatística**. 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

Alves, M.C.; Silva, F.M.; Moraes, J.C.; Pozza, E.A.; Oliveira, M.S.; Souza, J.C.S.; Alves, L.S. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 1/2, p. 1-14, 2009.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-009-9151-z>

Amaral, J.F.T. do; Martinez, H.E.P.; Laviola, B.G.; Tomaz, M.A.; Fernandes Filho, E.I.; Cruz, C.D. Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Coffee Science**, v. 6, n. 1, p. 65-74, 2011a.

<https://doi.org/10.25186/cs.v6i1.186>

Amaral, J.F.T.; Martinez, H.E.P. Laviola, B.G.; Fernandes Filho, E.I.; Cruz, C.D. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, v. 41, n. 4, p. 621-629, 2011b.

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000027>

Andrade, A.D.; Faria, R.O.; Alonso, D.J.C.; Ferraz, G.A.S.; Herrera, M.A.D.; Silva, F.M. Spatial variability of soil penetration resistance in coffee growing. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 3, p. 341-348, 2018.

<https://doi.org/10.25186/cs.v13i3.1456>

Bachmaier, M; Backers, M. Variogram or semivariogram? Understanding the variances in a variogram. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 3, p. 173-175, 2008.

<https://doi.org/10.1007/s11119-008-9056-2>

Barros, M.M. de; Volpato, C.E.S.; Silva, F.C.; Palma, M.A.Z.; Spagnolo, R.T. Avaliação de um sistema de aplicação de fertilizantes a taxa variável adaptado à cultura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 223-232, 2015.

<https://doi.org/10.25186/cs.v10i2.859>

Barros, M.M. de; Volpato, C.E.S.; Silva, F.M. da; Conceição, F.G. da; Corrêa Júnior, D.; Ribeiro, L.F. Performance of a variable-rate distribution system for simultaneous fertilizer application. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 2, p. 188-192, 2016.

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n2p188-192>

Bernardi, A.C.C.; Inamasu, R.Y. Adoção da agricultura de precisão no Brasil. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p.559-577.

Bernardi, A.C. de C.; Bettiol, G.M.; Grego, C.R.; Andrade, R.G.; Rabello, L.M.; Inamasu, R.Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 22, n. 1/2, p. 205-221, 2015.

<http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23314>

Bliska, F.M. de M.; Mourão, E.A.B.; Afonso Júnior, P.C.; Vegro, C.L.R.; Pereira, S.P.; Giomo, G.S. Dinâmica fitotécnica e socioeconômica da cafeicultura brasileira.

**Informações Econômicas**, v.39, n.1, p.5-18, 2009a.

Bliska, F.M. de M.; Vegro, C.L.R.; Afonso Júnior, P.C.; Mourão, E.A.B.; Cardoso, C.H.S. Custos de produção de café nas principais regiões produtoras do Brasil. **Informações Econômicas**, v. 39, n. 9, p. 5-20, 2009b.

Boldini, J.M. **Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado**. 2001.67 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2001.

Botelho, C.E.; Rezende, J.C. de; Carvalho, G.R.; Guimarães, P.T.G.; Alvarenga, A. de P.; Ribeiro, M. de F. Preparo do solo e plantio: instalação do cafezal. In: Reis, P.R.; Cunha, R.L. da. (Eds). **Café Arábica: do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG SM, 2010. 1v. 896p.: il. cap. 5, p. 283-341.

Camargo, A.P.; Camargo, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>.

Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Novak, J. M.; Turcoand, 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.

Campos, D.V.B. de; Teixeira, P.C.; Pérez, D.V.; Saldanha, M.F.C. Acidez potencial do solo. In: Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. (Eds.) **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017. 573 p.:il. color., cap. 4, p. 233-238.

Cantarutti, R.B.; Alvarez V., V.H.; Ribeiro, A.C. Amostragem do solo. In: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G.; Alvarez V., V.H. (Eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.: il. cap. 3, p. 13-20.

Cantarutti, R.B.; Barros, N.F. de; Martinez, H.E.P.; Novais, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: Novais, R.F.; Alvarez V.; V.H.; Barros, N.F. de; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Eds) **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG; 2007. 1017p.: il. cap. 13, p. 769-850.

Caon, D.; Genú, A.M. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v. 17, n. 6, p. 629-639, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000600009>.

Carmo, D.L.D.; Nannetti, D.C.; Lacerda, T.M.; Nannetti, A.N.; Espírito Santo, D.J. Micronutrientes em solo e folha de cafeeiro sob sistema agroflorestal no sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 76-83, 2012.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v7i1.231>

Carneiro, J.S.S.; Faria, Á.J.G.; Fidelis, R.R.; Silva Neto, S.P.; Santos, A.C.; Silva, R.R. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no Cerrado. **Scientia Agraria**, v. 17, n. 3, p. 38-49, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v17i3.50096>

Carvalho, L. G.; Sedyama, G. C.; Cecon, P.R.; Alves, H.M.R. A regression model to predict coffee productivity in Southern Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 204-211, 2004.  
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000200007>

Carvalho, A.M. de; Mendes, A.N.G.; Carvalho, G.R.; Botelho, C.E.; Gonçalves, F.M.A.; Ferreira, A.D.F. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 269-275, 2010.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300006>

Carvalho, L.C.C.; Silva, F.M. da; Ferraz, G.A.e.S.; Stracieri, J. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v8i3.429>

Carvalho, L.C.C. **Determinação da densidade amostral ótima para a geração de mapas temáticos na cafeicultura de precisão**. 2016. 230p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

Carvalho, L.C.C.; Silva, F.M. da; Ferraz, G.A. e S.; Stracieri, J.; Ferraz, P.F.P.; Ambrosano, L. Geostatistical analysis of arabic coffee yield in two crop seasons. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 6, p. 410-414, 2017a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n6p410-414>

Carvalho, L.C.C.; Silva, F.M. da; Ferraz, G.A. e S.; Figueiredo, V.C.; Cunha, J.P.B. Comparação entre amostragem foliar convencional e de precisão para análise de micronutrientes na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 272-281, 2017b.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v12i2.1278>

Chalfoun, S.M.; Reis, P.R. História da cafeicultura no Brasil. In: Reis, P.R.; Cunha, R.L. da. **Café Arábica: do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG SM, 2010. 1 v. 896p.: il. cap. 1, p. 23-85.

Cherubin, M.R.; Santi A.L.; Eitelwein M.T.; Amado, T.J.C.; Simon, D.H.; Damian, J.M. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000200009>.

Cherubin, M.R.; Santi, A.L.; Pias, O.H. de C.; Eitelwein, M.T.; Basso, C.J.; Flora, L.P.D.; Damian, J.M. Amostragem de solo na agricultura de precisão. In: Santi, A.L.; Sebem, E.; Giotto, E.; Amado, T.J.C. (Org.). **Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. cap. 4, p.79-98.il.



Cietto, S.; Haag, H.P. Nutrição mineral do cafeeiro III. Recrutamento de B, Cu, Fe, Mn e Zn pelo cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) com dois, três, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granação e maturação vegetando em um latossolo vermelho amarelo, fase cerrado. **Anais ESALQ**, Piracicaba, v. 46, p. 403-431, 1989.

<https://doi.org/10.1590/S0071-12761989000200009>.

Cietto, S.; Haag, H.P.; Dechen, A.R. Acumulação de matéria seca, absorção de N, P, e K pelo cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) com dois, três, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granação e maturação vegetando em um latossolo vermelho amarelo, fase cerrado. **Anais ESALQ**, Piracicaba, v. 48, p. 245-268, 1991a.

<https://doi.org/10.1590/S0071-12761991000100014>.

Cietto, S.; Haag, H.P.; Dechen, A.R. Absorção de Ca, Mg e S pelo cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) com dois, três, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granação e maturação vegetando em um latossolo vermelho amarelo, fase cerrado. **Anais ESALQ**, Piracicaba, v. 48, p. 223-244, 1991b.

<https://doi.org/10.1590/S0071-12761991000100013>.

Clemente, J.M.; Martinez, H.E.P.; Alves, L.C.; Lara, M.C.R. Effect of N and K doses in nutritive solution on growth, production and coffee bean size. **Revista Ceres**, v.60, n.2, p.279-285, 2013.

<https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000200018>

Cogo, N.P.; Levien, R.; Schwarz, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400019>.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Café**. v.5, safra 2020, n.6, Quarto levantamento, Brasília, p.1-45, dezembro 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 20 dez. 2020.

Corrêa, J.B.; Reis Júnior, R.A.; Carvalho, J.G. de; Guimarães, P.T.G. 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, 2001.

Costa, F.M.; Alves, G.F.; Scalon, J.D.; Zacarias, M.S. Análise estatística das distribuições espaciais do bicho-mineiro do cafeeiro e das vespas predadoras. **Coffee Science**, Lavras, v.10, n.2, p.149-157, 2015.

<https://doi.org/10.25186/cs.v10i2.797>

Cunha, J.F. da; Casarin, V.; Prochnow, L.I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas**, n. 130, p. 1-11, 2010.

DaMatta, F.M.; Ronchi, C.P.; Maestri, M.; Barros, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.4, p.485-510, 2007.  
<https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>

DaMatta, F.M.; Rena, A.B.; Carvalho, C.H.S. de. Aspectos fisiológicos do crescimento e da produção do cafeeiro. In: CARVALHO, C.H.S. de. **Cultivares de Café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008, 334p.:il. cap.3, p.59-68.

Dubberstein, D.; Partelli, F.L.; Dias, J.R.M.; Espinola, M.C. Concentration and accumulation of macronutrients in a leaf of coffee berries in the Amazon, Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v.10, n.5, p.701-710, 2016.  
<https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7424>

Dubberstein, D.; Partelli, F.L.; Dias, J.R.M.; Espindola, M.C. Influência da adubação do crescimento vegetativo de cafeeiros na Amazônia Sul Ocidental. **Coffee Science**, Lavras, v.12, n.2, p.197-206, 2017.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v12i2.1228>

Dutra Neto, C. **Café e Desenvolvimento Sustentável: perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Planalto de Vitória da Conquista**. Vitória da Conquista: UESB, 2004. 168 p.

EMPRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: DF, 2013. 353p.: il.

Fageria, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.1, p.6-16, 1998.  
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n01p6-16>.

Faria, R. de O.; Silva, F.M.; Ferraz, G.A. e S.; Herrera, M.A.D.; Barbosa, B.D.S.; Alonso, D.J.C.; Soares, D.V. Technical and economic viability of manual harvesting coffee yield maps. **Coffee Science**, v. 15, p. e151674, 2020.  
<https://doi.org/10.25186/.v15i.1674>

Farnezi, M.M. de M.; Silva, E. de B.; Guimarães, P.T.G. Diagnose nutricional de cafeeiros da região do Alto Jequitinhonha (MG): normas DRIS e faixas críticas de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.969-978, 2009.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400021>

Fernandes, R.H. **Diagnóstico e propostas para a cadeia produtiva do café da Bahia**. Salvador: SEAGRI, 2011. 40p.:il.

Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M.; Carvalho, F.M.; Costa, P.A.N.; Carvalho, L.C.C. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.5, p. 906-915, 2011.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000500008>.

Ferraz, G.A. e S. **Cafeicultura de precisão: malhas amostrais para o mapeamento de atributos do solo, da planta e recomendações**. 2012. 129p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M. da; Costa, P.A.N. da; Silva, A.C.; Carvalho, F.de M. 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, 2012a.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v7i1.204>

Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M. da; Alves, M. de C.; Bueno, R. de L.; Costa, P.A.N. da. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.13, n.1, p. 6-89, 2012b.  
<https://doi.org/10.1007/s11119-011-9223-8>

Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M da; Carvalho, L.C.C.; Alves, M. de C.; Franco, B.C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.140-150, 2012c.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100015>

Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M. da; Oliveira, M.S. de; Avelar, R.C.; Sales, R.S. Variabilidade espacial da dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para adubação diferenciada e convencional em lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v.10, n.3, p. 346-356, 2015.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v10i3.878>

Ferraz, G.A. e S.; Oliveira, M.S. de; Silva, F.M. da; Avelar, R.C.; Silva, F.C. da; Ferraz, P.F.P. Methodology to determine the soil sampling grid for precision agriculture in a coffee field. **DYNA**, v.84, n.200, p.316-325, 2017a.  
<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n200.52740>

Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M. da; Oliveira, M.S. de; Custódio, A.A.P.; Ferraz, P.F.P. Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, n.1, p.81-91, 2017b.  
<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170009>

Ferraz, G.A. e S.; Oliveira, M.S. de; Silva, F.M. da; Sales, R.S.; Carvalho, L.C.C. Plant sampling grid determination in precision agriculture. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 112-121, 2018.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v13i1.1391>

Ferreira, A.D.; Carvalho, G.R.; Abrahão, J.C.; Rezende, R.M.; Botelho, C.E.; Carvalho, A.M. de. Dinâmica dos micronutrientes em cafeeiros enxertados. **Revista Ceres**, Viçosa, v.60, n.2, p.262-269, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2013000200016>

Figueiredo, V.C. **Estudo de malhas amostrais em cafeicultura de precisão**. 2016. 184p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Figueiredo, V. C.; Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M. da; Conceição, F.G. da; Carvalho, L.C.C. Analysis of spatial variability of force detachment of coffee fruits in central pivot. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 84-92, 2017.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v12i2.1253>

Figueiredo, V.C.; Silva, F.M. da; Ferraz, G.A. e S.; Oliveira, M.S. de; Santos, S.A. dos. Development of a methodology to determine the best grid sampling in precision coffee growing. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 3, p. 312-323, 2018.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v13i3.1445>

Guarçoni, A. Saturação por bases para o cafeeiro baseada no pH do solo e no suprimento de Ca e Mg. **Coffee Science**, v.12, n.3, p. 327-336, 2017.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v12i3.1289>

Guarçoni, A.; Sobreira, F.M. Classical methods and calculation algorithms for determining lime requirements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-11, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20160069>.

Guarçoni, A.; Alvarez V., V.H.; Sobreira, F.M. Fundamentação teórica dos sistemas de amostragem de solo de acordo com a variabilidade de características químicas. **Terra Latinoamericana**, v. 35, n. 4, p. 343-352, 2017.

Grego, C. R.; Oliveira, R.P. de; Vieira, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: Bernardi, A.C. de C.; Naime, J. de M.; Resende, A.V. de; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. cap. 5, p. 74-83.

Guerra, A.F.; Rocha, O.C.; Rodrigues, G.C.; Sanzonowicz, C.; Ribeiro Filho, G.C.; Toledo, P.M.R.; Ribeiro, L.F. Sistema de produção de café irrigado: um novo enfoque. **Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 73, p. 52-61, 2007.

Guimarães, P.T.G.; Garcia, A.W.R.; Alvarez V., V.H.; Prezotti, L.C.; Viana, A.S.; Miguel, A. E.; Malavolta, E.; Corrêa, J.B.; Lopes, A.S.; Nogueira, F.D.; Monteiro, A.V.C. Cafeeiro. In: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G.; Alvarez V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 289-302.

Guimarães, P.T.G.; Nogueira, F.D.; Lima, P.C. de; Guimarães, M.J.C.L.; Pozza, A.A.A. Adubação e nutrição do cafeeiro em sistema orgânico de produção. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 23, n. 214/215, p. 63-81, 2002.

Guimarães, P.T.G.; Reis, T.H.P. Nutrição e adubação do cafeeiro. In: Reis, P.R.; Cunha, R.L. da. **Café Arábica: do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG SM, 2010. 1 v. 896p.: il. cap. 6, p. 343-414.

Hopkins, W.G. **Correlation coefficient: a new view of statistics**.2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

ICO - International Coffee Organization. **Total production by all exporting countries**. Disponível em: <<http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

Jacinto, J.L. **Zonas de manejo na cafeicultura de precisão**. 2016. 37p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2016.

Jacinto, J.L.; Ferraz, G.A. e S.; Silva, F.M. da; Santos, S.A. Management zones in coffee cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.2, p.94-99, 2017.  
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p94-99>

Journel, A.G.; Huijbregts, C.J. **Mining geostatistics**. Caldwell: Blackburn, 2003. 600 p.

Khalajabadi, S.S.; Jiménez, A.S. Micronutrientes em frutos y hojas de café. **Cenicafé**, v.66, n.2, p.73-87, 2015.

Laviola, B.G.; Martinez, H.E.P.; Souza, R.B.; Alvarez V., V.H. Dinâmica de N e K em folhas, flores e frutos de cafeeiro arábico em três níveis de adubação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 22, n. 3, p. 33-47, 2006.

Laviola, B.G.; Martinez, H.E.P.; Souza, R.B. de; Venegas, V.H.A. Dinâmica de P e S em folhas, flores e frutos de cafeeiro arábico em três níveis de adubação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 29-40, 2007a.

Laviola, B.G.; Martinez, H.E.P.; Salomão, L.C.C.; Cruz, C.D.; Mendonça, S.M.; Rosado, L.D.S. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em duas altitudes de cultivo: micronutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.1439-1449, 2007b.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000600021>

Laviola, B.G.; Martinez, H.E.P.; Salomão, L.C.C.; Cruz, C.D.; Mendonça, S.M.; Rosado, L. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.24, n.1, p.19-31, 2008.

Leal, J.C.G. **Mapeamento da produtividade na colheita mecanizada do café**. 2002. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

Lima, L.M. de. **Variabilidade espacial da mancha de phoma relacionada à nutrição do cafeeiro e incidência da cercosporiose na qualidade do café**. Tese (Doutorado em Fitopatologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

Livramento, D.E. do. Morfologia e fisiologia do cafeeiro. In: Reis, P.R.; Cunha, R.L. da.(Eds). **Café Arábica: do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG SM, 2010. 1v. 896p.: il. cap. 2, p. 87-162.

Lopes, A.S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177p.

Lopes, A.S.; Guilherme, L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F. de; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG; 2007. 1017p.: il. cap. 1, p. 1-64.

Machado, L. de O.; Lana, Â.M.Q.; Lana, R.M.Q.; Guimarães, E.C.; Ferreira, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.3, p. 591-599, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300019>.

Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

Malavolta, E.; Favarin, J.L.; Malavolta, M.; Cabral, C.P.; Heinrichs, R.; Silveira, J.S.M. Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 7, p. 1017-1022, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000700016>

Malavolta, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.:il.

Marques Júnior, J.; Souza, Z.M.; Pereira, G.T.; Barbieri, D.M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Aracaju, v.8, n.1, p.143-152, 2008.

Martinez, H.E.P.; Menezes, J.F.S.; Souza, R.B. de; Guimarães, P.T.G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 6, p. 703-713, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2003000600006>

Martinez, H.E.P.; Augusto, H.S.; Cruz, C.D.; Pedrosa, A.W.; Sampaio, N.F. Crescimento vegetativo de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) e sua correlação com a produção em espaçamentos adensados. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 4, p. 481-489, 2007. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i4.404>

Martinez, H.E.P.; Neves, J.C.L. Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação. In: Sakiyama, N.S.; Martinez, H.E.P.; Martinez, H.E.P.; Tomaz, M.A.; Borém, A. **Café arábica: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2015. 316p.:il. p.64-103.

Matiello, J.B. **Diagnóstico da cafeicultura Baiana**. Salvador: SEAGRI,2000. 24p.

Matiello, J.B.; Santinato, R.; Almeida, S.R.; Garcia, A.W.R. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. 1. ed. São Paulo: Futurama Editora, 2016. 585p.: il.

Melo, B.M.R. de; Paglis, C.M.; Oliveira, M.S. de; Teixeira, M.B.R.; Silva, J.S.M. da; Lima, D.F.F. Zonas de manejo em função de propriedades de solo, relevo e produtividade da lavoura cafeeira. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 9, n. 2, p. 49-59, 2017a. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v9n22017924>

Melo, B.M.R.; Paglis, C.M.; Silva, J.S.M. Avaliação agrônômica e econômica do uso de malhas de amostragem na cafeicultura de base familiar. **Scientific Electronic Archives**, v. 10, n. 2, p. 38-44, 2017b. <http://dx.doi.org/10.36560/1022017400>

Mendonça, S.M.D.; Martinez, H.E.P.; Neves, J.C.D.L.; Guimarães, P.T.G.; Pedrosa, A.W. Coffee tree (*Coffea arabica* L.) response to limestone in soil with high aluminum saturation. **Coffee Science**, v.2, n.2, p. 112-122, 2007. <https://doi.org/10.25186/cs.v2i2.51>

Molin, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

Molin, J. P.; Castro, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 567-573, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600001>

Molin, J.P.; Faulin, G.D.C.; Stanislavski, W. M. Yield Mapping and Variable Rate of Fertilizers for Coffee in Brazil. **Acta Horticulturae**, v.834, p.261-266, 2009. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.824.30>

Molin, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, 2010. 83p.

Molin, J.P.; Motomiya, A.V. de A.; Frasson, F.R.; Faulin, G.D.C.; Tosta, W. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.32, n.4, p.569-575, 2010. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v32i4.5282>

Miranda, J.M.; Perecin, D.; Pereira, A.A. Produtividade e resistência à ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. Et. Br.) de progênes F5 de Catuaí Amarelo com o Híbrido de Timor. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, p.1195-1200, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542005000600013>

Nanni, M.R.; Povh, F.P.; Demattê, J.A.M.; Oliveira, R.B.; Chicati, M.L.; Cezar, E. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p.386-392, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162011000300017>

Nascimento, P.S.; Silva, J.A.; Costa, B.R.S.; Bassoi, L.H.M.; Mesquita, F.O.; Costa, T.K.G. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1101-1113, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400006>

Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. 432 p.

Oliveira, A.S.C. **Mapeamento da variabilidade espacial da produção na cafeicultura de montanha**. 2003. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

Oliveira, J.T.; Moreau, A.M.S.S.; Menezes, A.A.; Paiva, A.Q.; Messias, T. Modificações ambientais e sócio-econômicas decorrentes do desenvolvimento da cafeicultura em Barra do Choça, Bahia. **Bahia Agrícola**, v. 8, n. 1, p. 54-58, 2007.

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. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, 2008.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100018>

Oliveira, R.B. de; Lima, J.S. de S.; Silva, S. de A.; Antuniassi, U.R.; Silva, A.F. da. Spatial variability of the nutritional condition of canéfora coffee aiming specific management. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 190-196, 2010.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v5i3.337>

Parecido, R.J. **Nutrição e produtividade da cultura do café afetadas pela forma de aplicação de calcário e gesso na cultura já implantada**. 2020. 143p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

Petek, M.R.; Patrício, F.R.A. Cultivares resistentes ou tolerantes a fatores bióticos e abióticos desfavoráveis ponto-chave para a cafeicultura sustentável. **O Agrônomo**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 39-40, 2007.

Poltronieri, Y.; Martinez, H.E.P.; Clemente, J.M.; Ferreira, A. de O. Fornecimento de boro, cobre e zinco ao cafeeiro via inserção de comprimidos no ramo ortotrópico. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 521 - 529, 2016.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v11i4.1157>

Prado, R. de M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 407p.  
Prezotti, L.C.; Guarçoni, A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória-ES: Incaper, 2013. 104 p.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, M. A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória, ES: Incaper, 2013. 104p.



Raij, B.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Furlani, A.M.C. (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. p. 97-101 (Boletim Técnico, 100).

Raij, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. IPNI: Piracicaba, 2011. 420p.:il.

Ragagnin, V. A.; Sena Júnior, D. G.; Silveira Neto, A.N. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 600-607, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000600006>

Ramos, B.Z.; Toledo, J.P.V.F.; Lima, J.M.D.; Serafim, M.E.; Bastos, A.R.R.; Guimarães, P.T.G.; Coscione, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400019>

Rena, A.B.; Maestri, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 26-40, 1985.

Rena, A.B.; Nacif, A.P.; Guimarães, P.T.G.; Bartholo, G.F. Plantios adensados de café: aspectos morfológicos, ecofisiológicos, fenológicos e agrônômicos. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 193, p. 61-70, 1998.

Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G.; Alvarez V., V.H. (Eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.: il.

Rodriguez-Garay, F.A.; Camacho\_Tamayo, J.H.; Rubiano-Sanabria, Y. Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café. **Corpoica Ciencia Tecnologia Agropecuaria**, Mosquera, v. 17, n. 2, p. 237-254, 2016. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num2\\_art:493](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:493)

Rozane, D.E.; Romualdo, L.M.; Centurion, J.F.; Barbosa, J.C. Dimensionamento do número de amostras para avaliação da fertilidade do solo. **Semina**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 111-118, 2011. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n1p111>

Sanchez, R.B.; Marques Júnior, J.; Pereira, G.T.; Souza, Z.M. de. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000400008>

Santinato, F. **Inovações tecnológicas para cafeicultura de precisão**. 2016. 125p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP.

Santos, A.O.; Pallone Filho, W.J.; Ungaro, M.R.G.; Lino, A.C.L.; Radin, B. Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 463-468, 2003.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662003000300009>

Santos, E.O. de; Gontijo, I.; Silva, M.B. da. Planejamento amostral de propriedades químicas do solo em lavoura de café conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 423-431, 2013.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v8i4.485>

SEI. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. **Balanco hídrico do estado da Bahia** (Série Estudos e Pesquisas, 45). Salvador: SEI, 250 p., 1999.

Seidel, E.J.; Oliveira, M.S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 3, p. 699-705, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000300002>

Silva, E. de B.; Nogueira, F.D.; Guimarães, P.T.G.; Furtini Neto, A.E. Resposta do cafeeiro à adubação potássica em safras de baixa e alta produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1331-1337, 2001.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100002>

Silva, F. M. da; Oliveira, E. de; Guimarães, R.J.; Figueiredo, C.A.P. de. Desempenho operacional e econômico da derriça do café com uso da derriçadora lateral. **Coffee Science**, v. 1, n. 2, p. 119-125, 2006.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v1i2.27>

Silva, F.M. da; Souza, Z.M. de; Figueiredo, C.A.P.; Marques Júnior, J.; Machado, R.V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, 2007.  
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200016>

Silva, F.M. da; Souza, Z.M. de; Figueiredo, C.A.P. de; Vieira, L.H. de S.; OLIVEIRA, E. de. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, 2008.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000100034>

Silva, S. A.; Lima, J. S. S.; Xavier, A. C.; Teixeira, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 15-22, 2010a.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100002>

Silva, S.A.; Lima, J.S. de S.; Souza, G.S. de; Oliveira, R.B. de; Silva, A.F. da. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2010b.

Silva, S. de A.; Lima, J.S. de S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 271-277, 2012.  
<https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200017>

Silva, S. de A.; Lima, J.S. de S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café arábica. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 395-403, 2013.  
<https://doi.org/10.25186/cs.v8i4.478>

Silva, F.M. da; Alves, M. de C. **Cafeicultura de Precisão**. Lavras: Editora UFLA, 2013.

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.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000044>

Silva, M.F. de O.; Benavides, A.C.; Gomes, A. da S. Dinâmica locacional da cafeicultura na Bahia. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 14, n. 5, p. 116-133, 2018.

Soratto, R.P.; Crusciol, C.A.C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém implantado. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 675-688, 2008.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200022>

Sousa, J.S.; Neves, J.C.L.; Martinez, H.E.P.; Alvarez V., V.H. Relationship between coffee leaf analysis and soil chemical analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.  
<https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170109>

Turco, P.H.N.; Fronzaglia, T.; Vegro, C.L.R.; Firetti, R.; Tôsto, S.G.; Bliska, F.M. de M. Trajetória tecnológica cafeeira no Brasil, 1924 a 2012. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 60, n. 2, p. 105-119, 2013.

Valadares, S.V.; Neves, J.C.L.; Rosa, G.N.P.; Martinez, H.E.P.; Alvarez V., V.H.; Lima, P. C. Produtividade e bienalidade da produção de cafezais adensados, sob diferentes doses de N e K. **Pesquisa Agropecuária**, v. 48, n. 3, p. 296-303, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000300008>

Valente, D.S.M.; Queiroz, D.M. de; Pinto, F. de A. de C.; Santos, N.T.; Santos, L.S. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **ScientiaAgricola**, v. 69, n. 3, p. 173-179, 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162012000300001>

Vieira, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ, V.H.; SCHAFFER, C.E.G.R. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p. 1-4.

Vieira, S.R.; Guedes Filho, O.; Chiba, M.K.; Mellis, E.V.; Dechen, S.C.F.; De Maria, I.C. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1503-1514, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000500003>

Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 350p.

Zimmermann, F.J.P. **Estatística aplicada à pesquisa agrícola**. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

## ANEXOS

**Tabela 1A.** Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH) <sup>1/</sup>

Classificação química						
Acidez muito elevada	Acidez Elevada	Acidez média	Acidez fraca	Neutra	Alcalinidade fraca	Alcalinidade elevada
< 4,5	4,5-5,0	5,1-6,0	6,1-6,9	7,0	7,1-7,8	> 7,8
Classificação agrônômica <sup>2/</sup>						
Muito Baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito Alto		
< 4,5	4,5-5,4	5,5-6,0	6,1-7,0	> 7,0		

**Fonte:** Adaptado de Alvarez V. (1999). <sup>1/</sup> pH em H<sub>2</sub>O, relação 1:2,5, TFSA: H<sub>2</sub>O. <sup>2/</sup> A qualificação utilizada indica adequado (Bom) ou inadequado (Muito Baixo e Baixo ou Alto e Muito Alto).

**Tabela 2A.** Classes de interpretação da disponibilidade para o fósforo de acordo com o teor de argila do solo ou do valor de fósforo remanescente (P-rem) e para o potássio

Característica	Classes de fertilidade				
	Muito Baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito
	-----( $\text{mg dm}^{-3}$ ) <sup>1/</sup> -----				
Argila (%)	Fósforo disponível (P) <sup>2/</sup>				
60 – 100	$\leq 2,7$	2,8 - 5,4	5,5 - 8,0 <sup>3/</sup>	8,1 - 12,0	> 12,0
35 – 60	$\leq 4,0$	4,1 - 8,0	8,1 - 12,0	12,1 - 18,0	> 18,0
15 – 35	$\leq 6,6$	6,7 - 12,0	12,1 - 20,0	20,1 - 30,0	> 30,0
0 – 15	$\leq 10,0$	10,1 - 20,0	20,1 - 30,0	30,1 - 45,0	> 45,0
P-rem <sup>4/</sup> ( $\text{mg dm}^{-1}$ )					
0 – 4	$\leq 3,0$	3,1 - 4,3	4,4 - 6,0	6,1 - 9,0	> 9,0
4 – 10	$\leq 4,0$	4,1 - 6,0	6,1 - 8,3	8,4 - 12,5	> 12,5
10 – 19	$\leq 6,0$	6,1 - 8,3	8,4 - 11,4	11,5 - 17,5	> 17,5
19 – 30	$\leq 8,0$	8,1 - 11,4	11,5 - 15,8	15,9 - 24,0	> 24,0
30 – 44	$\leq 11,0$	11,1 - 15,8	15,9 - 21,8	21,9 - 33,0	> 33,0
44 - 60	$\leq 15,0$	15,1 - 21,8	21,9 - 30,0	30,1 - 45,0	> 45,0
	Potássio disponível (K) <sup>2/</sup>				
	$\leq 15$	16 - 40	41 – 70 <sup>5/</sup>	71 - 120	> 120,00

**Fonte:** Adaptado de Alvarez V. (1999). <sup>1/</sup>  $\text{mg dm}^{-3}$  = PPM (m/v). <sup>2/</sup> Método Mehlich-1. <sup>3/</sup> Nesta classe apresentam-se os níveis críticos de acordo com o teor de argila ou com o valor do fósforo remanescente. <sup>4/</sup> P-rem = Fósforo remanescente, concentração de fósforo da solução de equilíbrio após agitar durante 1h a TFSA com solução de CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, na relação 1:10. <sup>5/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico.

**Tabela 3A.** Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica

Característica	Unidade <sup>1/</sup>	Classificação				
		Muito Baixo	Baixo	Médio <sup>2/</sup>	Bom	Muito Bom
Carbono Orgânico (C.O.) <sup>3/</sup>	dag kg <sup>-1</sup>	≤ 0,40	0,41 - 1,16	1,17 - 2,32	2,33 - 4,06	> 4,06
Matéria Orgânica (M.O.) <sup>3/</sup>	dag kg <sup>-1</sup>	≤ 0,70	0,71 - 2,00	2,01 - 4,00	4,01 - 7,00	> 7,00
Cálcio trocável (Ca <sup>2+</sup> ) <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 0,40	0,41 - 1,20	1,21 - 2,40	2,41 - 4,00	> 4,00
Magnésio trocável (Mg <sup>2+</sup> ) <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 0,15	0,16 - 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	> 1,50
Soma de Bases (SB) <sup>5/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 0,60	0,61 - 1,80	1,81 - 3,60	3,61 - 6,00	> 6,00
CTC efetiva (t) <sup>7/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 0,80	0,81 - 2,30	2,31 - 4,60	4,61 - 8,00	> 8,00
CTC pH 7,0 (T) <sup>8/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 - 8,60	8,61 - 15,0	> 15,0
Saturação por bases (V) <sup>10/</sup>	%	≤ 20,0	20,1 - 40,0	40,1 - 60,0	60,1 - 80,0	> 80,0
		Muito Baixo	Baixo	Médio <sup>2/</sup>	Alto	Muito Alto
Acidez trocável (Al <sup>3+</sup> ) <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 0,20	0,21 - 0,50	0,51 - 1,00	1,01 - 2,00	> 2,00
Acidez potencial (H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> ) <sup>6/</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	≤ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00	> 9,00
Saturação por Al <sup>3+</sup> (m) <sup>9/</sup>	%	≤ 15,0	15,1 - 30,0	30,1 - 50,0	50,1 - 75,0	> 75,0

**Fonte:** Adaptado de Alvarez V. (1999). <sup>1/</sup> dag/Kg = % (m/m); cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> = meq/100 cm<sup>3</sup>. <sup>2/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico. <sup>3/</sup> Método Walkley & Black; M.O. = 1,724 x C.O. <sup>4/</sup> Método KCl 1 mol/L. <sup>5/</sup> S.B. = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>. <sup>6/</sup> H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>, Método Ca(OAc)<sub>2</sub> 0,5 mol/L, pH 7,0. <sup>7/</sup> t = S.B. + Al<sup>3+</sup>. <sup>8/</sup> T = S.B. + (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>). <sup>9/</sup> m = 100 Al<sup>3+</sup> / t. <sup>10/</sup> V = 100 S.B. / T.

**Tabela 4A.** Classes de interpretação para os teores foliares de macronutrientes e micronutrientes no cafeeiro arábica<sup>(1)</sup>

Nutriente	Unidade	Deficiente	Marginal	Adequado	Alto	Excessivo
N	g kg <sup>-1</sup>	< 22	22 - 26	27 - 32	33 - 35	> 35
P	g kg <sup>-1</sup>	< 1,0	1,0 - 1,9	2,0 - 2,1	2,2 - 2,3	> 2,3
K	g kg <sup>-1</sup>	< 14	14 - 18	19 - 24	25 - 27	> 27
Ca	g kg <sup>-1</sup>	< 5	5 - 9	10 - 14	15 - 17	> 17
Mg	g kg <sup>-1</sup>		2,6 - 3,0	3,1 - 3,6	3,7 - 3,9	> 3,9
S	g kg <sup>-1</sup>	< 1,0	1,0 - 1,4	1,5 - 2,0	2,1 - 2,5	> 2,5
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	< 5	5 - 7	8 - 16	17 - 25	> 25
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	< 4	4 - 7	8 - 16	17 - 30	> 30
Fe	mg kg <sup>-1</sup>	< 50	50 - 89	90 - 180	181 - 220	> 220
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	< 40	40 - 119	120 - 210	211 - 300	> 300

**Fonte:** Adaptado de Malavolta (2006). <sup>(1)</sup> 3º ou 4º par de folhas de ramos produtivos, amostrados no verão (fev./mar.)