



**GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ**

**CAFEICULTURA DE PRECISÃO: MALHAS  
AMOSTRAIS PARA O MAPEAMENTO DE  
ATRIBUTOS DO SOLO, DA PLANTA E  
RECOMENDAÇÕES**

**LAVRAS - MG  
2012**

**GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ**

**CAFEICULTURA DE PRECISÃO: MALHAS AMOSTRAIS PARA O  
MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DO SOLO, DA PLANTA E  
RECOMENDAÇÕES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doutor.

Dr. Fábio Moreira da Silva  
Orientador

Dr. Marcelo Silva de Oliveira  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2012**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Ferraz, Gabriel Araújo e Silva.

Cafeicultura de precisão : malhas amostrais para o mapeamento de atributos do solo, da planta e recomendações / Gabriel Araújo e Silva Ferraz. – Lavras : UFLA, 2012.

129 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Fábio Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Geoestatística. 3. Fertilidade do solo. 4. Variabilidade espacial. 5. Cafeeiro. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.73

**GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ**

**CAFEICULTURA DE PRECISÃO: MALHAS AMOSTRAIS PARA O  
MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DO SOLO, DA PLANTA E  
RECOMENDAÇÕES**

Tese apresentada à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 23 de novembro de 2012.

Dr. Jackson Antônio Barbosa                      UFLA

Dr. José Marques Junior                              UNESP

Dr. Marcelo de Carvalho Alves                      UFMT

Dr. Marcelo Silva de Oliveira                      UFLA

Dr. Fábio Moreira da Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2012**

*A Deus*

*A Antônio Gabriel, meu pai, e Regina Cláudia, minha mãe, pelo amor, confiança, apoio e dedicação que me impulsionaram a seguir em frente.*

*À Patrícia, por todo amor, carinho, companheirismo e por sempre me incentivar, apoiar e me manter no caminho.*

*A minha irmã Cecília, pela amizade e carinho.*

*Aos meus avós, por sempre acreditarem em meu esforço e serem um exemplo de vida.*

*À Tita, por participar de toda a minha criação.*

DEDICO

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida para a realização de toda a minha formação acadêmica (graduação, mestrado e doutorado).

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pela concessão de horário especial para que eu pudesse dar continuidade ao desenvolvimento deste doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos por determinado período.

Ao professor Dr. Fábio Moreira da Silva, pela orientação, amizade, convivência, paciência, confiança, apoio aos trabalhos desenvolvidos e por toda a transmissão de conhecimentos.

Ao professor Dr. Marcelo Silva de Oliveira, pela orientação, ensinamentos, amizade, convivência e pelas preciosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao grupo Ximenes e Abreu na pessoa do Eng. Agro. Eric Miranda Abreu, proprietário da fazenda Brejão, por toda a ajuda e disponibilidade de sua propriedade, funcionários e dados que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos, pela convivência e por toda ajuda na concretização deste curso.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia da UFRRJ, pelo apoio e compreensão.

Aos professores Jackson Antônio Barbosa, José Marques Junior e Marcelo de Carvalho Alves pela participação na banca examinadora e pelas contribuições ao trabalho.

Aos meus amigos Flávio Castro da Silva, Luis Carlos Cirilo Carvalho, Murilo Machado de Barros, Ronan Souza Sales, Rogner Avelar, Alan Peres Vieira da Silva e Adriano Augusto de Paiva Custódio pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a concretização deste doutorado.

“Nunca fiz nada dar certo por acidente;  
nem nenhuma das minhas invenções  
surgiu por acidente; elas vieram do meu  
trabalho.”

*Thomas A. Edison*

## RESUMO

O café é um dos principais produtos agrícolas do agronegócio brasileiro, e o Brasil se destaca no mercado internacional como líder de produção. A cada dia os produtores brasileiros investem ainda mais em tecnologias e práticas que possibilitem o aumento da produtividade, culminando, assim, no crescimento da renda dos agricultores. A agricultura de precisão pode ser uma alternativa para redução de custos no setor cafeeiro, já que o conhecimento de determinadas características do solo, associado à resposta de produção do cafeeiro, pode facilitar a aplicação localizada e racional dos insumos, com resultados ambientais e econômicos positivos. Este conjunto de técnicas e tecnologias exige que sejam realizadas amostragens de campo representativas visando aproximar ao máximo da realidade da lavoura. Desta maneira, a definição da malha amostral, torna-se de fundamental importância, sendo tema de discussões entre pesquisadores, prestadores de serviços e produtores. Várias pesquisas foram desenvolvidas no intuito de caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo e da planta, mas não visando testar a qualidade da malha amostral para a cafeicultura. Sendo assim, objetivou-se no presente trabalho aplicar as técnicas de agricultura de precisão, utilizando-se a geoestatística para testar diferentes malhas amostrais, de forma a contribuir com o processo produtivo da cafeicultura na confiabilidade das amostragens dos atributos do solo e da planta. Objetivou-se ainda realizar o mapeamento de atributos do solo, da planta e de recomendações de adubação.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Lavoura Cafeeira. Distribuição espacial. Amostragem.

## **ABSTRACT**

Coffee is one of the major agricultural products of Brazilian agribusiness and Brazil is the major coffee producer of the world. Every day Brazilian producers invest more in technology and practices that allow to increase the yield that results in more gains to the producers. The precision agriculture can be a feasible alternative to reduce costs in coffee sector, due to the knowledge of some soil features associated with the coffee yield response. It can make the located and rational application of fertilizer easier, with positive environmental and economic results. These techniques and technology package need precise field sampling in order to have results closer to the field reality. So, grid sampling scheme is very important and has been discussion topic among researchers, service providers and farmers. Some studies have been developed in order to characterize the spatial variability of the soil and plant properties, but the quality of the sampling grid was not studied to coffee field. Therefore, the aim of this work was to apply the precision agriculture technique using the geostatic to test different sampling grids in order to collaborate with the coffee producers in the soil chemical and plant attributes sampling. It was also aimed mapping attributes of the soil, plant and fertilizer recommendation.

**Keywords:** Precision Agriculture. Coffee Crop. Spatial Variability. Sampling

## SUMÁRIO

	<b>CAPÍTULO 1</b> Introdução Geral.....	12
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
<b>2.1</b>	<b>Cafeicultura de precisão</b> .....	15
<b>2.2</b>	<b>Malhas amostrais</b> .....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Malhas amostrais de atributos do solo em cafeicultura de precisão</b> .....	19
<b>2.2.2</b>	<b>Malhas amostrais de atributos da planta em cafeicultura de precisão</b> .....	22
<b>2.2.2.1</b>	<b>Malhas amostrais de produtividade do cafeeiro</b> .....	24
<b>2.2.2.2</b>	<b>Malha amostral de força de desprendimento dos frutos de cafeeiros</b> .....	27
<b>2.2.2.3</b>	<b>Malha amostral da maturação de frutos de cafeeiros</b> .....	27
<b>2.3</b>	<b>Geoestatística</b> .....	27
<b>2.3.1</b>	<b>Semivariograma</b> .....	29
<b>2.3.2</b>	<b>Krigagem</b> .....	33
<b>2.3.3</b>	<b>Validação</b> .....	35
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	37
	<b>CAPÍTULO 2</b> Metodologia para determinação de malhas amostrais de solo e planta em cafeicultura de precisão.....	44
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	47
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	50
<b>2.1</b>	<b>Caracterização da área experimental</b> .....	50
<b>2.2</b>	<b>Malha amostral inicial</b> .....	52
<b>2.3</b>	<b>Desenvolvimento de uma metodologia para estudo de malhas amostrais</b> .....	54
<b>2.4</b>	<b>Teste da metodologia desenvolvida</b> .....	56
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	60
<b>3.1</b>	<b>Índices de qualidade e Indicador de malha</b> .....	60
<b>3.2</b>	<b>Malhas amostrais</b> .....	61
<b>3.3</b>	<b>Teste dos Índices e do Indicador para atributos do solo</b> .....	64
<b>3.4</b>	<b>Teste dos Índices e do Indicador aplicados a atributos da planta</b> .....	74
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	83
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84
	<b>CAPÍTULO 3</b> Variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta de lavoura cafeeira.....	88
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	90
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	92

2.1	Caracterização da área experimental .....	92
2.2	Estudo da dependência espacial .....	94
2.3	Amostragem do solo .....	96
2.3.1	Amostragem convencional do solo .....	96
2.3.2	Amostragem em malha .....	97
2.3.3	Comparação entre amostragem convencional e em malha .....	98
2.4	Dosagem de $P_2O_5$ e $K_2O$ .....	99
2.5	Amostragem dos atributos da planta .....	100
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	102
3.1	Análise descritiva dos dados de solo .....	102
3.2	Variabilidade espacial dos atributos do solo .....	103
3.3	Comparativo entre amostragem convencional e em malha .....	106
3.4	Variabilidade espacial da recomendação da dose de $P_2O_5$ e $K_2O$ .....	114
3.5	Análise descritiva dos atributos da planta .....	118
3.6	Variabilidade espacial dos atributos da planta .....	119
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	128
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	130

## **CAPÍTULO 1**

### **Introdução Geral**

#### **1 INTRODUÇÃO**

O café é um dos principais produtos agrícolas do agronegócio brasileiro, constituindo um grande fornecedor de receitas cambiais e, ainda, é um produto no qual o país se destaca como líder na produção mundial. A cada dia os produtores brasileiros investem ainda mais em tecnologias e práticas que possibilitem o aumento da produtividade, culminando, assim, no crescimento da renda dos cafeicultores.

Esta crescente modificação do perfil dos produtores de café faz com que a cada dia seus produtos se adequem melhor às demandas do mercado. Cada vez mais são exigidos níveis tecnológicos elevados, para que se obtenha um aumento de produtividade, redução de custos e restrição ao uso de agroquímicos.

A agricultura de precisão corrobora com este novo perfil do agronegócio do café. Este conjunto de técnicas e tecnologias pode contribuir para a redução de custos no setor cafeeiro, por meio da aplicação de insumos de forma diferenciada, levando-se em consideração as exigências do cafeeiro e a disponibilidade de nutrientes no solo para cada localidade. Além disto, colabora para uma melhor gerência da operação de colheita possibilitando manter ou melhorar a qualidade final do produto.

Constituindo a agricultura de precisão uma prática que envolve o conhecimento de várias áreas no campo das ciências agrárias, há uma crescente necessidade de pesquisas para que ela seja adotada em maior escala na cafeicultura.

O entendimento da variabilidade espacial na lavoura exige uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragens. Tais amostragens, principalmente referente às malhas amostrais, ainda geram discussões entre cientistas, técnicos e produtores, que ainda não possuem padrões bem estabelecidos para a cafeicultura. A utilização de malhas amostrais de tamanho insatisfatório pode gerar mapas que não refletem aquilo que se encontra no campo e desta maneira gerando recomendações técnicas errôneas, o que poderá causar prejuízos aos seus usuários.

Desta maneira, o estudo de malhas amostrais se torna de fundamental importância para o gerenciamento mais preciso da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas em uma lavoura cafeeira.

Dado o exposto, objetivou-se no presente trabalho:

- a) desenvolver, propor e testar uma metodologia para avaliação e comparação da qualidade de diferentes malhas amostrais aplicadas aos atributos do solo e da planta de lavoura de cafeeiros, permitindo a escolha da malha que melhor caracterize a variabilidade espacial de uma ou de um grupo de atributos;
- b) caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos do solo, da recomendação de adubação de fertilizantes fosfatados e potássicos e de atributos da planta em lavoura cafeeira;
- c) mapear estes atributos de forma a visualizar a distribuição espacial;
- d) comparar os teores médios dos atributos do solo levantados em malha amostral quadrada e em amostragem convencional aleatória;
- e) comparar a recomendação de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos para ambas as amostragens.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Os avanços tecnológicos que estão sendo aplicados na agricultura estão entre os responsáveis pelos ganhos de produtividade e eficiência das unidades produtoras. Com o advento da modernização agrícola, melhorias no processo produtivo estão ocorrendo, ocasionando melhor adequação da produção às exigências de mercado e aumentando a competitividade dos produtores (LANNA; TEIXEIRA; REIS, 2011).

A aplicação de novas tecnologias no meio rural pode auxiliar no incremento de produtividade, de qualidade e de eficiência na conservação dos alimentos, enquanto se busca a conservação e preservação dos recursos naturais. É o caso do desenvolvimento de áreas como a automação e controle, robótica, nanotecnologia, agricultura de precisão, pós-colheita, agroenergia, ciência do solo, meio ambiente e mudanças climáticas. Incluem-se, ainda, a construção de equipamentos e sensores, além da elaboração e aplicação de métodos, modelos e sistemas avançados (CRESTANA; FRAGALLE, 2012).

Diante deste cenário, buscou-se demonstrar com este referencial teórico, a utilização de uma nova tecnologia que está sendo empregada no agronegócio do café, bem como a forma com que esta tecnologia é utilizada. Para tal, foi realizada uma pesquisa na literatura científica em busca de trabalhos que abordassem os temas cafeicultura de precisão, uso de malhas amostrais para o estudo da variabilidade espacial de diferentes atributos do solo e das plantas na cafeicultura. Descreveu-se, também, a técnica de Geoestatística.

## 2.1 Cafeicultura de precisão

A agricultura de precisão se apresenta como um conjunto de tecnologias capaz de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura. Inclui maximizar a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo face ao processo de globalização da economia e contribuir, assim, para o sucesso da atividade agrícola (SILVA et al., 2008).

Como foi citado acima, a agricultura de precisão não é apenas uma ferramenta tecnológica, mas constitui, sim, um conjunto de tecnologias e de componentes, com muitos dos quais os agricultores podem optar por formar um sistema que atenda suas necessidades e seu estilo de gestão (BATTE; EHSANI, 2006).

A agricultura de precisão baseia-se na premissa de que a gestão dos fatores de produção pode ser melhorada e a rentabilidade potencialmente elevada. Isto pode ser alcançado quando os produtores tirarem proveito de informações de variabilidade espacial e tecnologias de aplicação de insumos a taxas variáveis (DERCON et al., 2006; HURLEY; OISHI; MALZER, 2005; MZUKU et al., 2005).

Na cafeicultura, a agricultura de precisão, ainda, é uma tecnologia a ser implantada em longo prazo, mas há uma forte tendência para que seja adotada, pela eficiência, sustentabilidade ecológica e econômica.

Ainda, na cultura do cafeeiro, há um campo muito vasto para ser aplicada e pesquisada a Agricultura de Precisão, não só pela sua importância para o Brasil, mas também pelo alto grau tecnológico e o valor econômico das lavouras (BALASTREIRE et al., 2001).

O termo “Cafeicultura de Precisão”, introduzido por Alves, Queiroz e Pinto (2006), pode ser entendido como o emprego das técnicas de agricultura de precisão na produção de café. As características do solo da cultura variam no espaço (distância e profundidade) e no tempo. Assim, a cafeicultura de precisão pode ser definida como um conjunto de técnicas que visa à otimização do uso dos insumos agrícolas (fertilizantes, corretivos, sementes e defensivos) em função da variabilidade espacial e temporal de fatores associados ao sistema água-solo-planta.

Cafeicultura de Precisão pode, ainda, ser definida como o conjunto de técnicas e tecnologias capaz de auxiliar o cafeicultor a manejar sua lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando maximizar a rentabilidade, aumentar eficiência da adubação, pulverização e colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto (FERRAZ et al., 2012c).

Várias pesquisas foram desenvolvidas, no intuito de caracterizar a variabilidade dos atributos (físicos e químicos) do solo e da planta (folhas e frutos) da cultura do cafeeiro, sendo utilizadas diferentes metodologias, malhas amostrais, áreas e cultivares, que serão descritas nos itens subsequentes.

## **2.2 Malhas amostrais**

A forma tradicionalmente utilizada para se amostrar atributos de uma determinada lavoura é utilizando-se amostragem aleatória, conforme preconizado pela estatística clássica (não-espacial). Desta maneira, implicitamente, trata-se a área como suficientemente homogênea. O manejo a ser realizado considerará a média encontrada nesta área como representativo do atributo para toda a área, desconsiderando a posição espacial.

Atualmente, verifica-se que uma determinada lavoura não se comporta de forma homogênea, onde tanto os atributos do solo quanto os das plantas apresentam variações relacionadas ao espaço e ao tempo.

O conhecimento da variabilidade espacial do atributo do solo em uma lavoura é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura (CAMBARDELLA et al., 1994). A identificação desta variabilidade é, também, um fator de relevância considerável em sistema de produção que visa à sustentabilidade por meio do manejo localizado (CORÁ et al., 2004).

Desta maneira, para que se possa conhecer a variabilidade espacial de uma lavoura, precisa-se realizar amostragens capazes de descrevê-la e que esta ainda possa ser gerenciável. Para tal, necessita-se realizar amostragens mais detalhadas do que a realizada convencionalmente.

Amostragem (de lavouras), segundo Prezzoto (1982), é o conjunto de operações com as quais se obtém material em estudo numa porção relativamente pequena, de tamanho adequado para o trabalho no laboratório, mas que represente apropriadamente a composição média do material de onde foi retirada.

A amostragem de solo, convencionalmente difundida para a cafeicultura, preconiza que a coleta de solo deve ser realizada de 0 – 20 cm de profundidade na projeção da saia da planta de café, de ambos os lados da rua, com no mínimo 20 subamostras por gleba homogênea quanto ao solo, idade, variedade e espaçamento da cultura (MATIELLO et al., 2010).

Para amostrar o solo, ou mesmo algumas características da planta, utilizando-se as técnicas de agricultura de precisão, deve-se levar em consideração a variabilidade espacial dos atributos. Para tal, é necessária a retirada de diversas amostras em uma área. Sendo assim, torna-se imprescindível a criação das chamadas malhas amostrais (*grids* amostrais).

A criação de malhas amostrais envolve dividir uma área em seções quadradas ou retangulares de tamanhos iguais e reduzidos de forma que os agricultores realizem amostragens em cada seção (MORGAN; ESS, 1997). O objetivo desta amostragem é realizar análises em uma escala menor do que àquela tradicionalmente realizada.

Atualmente dois métodos de amostragem do solo, baseados em malhas amostrais, têm sido utilizados para descrever a variabilidade espacial dos parâmetros de fertilidade do solo: o método da malha celular e o método do centro da malha (FLOWERS; WEISZ; WHITE, 2005; MORGAN; ESS, 1997).

O método da malha celular é bem similar ao método tradicional de amostragem, porém a área é dividida em várias partes, denominadas células (MORGAN; ESS, 1997). Neste método são retiradas diversas subamostras em locais aleatórios dentro da célula e, assim, realizando-se a homogeneização destas para obter uma amostra composta, cujo valor encontrado representará a célula (FLOWERS; WEISZ; WHITE, 2005).

O método do centro da malha representa um ponto, geralmente no centro da célula da malha, onde várias subamostras são retiradas próximas ao ponto, num raio de três a seis metros, para formar uma amostra composta (FLOWERS; WEISZ; WHITE, 2005; MORGAN; ESS, 1997). Neste trabalho, a malha utilizada basear-se-á no método do centro da malha.

Na cafeicultura vários estudos foram realizados para se encontrar a variabilidade espacial e temporal de atributos do solo e da planta, utilizando-se diferentes malhas amostrais. Estes estudos serão abordados nos itens 2.2.1 e 2.2.2. Porém, mesmo estes trabalhos apresentando contribuições significativas para o estudo da variabilidade espacial dos atributos estudados, nenhum se preocupou com escolha da malha amostral ou em realizar testes de malhas amostrais, conforme será realizado pelo presente trabalho.

### 2.2.1 Malhas amostrais de atributos do solo em cafeicultura de precisão

Hoje já estão disponíveis ferramentas que possibilitam a coleta, armazenamento e análise de dados, viabilizando estudos da variabilidade espacial. Para o mapeamento dos atributos químicos do solo ainda existe contestação quanto ao tamanho da malha amostral que varia com a metodologia escolhida pelas prestadoras de serviços, ou mesmo pelas unidades pesquisadoras (FERRAZ, 2010). Uma das maiores limitações, que podem ser apontadas, para a coleta de informação de atributos do solo em escala adequada, é seu alto custo de obtenção (SÁ, 2001).

Atualmente no mercado prestador de serviços à cafeicultura, existem empresas que disponibilizam o serviço de agricultura de precisão na forma de coleta e de mapeamento dos atributos do solo. Poucos são os produtores e empresas que realizam a aplicação de insumos agrícolas à taxa variáveis, principalmente utilizando máquinas. Isto se deve à pequena divulgação das técnicas de agricultura de precisão para os cafeicultores e, também, à falta de equipamentos, como controladores mais adequados aos mecanismos adubadores existentes (FERRAZ, 2010).

Algumas metodologias de coleta de amostra de solo foram pesquisadas, a fim de se conseguir mapear os atributos do solo. Silva et al. (2007, 2008) e Silva, F. et al. (2010), desenvolvendo pesquisas em uma lavoura cafeeira (*Coffea Arabica* L.), amostraram os atributos do solo utilizando pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 25 x 25 m e 50 x 50m, perfazendo um total de 67 pontos numa área de 6,2 ha, retirando as amostras na profundidade de 0,0-0,2 m, na projeção da barra da saia do cafeeiro, utilizando o trado como extrator.

Em um estudo de duas lavouras cafeeiras (*Coffea Arabica* L.), uma com 8,2 ha (campo 1) e outra com 5,3 ha (campo 2), Molin et al. (2002) realizaram a retirada das amostras com um amostrador automatizado ATV em malhas regulares implementadas em cada área. No campo um foram retiradas 32 amostras (aproximadamente 3,9 amostras/ha), e no campo dois foram retiradas 38 amostras (7,2 amostras/ha). Cada amostra era composta de nove subamostras.

Realizando amostragem de solo em uma lavoura cafeeira (*Coffea Arabica* L.), visando à recomendação de adubação em taxa variada, Molin et al. (2006) coletaram um total de 16 pontos de amostragem em malha ajustada pelas linhas da cultura. Em cada ponto foram coletadas, com a utilização de um trado de rosca, 10 subamostras de material de solo para compor uma amostra composta representativa do ponto de amostragem, na profundidade de 0-20 cm.

Utilizando-se duas subáreas plantadas com cafeeiros (*Coffea Arabica* L.), Marques Junior et al. (2000) instalaram uma parcela de 200 por 850 metros (17 ha), dividindo-as numa malha com espaçamento regular de 50 metros entre pontos, resultando em 68 pontos para cada malha. Os solos foram amostrados em duas profundidades (0-20 cm e 60-80 cm).

Em experimento para avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo, Souza (2006) estudou duas lavouras cafeeiras (*Coffea Arabica* L.), uma com 2,0 ha submetida ao sistema convencional de produção por seis anos, e outra com 2,8 ha sob sistema orgânico por sete anos. As amostragens de solos foram feitas em espaçamento regulares de 15 m na transeção e 16 m entre transeções na profundidade de 0-20 cm, utilizando um trado holandês e retirando-se, para cada ponto amostral, nove subamostras de solo, sendo três em cada linha de plantio e três, nas entrelinhas. Essas subamostras foram misturadas para formar uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, que totalizou 98 amostras compostas para o sistema convencional e 103 para o sistema orgânico.

Em uma área de cafeeiros (*Coffea Arabica* L.) com 6,4 ha, Molin et al. (2010) realizaram amostragens de solo em uma malha irregular com 16 pontos. Cada ponto amostral correspondia a 10 subamostras coletadas paralelamente a 0,6 m a partir da rua de cafeeiros e espaçadas de 0,2 m entre si. As amostras foram coletadas com um amostrador do tipo rosca sem fim na profundidade de 0-20 m.

Estudando uma área de aproximadamente 0,8 ha de cafeeiro (*Coffea Arabica* L.), Silva et al. (2009) e Silva, S. et al. (2010b) criaram uma malha irregular com 50 pontos amostrais. Cada ponto amostral correspondia por três plantas. As amostras de solo foram retiradas na projeção da copa na profundidade de 0–20 cm, de cada planta componente do ponto amostra e depois homogeneizadas.

Quatro áreas cultivadas com cafeeiros (*Coffea Arabica* L.) foram estudadas por Faulin (2010). Para cada área foram criadas malhas amostrais distintas para cada ano de estudo. A área um foi estudada por quatro safras diferentes, possuía 8,64 ha e na primeira safra em estudo a malha amostral foi de 11 pontos, na segunda, 13 pontos e na terceira e quarta safra, 28 pontos. A área dois possuía 5,94 ha e foi estudada a partir da segunda safra com uma malha de 12 pontos, na terceira e quarta safra com uma malha amostral de 23 pontos. A área três apresentava 6,39 ha e também teve seus estudos iniciados pela segunda safra com a criação de uma malha amostral de 15 pontos, na terceira safra utilizaram uma malha de 23 pontos e na quarta safra uma malha de 25 pontos. A área quatro possuía 4,67 ha e a malha amostral desenvolvida para a segunda safra possuía 10 pontos, para a terceira safra 20 pontos e para a quarta safra 19 pontos. Em cada ponto amostral era realizada a retirada de nove subamostras distanciadas paralelamente à fileira de plantas em 0,6 m e agrupadas num intervalo de aproximadamente um metro.

Desenvolvendo estudos de variabilidade espacial de atributos do solo em uma área de 22 ha cultivada com cafeeiros (*Coffea Arabica* L.), Ferraz et al. (2012a, 2012b) utilizaram uma malha amostral de um ponto por hectare (22 pontos amostrais georreferenciados). Em cada hectare, foi realizado um caminhamento aleatório para a coleta de oito subamostras que foram homogeneizadas para gerar uma amostra composta. Tais subamostras foram retiradas na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade.

Realizando estudos em uma lavoura cafeeira (*Coffea canéfora* Pierre x Froenher) de 1,0 ha, Oliveira et al. (2008), Silva, S. et al. (2010a) e Silva, Lima e Zucoloto (2011) construíram uma malha amostral com 109 células amostrais com tamanho aproximado de 10m na linha. Cada célula amostral foi composta de cinco plantas de café, compondo área de 13,05 m<sup>2</sup>. As amostras de solo foram coletadas na projeção da copa do cafeeiro, na profundidade de 0-20 m, com auxílio de sonda inoxidável.

Observou-se que os estudos supracitados utilizaram diferentes malhas amostrais e técnicas de amostragem em malha. Uma característica comum a eles é que todos foram capazes de identificar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo nas áreas estudadas, porém não identificaram a qualidade de suas malhas amostrais.

### **2.2.2 Malhas amostrais de atributos da planta em cafeicultura de precisão**

Diversos são os atributos que podem ser estudados e obtidos por meio de amostragens de partes da planta, como por exemplo, produtividade, força de desprendimento do fruto, maturação dos frutos, pragas e doenças, nutrientes contidos na folha e maturação dos frutos. Nesta seção serão demonstradas malhas amostrais, utilizadas por diferentes autores, no intuito de se estudar a

produtividade, a força de desprendimento e, também, a maturação dos frutos de cafeeiros.

### **2.2.2.1 Malhas amostrais de produtividade do cafeeiro**

O mapeamento da produtividade de uma determinada cultura é uma das fases pertencentes ao ciclo da agricultura de precisão. Tal fase é de suma importância, pois é na colheita que os produtores irão obter os resultados de seus esforços. Para a cultura de cereais, os métodos e equipamentos necessários já são relativamente bem conhecidos, bem fundamentados e difundidos. O mesmo não pode ser dito para a cultura do café, já que ainda são poucos os trabalhos encontrados na literatura e, ainda, não existe tecnologia específica para esta cultura e difundida no mercado, dificultando a coleta dos dados de produtividade em tempo real.

A colheita dos frutos do cafeeiro, comparativamente a outras culturas, é mais difícil de ser executada, em razão do formato da planta, da desuniformidade de maturação e do elevado teor de umidade dos frutos, o que prejudica a mecanização das operações (FILGUEIRAS, 2001). Os mecanismos utilizados para se realizarem as operações, bem como a sua ordem, definem os sistemas de colheita, que podem ser classificados como manual, semimecanizado e mecanizado (SILVA, 2004). Estima-se que 70% a 80% das lavouras brasileiras são colhidas manualmente (MATIELLO et al., 2009). Estas características relatadas, acrescidas dos fatores econômicos e do interesse das empresas desenvolvedoras de equipamentos, podem estar entre os motivos para a não difusão e desenvolvimento de equipamento monitores de colheitas instalados em colhedoras de cafés.

Diante do exposto, o estudo da variabilidade espacial da produtividade colhida manualmente ganha destaque dentro da cafeicultura de precisão. Desta forma, malhas amostrais serão de fundamental importância para o mapeamento

da distribuição espacial da produtividade, principalmente no âmbito da colheita manual ou semimecanizada dos frutos de cafeeiros.

Para o estudo da variabilidade espacial da produtividade, Silva et al. (2007, 2008) e Silva, F. et al. (2010) realizaram a colheita manual dos frutos de cafeeiros sobre panos de quatro plantas em torno de pontos amostrais, devidamente georreferenciados, por meio do uso de GPS. O volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após esta medição, foi retirada a média de produtividade das plantas, resultando no valor de produtividade para o ponto amostral. A área experimental de 6,2 ha foi dividida em duas malhas regulares na distância de 25 X 25 e 50 X 50 metros, totalizando 67 pontos de amostragem.

A variabilidade espacial da produtividade de uma área plantada com café Robusta foi estudada por Oliveira (2007) e Silva, S. et al. (2010b). Foram demarcados pontos amostrais, definidos como células, situados dentro de uma malha irregular de aproximadamente um ha, totalizando 109 pontos. As coordenadas de cada ponto amostral foram obtidas com um GPS geodésico. A coleta foi realizada em cada ponto central da célula num espaçamento de dez em dez metros, na linha do cafeeiro. Os frutos de café das cinco plantas de cada célula foram derriçados manualmente em peneiras e posteriormente colocados em um saco devidamente identificado. No laboratório foi determinada a produção de café úmido de cada saco (composto de cinco plantas).

Ao estudar duas lavouras cafeeiras, uma com 2,0 ha submetida ao sistema convencional de produção por seis anos e outra com 2,8 ha sob sistema orgânico por sete anos, Souza (2006) colheu manualmente frutos em seis plantas de café por ponto na malha, espaçadas de 16 m entre as linhas de plantio da cultura nas safras de 2003/2004 e 2004/2005. Depois de coletados, os grãos foram submetidos à limpeza para separação de galhos e folhas e medidos em

recipiente graduado em litros para determinação da produção em cada ponto na malha.

Uma metodologia para mapear variabilidade espacial da produtividade de cafés de montanha foi proposta por Oliveira (2003). Esta metodologia foi composta da etapa de georreferenciamento, codificação e rotulação dos cafeeiros dentro do talhão. A etapa de colheita foi dividida em catação e colheita final, quando foram pesadas e amostradas todas as medidas colhidas no talhão, 129 na catação e 339 na colheita final. Esta metodologia proposta permitiu mapear a variabilidade da produtividade. Porém, a dificuldade da definição da área de influência de cada saco colhido resultou em valores de produtividade irreais em alguns pontos, demandando futuros estudos na definição dessa área e, ou, em metodologias de filtragem dos dados.

Em seus estudos em uma área de 22 ha de cafeeiros, Ferraz et al. (2012a, 2012c), no ano de 2008, coletaram dados de produtividade utilizando uma malha amostral composta por 58 pontos. Ferraz et al. (2012b, 2012c), no ano de 2009 e Ferraz et al. (2012a), no ano de 2010, utilizaram uma malha amostral composta por 48 pontos. Cada ponto amostral correspondeu a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado, e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referência. A produtividade de café (L planta<sup>-1</sup>) foi obtida por meio da colheita manual sobre panos das quatro plantas em torno do ponto amostral, e o volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após essa medição, foi obtida a média de produtividade destas quatro plantas, resultando no valor de produtividade para o ponto amostral.

Observou-se que todos os trabalhos mencionados acima conseguiram mapear a variabilidade espacial da produtividade do cafeeiro por meio de

diferentes malhas e métodos amostrais. Contudo, tais trabalhos não se preocuparam com testar as malhas utilizadas com relação à exatidão e precisão.

#### **2.2.2.2 Malha amostral de força de desprendimento dos frutos de cafeeiros**

Para a coleta dos dados de força de desprendimento dos frutos maduros e verdes de cafeeiros Ferraz et al. (2012b) criaram uma malha irregular com 48 pontos amostrais. Cada ponto amostral correspondeu a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado, e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referência.

#### **2.2.2.3 Malha amostral da maturação de frutos de cafeeiros**

Um atributo importante de ser estudado na cafeicultura é a maturação dos frutos do cafeeiro, pois é em função deste atributo que dependerá o rendimento da lavoura durante a colheita determinando o ponto de colheita dos frutos e a qualidade de bebida.

A malha amostral utilizada por Oliveira (2003) para mapear a variabilidade espacial da maturação dos frutos de cafezais de montanha em um talhão de um ha era composta por 128 pontos amostrais.

Para a amostragem de maturação dos frutos de cafeeiro, Alves (2009) utilizou uma malha de 60 pontos por hectare realizando a coleta de forma alternada com relação às linhas de plantio e nestas linhas foi realizada uma amostragem pontual a cada 40 plantas.

### **2.3 Geoestatística**

As ideias iniciais da Geoestatística surgiram na África do Sul, quando Daniel Krige, em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro em sua tese de mestrado em Engenharia de Minas (na Escola de Minas da Universidade de Paris, localizada na cidade de Fontainebleau, França), concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras (VIEIRA, 2000). George Matheron, orientador de Krige, é considerado o pai da Geoestatística por seus trabalhos nas bases teóricas de um método de interpolação espacial denominado krigagem, na década de 1960 (VALENCIA; MEIRELLEZ; BETTINI, 2004). Sendo assim, Matheron em 1963, na Escola de Minas de Paris, França, baseado nas observações de Krige, desenvolveu uma teoria, a qual ele chamou de teoria das variáveis regionalizadas que contém os fundamentos da Geoestatística. Segundo essa teoria, a diferença nos valores de uma dada variável em dois pontos no espaço depende da distância entre eles de acordo com sua dependência espacial. Nesse caso, quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso por meio da dependência espacial, pode-se aplicar a Geoestatística para obter informações adicionais às obtidas com a análise clássica (VIEIRA, 2000).

A Geoestatística é uma metodologia importante para análise de dados no âmbito da agricultura de precisão. Pode ser usada no planejamento e mapeamento de amostragens do solo e planta, na análise da continuidade espacial e de atributos do solo e planta, e na interpolação dos dados por meio da krigagem (VALENCIA; MEIRELLEZ; BETTINI, 2004).

O objetivo da Geoestatística aplicada à agricultura de precisão é caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas e fazer estimativa, utilizando o princípio da variabilidade espacial a fim de se identificarem interrelações desses atributos no espaço e no tempo, além de permitir estudar padrões de amostragem adequada (VIEIRA, 2000).

A Geoestatística é um conjunto de técnicas para estimar valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de determinada área a ser estudada e, segundo Cressie (1993), apesar de toda a sua complexidade formal, toda a Geoestatística é baseada, fundamentalmente, em apenas dois conceitos: o semivariograma e a krigagem. O primeiro tem o papel de descrever a estrutura da variabilidade espacial, e o segundo possui a função de prever, não-tendenciosamente e com variância mínima, os valores não medidos (LAMPARELLI; ROCHA; BORGHI, 2001). Ainda de acordo com estes autores, a krigagem se distingue de outros métodos de interpolação por ser um método que utiliza um modelo empírico da continuidade espacial existente, ou do grau de dependência espacial com base na distância ou direção das amostras, expresso pelo semivariograma.

### **2.3.1 Semivariograma**

Um dos métodos mais antigos para se estimar a dependência, no espaço (ou no tempo), de amostras vizinhas é por meio da autocorrelação espacial (ou temporal) das amostras, que caracteriza a dependência espacial (ou temporal), também detectada por outro método, que é a utilização do semivariograma (SILVA, 1988). Aqui a dependência considerada será apenas a espacial. O semivariograma é mais utilizado para analisar o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimação de valores em locais não amostrados, pela técnica de krigagem.

A teoria da Geoestatística é baseada na observação de que a variabilidade espacial de uma variável espacial  $Z(x)$  apresenta uma estrutura que pode ser modelada (JOURNEL; HUIJBREGTS, 2003).  $Z(x)$  representa a

variável aleatória  $Z$  em estudo, que ocorre, por exemplo, na posição de coordenadas  $x = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ , onde  $u$  é a latitude e  $v$  a longitude.

A variabilidade entre as variáveis aleatórias  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$  é caracterizada pelo semivariograma. Para o uso da estimação do semivariograma devem-se assumir algumas hipóteses como a de estacionariedade, a fim de se caracterizar uma variável aleatória ao longo do espaço. Segundo Valência, Meirelles e Bettini (2004), uma amostra na dimensão espacial corresponde a uma única observação do fenômeno, não existindo, assim, replicação do fenômeno, isto é, em análise espacial, quando temos  $n$  pontos amostrados, não se tem uma amostra de tamanho  $n$  (como é na Estatística clássica) mas, sim, tem-se  $n$  amostras de tamanho um.

Uma variável aleatória  $Z(x)$  é estacionária, se o desenvolvimento desse processo no tempo ou no espaço ocorrer de maneira mais ou menos homogênea, com oscilações aleatórias contínuas em torno de um valor médio, em que tanto a amplitude média como as oscilações não mudam bruscamente no tempo ou no espaço. Segundo Cressie (1993), existem várias definições de estacionariedade e, de acordo com Valência, Meirelles e Bettini (2004), as mais comuns são: a estacionariedade de segunda ordem e a hipótese intrínseca.

A hipótese intrínseca é mais abrangente do que a hipótese de estacionariedade de segunda ordem. Na hipótese intrínseca tem-se:

a) A esperança  $Z(x)$  existe e não depende do ponto  $x$ .

$$E[Z(x)] = m;$$

b) Para qualquer vetor de  $h$ , a variância da diferença  $[Z(x+h) - Z(x)]$  existe e não depende do ponto  $x$ , mas apenas da distância  $h$ .

$\text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] = E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} = 2 \gamma(h)$ , que é o semivariograma.

A hipótese intrínseca é a mais frequentemente usada em Geoestatística, por ser menos restritiva. O semivariograma exige apenas esta hipótese o que o torna como a ferramenta mais difundida na Geoestatística.

De acordo com Oliveira (1991), o gráfico de  $\gamma(h)$  versus os valores correspondentes de  $h$ , sendo uma função do vetor  $h$ , depende de magnitude (ou norma) e direção de  $h$ . Quando há dependência da norma e da direção, o fenômeno chama-se anisotrópico e, quando depende somente da norma (distância) denomina-se isotrópico. Neste trabalho será considerada apenas dependência isotrópica e o símbolo  $h$  para representar distância.

A semivariância é estimada classicamente segundo a equação um:

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

em que  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ . O semivariograma experimental é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$  versus  $h$ .

Do ajuste de um modelo matemático teórico aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$  são estimados os parâmetros do modelo teórico para o semivariograma, denominados de efeito pepita,  $C_0$ ; contribuição,  $C_1$ ; patamar,  $C_0+C_1$ ; e o alcance,  $a$  (VIEIRA et al., 1983) (Gráfico 1).

A semivariância tende a aumentar conforme aumenta a distância. Quando a semivariância tende a estabilizar-se em uma constante, este limite é denominado patamar,  $C_0+C_1$ . O semivariograma pode se aproximar de forma assintótica ou atingir o patamar numa determinada distância, o alcance  $a$ . O alcance e o patamar podem variar com a direção, sendo este o caso da anisotropia, que não será considerado aqui.

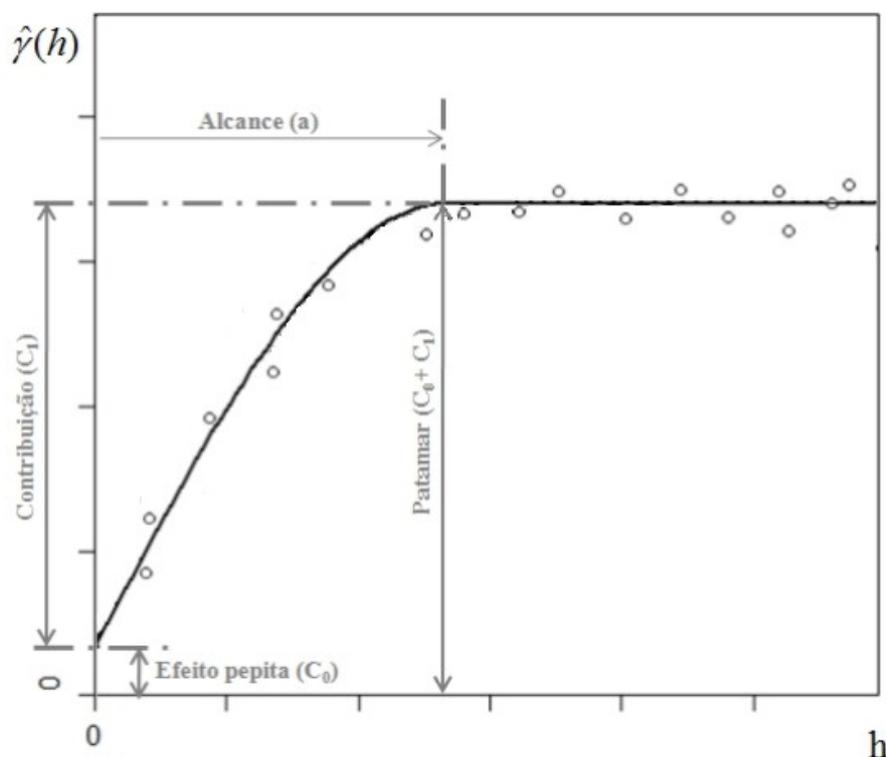


Gráfico 1 Semivariograma experimental (pontos) com modelo teórico esférico ajustado (linha) e seus parâmetros.

O efeito pepita  $C_0$  é um parâmetro importante do semivariograma e indica a variabilidade não explicada. Esse parâmetro pode ser expresso como porcentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). De acordo com Valência, Meireles e Bettini (2004), o efeito pepita é definido como uma descontinuidade do semivariograma na origem, sendo este parâmetro utilizado para explicar duas possíveis fontes de variação: variação do atributo para distâncias menores que a considerada na malha de amostragem e erros aleatórios de medição.

O alcance (a) determina a região espacial até onde a variável é autocorrelacionada. Os valores do alcance relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; WEBSTER, 2000). Se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de  $h$ , tem-se o efeito pepita puro  $e$ , neste caso, tem-se a ausência total de dependência espacial, ou seja, a dependência espacial, se existir, será manifestada à distância menor do que o menor espaçamento entre amostras.

### **2.3.2 Krigagem**

Na maioria das vezes, o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, desejando-se, também, prever valores em pontos não amostrados. O interesse pode ser em um ou mais pontos específicos da área, ou obter uma malha de pontos interpolados que permitam visualizar o comportamento da variável na região, por meio de um mapa de isolinhas ou de superfície (SILVA, 2006).

A interpolação espacial é o processo de predição de uma variável em posições não amostradas, usando a informação de uma amostra (VALÊNCIA; MEIRELLES; BETTINI, 2004). A krigagem é o método de interpolação da Geoestatística, que utiliza a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Estas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos seja nula, e a condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por

ponto entre o valor estimado e o medido, essas diferenças são mínimas (BURGESS; WEBSTER, 1980).

Segundo Vieira (2000), para a aplicação da krigagem, assume-se que sejam conhecidas as realizações  $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$  da variável aleatória espacial  $Z(x)$ , nos locais  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , (amostra); que o semivariograma da variável já tenha sido determinado; e que o interesse seja estimar um valor  $\hat{Z}$  na posição  $x$ . O estimador  $\hat{Z}(x)$  de  $Z(x)$  é dado por:

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

em que  $n$  é o número de vizinhos,  $Z(x_i)$ , envolvidos na estimativa, e  $\lambda_i$  são os pesos associados a cada valor medido. Para atender as condições de interpolador ótimo (krigagem), requer-se:

$$E\left\{\hat{Z}(x_0) - Z(x)\right\} = 0$$

$$Var\left\{\hat{Z}(x) - Z(x)\right\} = E\left\{\left[\hat{Z}(x) - Z(x)\right]^2\right\} = \text{mínima}$$

Para que  $\hat{Z}(x)$  seja um estimador não tendencioso de  $Z(x)$ , a soma dos pesos das amostras tem que se igualar a um.

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

Para obter a variância mínima, introduz-se o multiplicador de Lagrange ( $\mu$ ), e o sistema de krigagem resultante é deduzido segundo a equação seis:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x); \quad i=1 \text{ a } N \quad (6)$$

A solução deste sistema de equações simultâneas dá os pesos de krigagem  $\lambda_i$ .

### 2.3.3 Validação

Nos estudos de Geoestatística busca-se o melhor ajuste do semivariograma que servirá de base para realizar a krigagem, desta forma fazendo com que as estimativas se tornem mais confiáveis, o que permite a confecção de mapas temáticos mais próximos à realidade.

Uma das maneiras de se avaliar a qualidade da estimação e ajuste dos semivariogramas e, também, de outras características da pesquisa (malha de amostragem) é pela validação. Faraco et al. (2008) citam que os métodos de validação comparam valores da krigagem (isto é, valores preditos) e os valores empíricos obtidos na amostragem (isto é, valores observados).

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), a validação é a técnica de avaliação de erros de estimativa que permite comparar valores preditos com os amostrados. O valor  $z$  da amostra, em certa localização  $x_i$  (isto é, o valor  $z(x_i)$ ), é temporariamente descartado do conjunto de dados e, então, é feita uma predição  $\hat{Z}(x_i)$  por krigagem no local, usando-se outros pontos amostrados. Desta forma, é possível retirar alguns valores que serão muito úteis para a escolha do método, tais como: o Erro Absoluto (EA) (equação dois), o Desvio Padrão do Erro Absoluto ( $DP_{EA}$ ) (equação três), o Erro Reduzido (ER) (equação quatro), e o Desvio Padrão dos Erros Reduzidos ( $S_{ER}$ ) (equação cinco), dentre outros.

$$EA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)) \quad (2)$$

$$DP_{EA} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (Z(x_i) - \hat{Z}(x_i))^2} \quad (3)$$

$$ER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)}{\sigma(\hat{Z}(x_i))} \quad (4)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)}{\sigma(\hat{Z}(x_i))} \right\}^2} \quad (5)$$

Existem alguns tipos de validação, dentre eles podem-se destacar dois tipos: a validação cruzada e a autovalidação. Na validação cruzada, a massa de dados é dividida em duas partes e em uma destas partes é feita a estimação e ajuste do semivariograma e na outra parte a comparação entre os valores preditos (por krigagem) e observados. Na autovalidação, tanto a estimação e ajuste de semivariogramas, quanto à comparação por krigagem entre valores preditos e observados são feitas na massa de dados total, sem qualquer divisão. Neste trabalho sempre será usada a autovalidação.

## REFERÊNCIAS

ALVES, E. A. **Variabilidade espacial e temporal da qualidade do café cereja produzido na região das serras de Minas**. 2009. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

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.

BALASTREIRE, L. A. et al. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade de uma cultura de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

BATTE, M. T.; EHSANI, M. R. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 53, n. 1, p. 28-44, Aug. 2006.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II., block kriging. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 31, n. 2, p. 333-341, Feb. 1980.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, May 1994.

CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, nov./dez. 2004.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

CRESTANA, S.; FRAGALLE, E. P. A trilha da quinta potência: um primeiro ensaio sobre ciência e inovação, agricultura e instrumentação agropecuária brasileiras. **Revista Eixo**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 6-27, 2012.

DERCON, G. et al. Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1/2, p. 15-26, Apr. 2006.

FARACO, M. A. et al. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 463-476, mar./abr. 2008.

FAULIN, G. C. **Influência da adubação em doses variadas na produtividade e no estado nutricional da cultura do café (*Coffea arabica* L.)**. 2010. 103 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

FERRAZ, G. A. S. **Cafeicultura de precisão: análise econômica e uso da geostatística**. 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012a.

\_\_\_\_\_. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, Jan. 2012b.

\_\_\_\_\_. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012c.

FILGUEIRAS, W. H. **Modelagem da planta de café por elementos finitos para estudos de colheita por vibração**. 2001. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

FLOWERS, M.; WEISZ, R.; WHITE, J. G. Yield-based management zones and grid sampling, strategies: describing soil test and nutrient variability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 968-982, May 2005.

HURLEY, T.; OISHI, K. G.; MALZER, G. Estimating the potential value of variable rate nitrogen applications: a comparison of spatial econometric and geostatistical models. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, Bozeman, v. 30, n. 2, p. 231-249, 2005.

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

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

LAMPARELLI, A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, R. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118 p.

LANNA, G. B. M.; TEIXEIRA, E. C.; REIS, R. P. Determinantes da adoção da tecnologia de despolpamento na cafeicultura: estudo de uma região produtora da Zona da Mata de Minas Gerais. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v. 13, n. 3, p. 352-362, 2011.

MARQUES JÚNIOR, J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob cultivo de café, em patrocínio, MG. In: BALASTREIRE, L. A. (Ed.). **O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: ESALQ, 2000. p. 105-112.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. Varginha: MAPA/PROCAFÉ, 2010. 544 p.

\_\_\_\_\_. **Melhorando a colheita do café**. Varginha: Fundação PROCAFÉ, 2009. 44 p.

MOLIN, J. P. et al. Precision agriculture for coffee in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2002, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: ASA/CSSA/SSSA, 2002. p. 578-587.

\_\_\_\_\_. Taxa variada de P e K em um cafezal e sua influência na produtividade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., 2006, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: USP/ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

\_\_\_\_\_. Teste procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.

MORGAN, M.; ESS, D. **The precision farming guide for agriculturists**. Moline: Deere, 1997. 117 p.

MZUKU, M. et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1572-1579, May 2005.

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

OLIVEIRA, M. S. **Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando Geoestatística**. 1991. 100 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

OLIVEIRA, R. B. **Mapeamento e correlação de atributos do solo e de plantas de café conilon para fins de agricultura de precisão**. 2007. 129 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.

OLIVEIRA, R. B. et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, jan./mar. 2008.

PREZOTTO, M. E. M. **Amostragem de solo para fins da avaliação da fertilidade na área de reforma de canaviais**. 1982. 128 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1982.

SÁ, M. F. M. **Abordagem quantitativa na predição espacial de atributos do solo e geração de zonas de manejo agrícola**. 2001. 117 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2001.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 1988. 105 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1988.

SILVA, F. M. da. **Colheita mecanizada e seletiva do café: cafeicultura empresarial: produtividade e qualidade**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 75 p.

SILVA, F. M. da et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010.

\_\_\_\_\_. 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, jan./fev. 2008.

SILVA, F. M. da et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SILVA, S. A. et al. Distribuição e incerteza da acidez de um latossolo vermelho-amarelo húmico sob cultivo de café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 4, p. 1053-1060, jul./ago. 2009.

\_\_\_\_\_. Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 9-17, jan./mar. 2010a.

\_\_\_\_\_. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 1, p. 15-22, jan./fev. 2010b.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; ZUCOLOTO, M. Distribuição espacial das frações granulométricas em um latossolo vermelho amarelo utilizando krigagem indicativa. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 3, p. 195-202, maio/jun. 2011.

SOUZA, C. K. **Variabilidade espacial de atributos de solo e produtividade em área cultivada com café orgânico e convencional**. 2006. 65 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, Feb. 1985.

VALÊNCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S. P.; BETTINI, C. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 37-56.



VIEIRA, S. R. Geostatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-7, 1983.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 1/2, p. 149-163, 2000.

## **CAPÍTULO 2**

### **Metodologia para determinação de malhas amostrais de solo e planta em cafeicultura de precisão**

#### **RESUMO**

Objetivou-se neste capítulo desenvolver e propor uma metodologia para avaliar a qualidade de diferentes malhas amostrais, além de permitir a escolha daquela que melhor se adeque a uma ou a um conjunto de atributos. Objetivou-se, ainda, testar esta metodologia para atributos do solo e da planta de cafeeiros, de forma a encontrar uma malha amostral que melhor se adeque aos atributos em estudo. A estrutura e a magnitude da dependência espacial dos atributos foram caracterizadas, por meio do semivariograma, ajustado pelo método dos quadrados mínimos ordinários e pelo modelo esférico. Isto possibilitou aplicar as técnicas de validação, que serviram de base para a criação de índices que permitem avaliar a qualidade das malhas e de um indicador que aponte a melhor malha amostral. Para se testar a metodologia, realizou-se um experimento na fazenda Brejão, utilizando-se os atributos químicos do solo: fósforo, fósforo remanescente, potássio e CTC potencial e atributos da planta: produtividade, índice de maturação e diferença da força de desprendimento de frutos de cafeeiros, amostrados em pontos georreferenciados. Foi desenvolvido e proposto o índice de exatidão (IE), o índice de precisão (IP) e o indicador de malha ótima (IMO), que possibilita a escolha de malhas amostrais. Para se testar a metodologia, foram desenvolvidas e comparadas 20 malhas amostrais que foram aplicadas aos atributos do solo e da planta. Foi possível caracterizar a magnitude da variabilidade espacial dos atributos do solo em estudo quase todas as malhas propostas (exceto para a CTC potencial na Malha 20) e em todas as malhas propostas para atributos da planta. O índice de exatidão (IE) e o índice de precisão (IP) se mostraram importantes para analisar a qualidade das malhas amostrais em estudo. O IMO permitiu a escolha da malha amostral que melhor representou os quatro atributos do solo, sendo ela a malha com 64 pontos amostrais em malha quadrada (três pontos por hectare). Para os três atributos da planta, o IMO apontou a melhor malha a com 73 pontos amostrais, sendo 64 pontos em malha quadrada e nove pontos em malha zoom.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, Geoestatística, Cafeeiro, Variabilidade Espacial, Fertilidade do Solo, Colheita do cafeeiro.

## ABSTRACT

The aim of this chapter was to develop and to propose a methodology to evaluate the quality of different grid sampling. Besides it allows to choose the grid that better suit to one or to a set of variables. It was also aimed testing this methodology in soil attributes and coffee plant attributes in order to find the grid sampling that better fitted to the studied variables. The structure and magnitude of the spatial dependence were characterized by variogram adjusted by the ordinary latest square and by the spherical model. It allowed applying validation techniques that worked as a base to create an index to evaluate the grid quality and to develop an indicator that points out the best grid sampling. In order to test the methodology it was carried out an experiment on Brejão farm in Três Pontas, Minas Gerais. As a data base were used soil chemical data such as phosphorus, remain phosphorus, potassium and potential CEC, and plant variables such as yield, maturation index, difference between detachment force of coffee fruit, sampled in a georeferenced location. It was developed and proposed an accuracy index (IE), a precision index (IP) and the indicator of optimal grid (IMO) which allows the choice among sampling grids. In order to test this methodology, it was developed and compared 20 sampling grids that were applied to the soil and plant variables. It was possible to characterize the spatial variability magnitude of the studied soil chemicals attributes to almost all the proposed grids (excepted grid 20 of the CEC in pH 7) and to all of the proposed grids to plant variables. The accuracy index (IE) and the precision index (IP) were important to evaluate the quality of the studied sampling grids. The IMO has also allowed the choice of the sampling grid that best represented the four studied soil variables. Thus the grid with 64 sampling points in a square mesh (3 points by hectare) was picked to soil variables. To the three plant variables the IMO pointed out the grid with 73 sampling points (64 points in a square mesh and 9 points of zoom grid) as the best grid sampling.

Keywords: Precision Agriculture, Geostatistics, Coffee Plant, Spatial Variability, Soil Fertility, Coffee plant harvest.

## 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura vem a cada dia passando por uma modernização de seus processos produtivos visando sempre aumentar, ou manter, a produtividade e a rentabilidade das lavouras. De acordo com Bliska et al. (2009), nos últimos anos, o agronegócio do café brasileiro internalizou novas técnicas de produção que promoveram impactos positivos sobre produtividade, competitividade e qualidade final do produto.

Uma técnica que corrobora com esta modernização dos processos é a implantação da agricultura de precisão nas lavouras cafeeiras. Segundo Ferraz et al. (2012a), a agricultura de precisão na cafeicultura vem sendo denominada de cafeicultura de precisão. Ferraz et al. (2012c) a definem como um conjunto de técnicas e tecnologias capaz de auxiliar o cafeicultor a manejar sua lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando maximizar a rentabilidade, aumentar eficiência da adubação, pulverização e colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto. Além disso, de acordo com Ferraz et al. (2011), a cafeicultura de precisão pode ser uma técnica economicamente viável para os produtores.

Corá et al. (2004) e Grego e Vieira (2005) afirmam que o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado como princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, independentemente de sua escala. De acordo com Silva et al. (2003), o estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo tem destacada importância para escolha de uma área experimental, locação das unidades experimentais, coleta de amostra e interpretação de resultados, levantamento e classificação de solos e nos esquemas de uso racional de fertilizantes.

Observa-se que o cultivo de cafeeiros no Brasil se dá dentro de uma diversidade de fatores os quais podem influenciar fortemente a produtividade do cafeeiro. O manejo da lavoura de forma homogênea pode acarretar na redução de rentabilidade do produtor rural. Nesse sentido, análises espaciais de produtividade tendem a possibilitar o gerenciamento mais eficiente do processo produtivo (ALVES et al., 2009a). Com os mapas de variabilidade espacial da produtividade, os produtores podem identificar áreas de uma lavoura onde a produtividade pode ser melhorada ou onde há a necessidade de ajustes na recomendação de adubos visando otimizar a renda da propriedade (PIERCE et al., 1997).

A colheita dos frutos de cafeeiros é caracterizada por ser mais difícil de estudar do que a de outras culturas, como por exemplo, as culturas de cereais. Isto se dá em decorrência das características como formato da planta, maturação não uniforme dos frutos e alta umidade dos frutos. Silva et al. (2006) citam que o índice de maturação (IMAT) permite definir o período de colheita de cada talhão e 20 a 25% de frutos verdes caracterizam o início da colheita (IMAT de 75 a 80%), 10 a 15% de frutos verdes representam o meio da colheita (IMAT de 85 a 90%) e menos de 5% para o fim da colheita (IMAT de 95%). Silva (2008) observou que a força de desprendimento dos frutos verdes era 73% maior que a dos frutos maduros e que esta diferença poderia ser um fator importante para a colheita mecanizada seletiva dos frutos do cafeeiro. Desta forma, o estudo da variabilidade espacial do índice de maturação e da força de desprendimento dos frutos de cafeeiro, aliado ao estudo da produtividade, pode ser de extrema importância para uma melhor operação de colheita mecanizada.

O entendimento da variabilidade espacial na lavoura exige uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragens no campo (SOUZA; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2004). Tais amostragens, principalmente referentes às malhas amostrais, ainda geram

discussões entre cientistas, técnicos, comerciantes e produtores, que ainda não possuem padrões bem estabelecidos para a cafeicultura. Oliveira (1991) informa que a amostragem espacial deve ser realizada sempre se utilizando malhas regulares, pois a alocação aleatória dos pontos amostrados no campo impedirá o aproveitamento ótimo de toda a informação espacial obtida pela amostragem.

De acordo com Nanni et al. (2011), as malhas amostrais utilizadas nas mais diversas culturas brasileiras estão em torno de um ponto a cada dois a três hectares e, em algumas culturas, utilizam-se até um ponto a cada quatro hectares. A malha amostral mais utilizada comercialmente na cafeicultura é a de um ponto a cada hectare (FERRAZ et al., 2012a).

A utilização de malhas de tamanho insatisfatório pode gerar mapas que não refletem aquilo que se encontra no campo e dessa maneira gerando recomendações técnicas errôneas o que poderá causar prejuízos aos seus usuários. Assim, o estudo de malhas amostrais se torna de fundamental importância para o gerenciamento mais preciso da variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta em uma lavoura cafeeira, principalmente visando à aplicação da adubação em taxas variáveis e o gerenciamento da colheita dos frutos de cafeeiros.

Diante do exposto, objetivou-se no presente capítulo desenvolver e propor uma metodologia que possibilitasse avaliar e comparar a qualidade de diferentes malhas amostrais, além de permitir a escolha da malha que melhor caracterize a variabilidade espacial de uma ou de um grupo de atributos. Objetivou-se, ainda, testar esta metodologia para o estudo de malhas amostrais de atributos do solo de uma lavoura cafeeira e da planta de cafeeiros, de forma a encontrar aquela que mais se adeque aos atributos em estudo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi desenvolvido na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais (Gráfico 1), em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) da cultivar Topázio, transplantada em dezembro de 2005, no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3289 plantas.ha<sup>-1</sup>. As coordenadas geográficas do ponto central da área são de 21°25'58" de latitude sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich. A altitude máxima desta área é de 914,7 m e o mapa planialtimétrico está apresentado no Gráfico 2. Os pontos limites da área (Gráfico 2) foram obtidos por meio do uso de GPS topográfico.

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

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

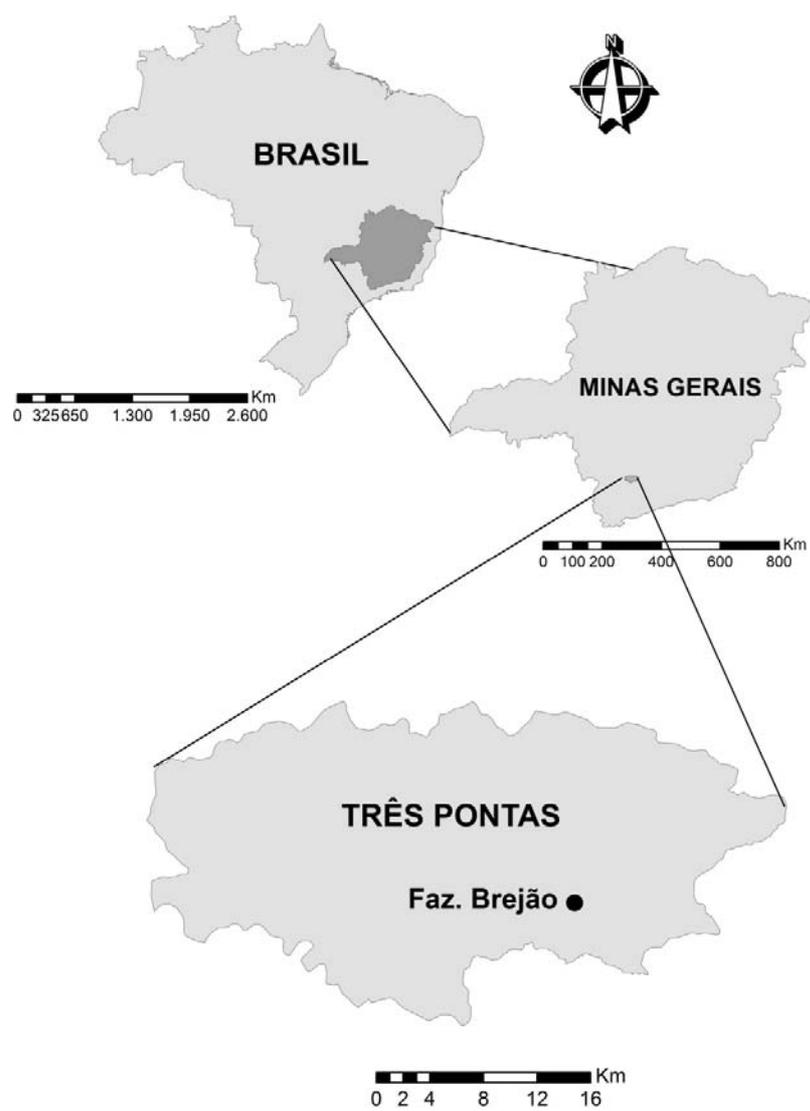


Gráfico 1 Localização da área experimental

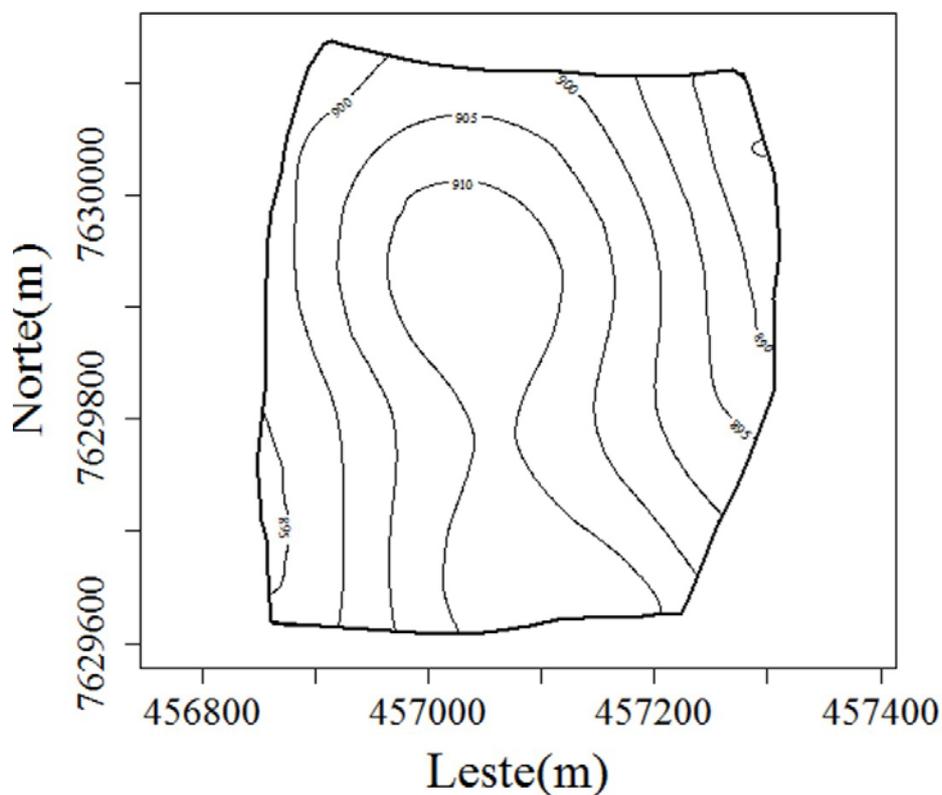


Gráfico 2 Mapa planialtimétrico da área de 22 ha da fazenda Brejão

## 2.2 Malha amostral inicial

Demarcou-se na área em estudo, com a utilização do GPS topográfico (com erro médio de 10 cm), uma malha amostral regular, com pontos espaçados de 57 x 57 m, totalizando 64 pontos amostrais georreferenciados (em média 2,9 pontos por hectare). No interior desta malha, foram criadas mais quatro malhas amostrais regulares, cujos pontos eram espaçados de 3,8 x 3,8 m, denominadas de *zoom*. Estas malhas foram posicionadas em quatro pontos da malha principal. Cada *zoom* corresponderá a 10 pontos amostrais georreferenciados (um ponto da malha principal e nove pontos da nova malha). Desta forma, a malha amostral

inicial, denominada de Malha um, possuía 100 pontos amostrais georreferenciados (Gráfico 3). A partir da Malha um foram desenvolvidas outras malhas.

Cada ponto amostral correspondeu a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referencia (Gráfico 3).

O uso das malhas *zoom* tem por objetivo detectar variações em pequenas distâncias, colaborando para a redução do efeito pepita, conseqüentemente, contribuindo para aprimorar a malha utilizada. Este tipo de amostragem, onde se utilizam malhas menores (*zoom*) dentro de uma malha maior, também foi utilizado nos trabalhos de Gontijo et al. (2007) e Sampaio et al. (2010).

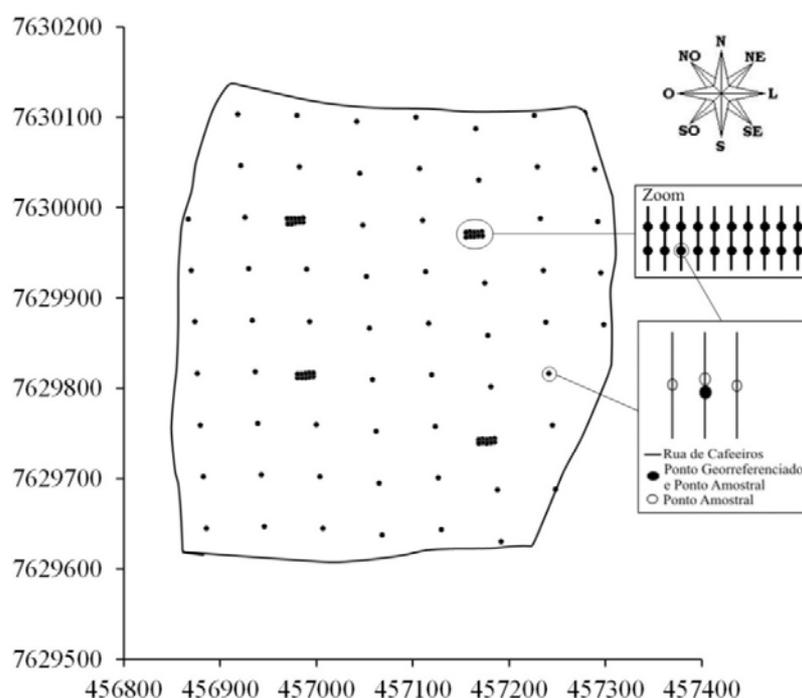


Gráfico 3 Malha Amostral inicial (Malha um), detalhamento do zoom e da amostragem

### 2.3 Desenvolvimento de uma metodologia para estudo de malhas amostrais

Para o desenvolvimento de uma metodologia que possibilite a escolha de malhas amostrais de atributos do solo ou da planta, deve-se contemplar, primeiramente, a existência da dependência espacial dos atributos estudados para cada malha a ser testada. Havendo esta dependência, deve-se modelá-la e, assim, avaliar se esta foi bem realizada ou não.

Para analisar a dependência espacial das variáveis aleatórias (atributos) em estudo e para malha amostral a ser avaliada, foram ajustados semivariogramas. A semivariância é classicamente estimada pela equação um:

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

em que  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ . O semivariograma é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$  versus  $h$ . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$ , são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita ( $C_0$ ); patamar ( $C_0 + C_1$ ); e o alcance ( $a$ ), conforme descrito por Bachmaier e Backers (2008).

Foi utilizado o método dos Quadrados Mínimos Ordinários (OLS) e o modelo esférico para todos os atributos estudados e para todas as malhas testadas. Ferraz et al. (2012a), estudando diferentes métodos e modelos, constataram que o modelo esférico foi o que se ajustou à maioria dos atributos do solo e à produtividade do cafeeiro. Este modelo é muito utilizado em trabalhos que estudam a variabilidade espacial em lavouras cafeeiras, sendo aplicado a atributos do solo, produtividade, desfolha, força de desprendimento de frutos e infestação de praga (ALVES et al., 2009a; FERRAZ et al., 2012b;

MOLIN et al., 2010; SILVA et al., 2007, 2008; SILVA, A. et al., 2010; SILVA, F. M. et al., 2010).

Para se conhecer a qualidade do ajuste, utilizou-se o grau de dependência espacial dos atributos (GD) como proposto por Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita < 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca > 75%.

Uma das maneiras de se avaliar a qualidade da estimação e ajuste dos semivariogramas e, também, de outras características da pesquisa, tais como a malha amostral, é por meio da validação. De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), a validação é a técnica de avaliação de erros de estimativa que permite comparar valores preditos com os amostrados. O valor da amostra, em certa localização  $Z(x_i)$ , é temporariamente descartado do conjunto de dados e, então, é feita uma previsão por krigagem (ordinária) no local  $\hat{Z}(x_i)$ , usando-se as amostras restantes. Dessa forma, é possível retirar alguns valores que serão muito úteis para a observação dos erros apresentados por cada malha, tais como o Erro Absoluto (EA) (equação dois), que deve apresentar o valor mais próximo de zero, e o Desvio Padrão do Erro Absoluto ( $DP_{EA}$ ) (equação três), que deve ser o menor possível.

$$EA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)) \quad (2)$$

$$DP_{EA} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (Z(x_i) - \hat{Z}(x_i))^2} \quad (3)$$

em que  $n$  é o número de dados;  $Z(x_i)$ , valor observado no ponto  $x_i$ ; e  $\hat{Z}(x_i)$  valor predito por krigagem ordinária no ponto  $x_i$ , sem considerar a observação  $Z(x_i)$ .

Por não existirem trabalhos científicos que apresentaram ou desenvolveram uma metodologia que possibilitasse comparar diferentes malhas amostrais, foi desenvolvido, proposto e testado por este trabalho dois índices que representam a qualidade da malha amostral. Estes índices baseiam-se nos valores de Erro Absoluto (EA) e Desvio Padrão do Erro Absoluto ( $DP_{EA}$ ). Com a obtenção destes índices foi possível ainda desenvolver, propor e testar um indicador que aponte a malha amostral que melhor represente os dados.

A análise geoestatística foi realizada por meio do sistema computacional estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011), utilizando-se a biblioteca geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001).

#### **2.4 Teste da metodologia desenvolvida**

Como fonte de dados para se testar os índices e o indicador propostos, foram utilizados atributos do solo e da planta de cafeeiro.

As coletas de amostras do solo foram realizadas em junho de 2011, por meio da retirada de subamostras na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade, com o uso de um trado holandês (Figura 1a), em cada planta componente do ponto amostral. Estas subamostras foram homogeneizadas para formar uma amostra composta representativa do ponto em questão (Figura 1b e 1c). Estas amostras foram enviadas para o laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciências dos Solos da Universidade Federal de Lavras. Os atributos químicos do solo utilizados foram o Fósforo (P), o Fósforo remanescente (Prem), o Potássio (K) e a Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 (T).



Figura 1 Detalhe do trado holandês (a), homogeneização da amostra (b) e amostra de solo (c)

Foram coletados, em julho de 2011, três atributos relacionados à planta: produtividade, índice de maturação e força de desprendimento dos frutos.

A produtividade de café ( $L.planta^{-1}$ ) foi obtida por meio da colheita manual (Figura 2a) sobre panos das quatro plantas em torno do ponto amostral, e o volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros (Figura 2b). Após esta medição, foi obtida a média de produção destas quatro plantas, resultando no valor de produtividade para o ponto amostral.

Em cada ponto amostral, após as medições de produtividade, os frutos derriçados foram colocados em um mesmo recipiente, onde foram homogeneizados para se retirar uma amostra de 0,5 L de frutos (CARVALHO et al., 2003; SILVA, 2008). Com este volume foi realizada a contagem de frutos para cada maturação (seco, passa, maduro e verde) (Figura 2c) e transformando-os em porcentagem para que desta maneira pudesse ser utilizado a equação quatro, descrita por Alves et al. (2009b).

$$IMAT = \sum \%maduro, \%passa, \%seco$$

(4)



Figura 2 Derrça manual (a), Medição da produtividade (b) e Contagem de frutos para obtenção da maturação (c)

Para a obtenção dos dados de Força de Desprendimento dos frutos do cafeeiro (FD) foi realizada a coleta de cinco frutos (dois frutos do terço superior, um fruto do terço médio e dois frutos do terço inferior), para cada estágio de maturação (Verde e Maduro) em cada planta componente do ponto amostral (Figura 3a). Após a coleta destes frutos foi obtida a média da força de desprendimento das quatro plantas para cada estágio de maturação.

A determinação dessa força de desprendimento foi realizada por meio de um dinamômetro digital portátil modelo DD-500 fabricado pela Instrutherm Instrumentos de Medição Ltda. (Figura 3b) que oferece medidas em Newton.

Após a obtenção da Força de Desprendimento dos Frutos Verde (FDFV) e da Força de Desprendimento do Fruto Maduro (FDFM) foi possível obter a diferença da força de desprendimento (DIFD) que é dado pela equação cinco:

$$DIFD = FDFV - FDFM \quad (5)$$



Figura 3 Coleta dos dados de força de desprendimento (a) e dinamômetro (b)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Índices de qualidade e Indicador de malha

Para se avaliar a qualidade das malhas amostrais foram desenvolvidos e propostos para este trabalho dois índices, o de exatidão e o de precisão.

O valor de Erro Absoluto (EA), obtido por validação, reflete a exatidão que a malha amostral irá apresentar, pois conceitualmente exatidão dá ideia do grau de conformidade de um valor medido ou calculado em relação a uma referência padrão. O resultado do EA compara os valores obtidos por validação com os valores reais obtidos pelas amostragens de campo. Para determinar um componente de exatidão que possibilitasse a comparação entre as malhas foi desenvolvido e proposto o conceito do Índice de Exatidão (IE) (equação seis).

$$IE = 1 - \frac{|EA|}{|mEA|}$$

(6)

em que  $EA$  é o valor do Erro Absoluto, em módulo, da malha que se deseja comparar e  $mEA$  é o maior valor de Erro Absoluto, em módulo, dentre todas as malhas analisadas. O valor de IE varia de zero a um, sendo que quanto mais próximo de um mais exata é a malha amostral e quanto mais próximo de zero mais inexata é a malha amostral.

Já o valor do Desvio Padrão do Erro Absoluto ( $DP_{EA}$ ), obtido por validação, reflete a precisão da malha que, por definição, a precisão é utilizada para expressar a dispersão de resultados. Também com o intuito de se comparar a componente de precisão da malha entre as diferentes malhas estudadas, foi desenvolvido e proposto o Índice de Precisão (IP) (equação sete).

$$IP = 1 - \frac{DP_{EA}}{mDP_{EA}}$$

(7)

em que  $DP_{EA}$  é o valor do Desvio Padrão do Erro Absoluto da malha que se deseja estudar e  $mDP_{EA}$  é o maior valor do Desvio Padrão Erro Absoluto apresentado pelo grupo de malhas analisadas. O valor de IP varia de zero a um e quanto mais próximo de um mais precisa será a malha amostral e quanto mais próximo de zero mais imprecisa a malha amostral será.

Para a escolha da melhor malha amostral (malha ótima) dentre as malhas em estudo, foi desenvolvido e proposto o Indicador de Malha Ótima (IMO) que leva em consideração a ponderação entre o índice de exatidão e de precisão (equação oito).

$$IMO = (0,5 \times IE) + (0,5 \times IP) \quad (8)$$

O Indicador de Malha Ótima (IMO) varia de zero a um e quanto mais próximo de um (ou 100%) melhor a malha (mais exata e mais precisa) e quanto mais próximo de zero (0%) pior (mais inexata e mais imprecisa) a malha será.

### 3.2 Malhas amostrais

Para se testar a aplicação do IE, IP e IMO, foram utilizadas 20 malhas amostrais aplicadas a quatro atributos do solo e planta. A partir da Malha um (Gráfico 3) foram desenvolvidas mais 19 malhas (Tabela 1 e Gráfico 4). As malhas foram agrupadas em quatro grupos que se basearam em malhas base. No Grupo um a malha base possuía 64 pontos amostrais georreferenciados (em média 2,9 pt/ha) (Malha cinco), no Grupo dois a malha base possuía 46 pontos (em média 2,09 pt/ha) (Malha 10), no Grupo três a malha base possuía 23 pontos (em média 1,04 pt/ha) (Malha 15) e no Grupo quatro a malha base tinha 12 pontos amostrais georreferenciados (em média 0,54 pt/ha) (Malha 20).

A malha inicial de cada grupo consistiu na malha base acrescida de quatro malhas *zoom*. A segunda malha de cada grupo consiste da malha inicial do grupo, retirando-se a malha *zoom* que se localiza na porção sudeste da área. A terceira malha caracteriza-se pela segunda malha do grupo, retirando-se a malha *zoom* da localizada na parte noroeste da área. Para se formar a quarta malha, utilizou-se da terceira malha excluindo a malha *zoom* localizada na parte nordeste da área. A quinta malha caracteriza-se apenas pela malha base (Gráfico 4).

Tabela 1 Malhas amostrais testadas divididas em grupos apresentando os pontos amostrais da malha base, a quantidade de malha de *zoom*, os pontos amostrais da malha *zoom* e o total de pontos de cada malha amostral.

<b>Grupo</b>	<b>Malha</b>	<b>Pontos amostrais da malha base</b>	<b>Quantidade de malha de zoom</b>	<b>Pontos amostrais da malha zoom</b>	<b>Total de pontos</b>
1	1	64	4	36	<b>100</b>
	2	64	3	27	<b>91</b>
	3	64	2	18	<b>82</b>
	4	64	1	9	<b>73</b>
	5	64	0	0	<b>64</b>
2	6	46	4	36	<b>82</b>
	7	46	3	27	<b>73</b>
	8	46	2	18	<b>64</b>
	9	46	1	9	<b>55</b>
	10	46	0	0	<b>46</b>
3	11	23	4	39	<b>62</b>
	12	23	3	30	<b>53</b>
	13	23	2	20	<b>43</b>
	14	23	1	10	<b>33</b>
	15	23	0	0	<b>23</b>
4	16	12	4	40	<b>52</b>
	17	12	3	30	<b>42</b>
	18	12	2	20	<b>32</b>
	19	12	1	10	<b>22</b>
	20	12	0	0	<b>12</b>

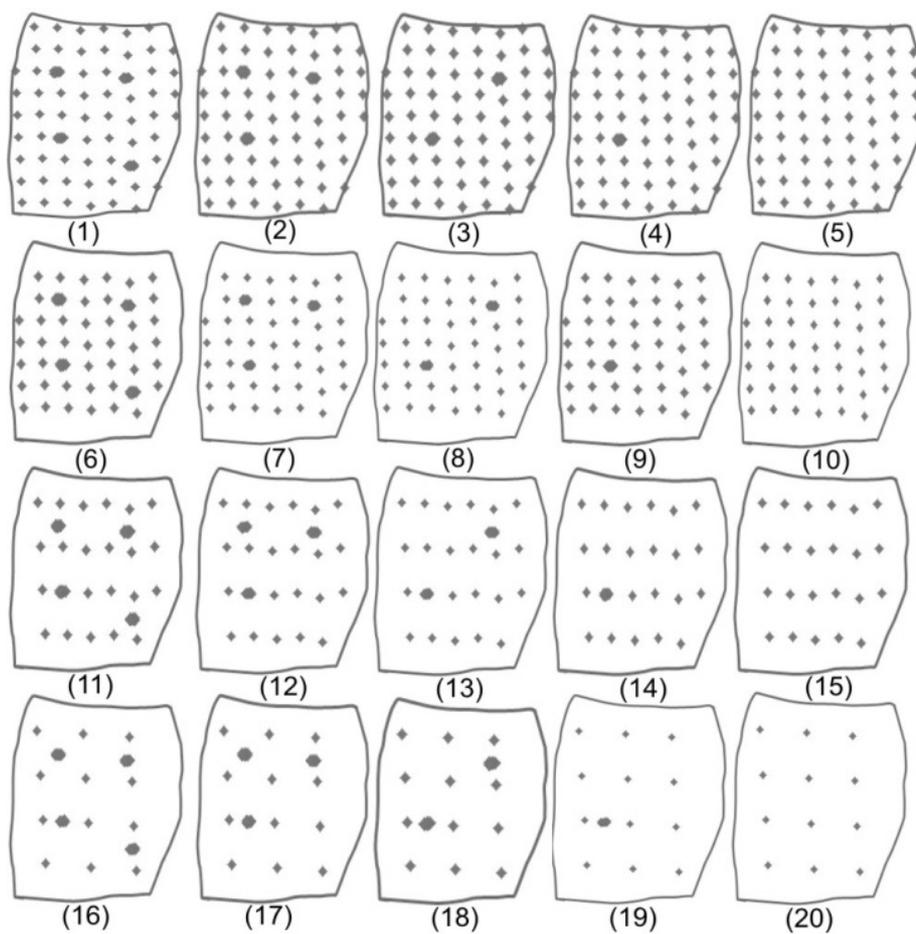


Gráfico 4 Malhas amostrais testadas

### 3.3 Teste dos Índices e do Indicador para atributos do solo

Os atributos do solo Fósforo (P), Fósforo Remanescente (Prem), Potássio (K) e CTC a pH 7 (T) para cada malha amostral em estudo, foram submetidas à avaliação da dependência espacial. Baseando-se na metodologia de análise geostatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial destes atributos em todas as malhas em estudo, excetuando-se a malha 20 da CTC a pH 7 (T) (Tabelas 2, 3, 4 e 5).

O efeito pepita é um importante parâmetro do semivariograma e indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada. Para o atributo fósforo (P) o efeito pepita variou de zero, observado nas Malhas quatro, nove, dez, 12, 13, 14, 15, 17, 18 e 19, até 224,51, observado na Malha 20 (Tabela 2). Para o fósforo remanescente (Prem) variou de zero, Malhas quatro, nove, dez, 17, 19 e 20, até 2,45 para a Malha cinco (Tabela 2). Já para o atributo potássio (K), o efeito pepita variou de 134,65 (Malha cinco) à 891,21 (Malha 20) (Tabela 3). Para a CTC a pH 7 (T) o efeito pepita variou de zero (Malhas cinco, dez, 14, 18 e 19) à 0,56 (Malha 16) (Tabela 3).

Como é impossível quantificar a contribuição individual desses erros, o efeito pepita pode ser expresso como porcentagem do patamar facilitando, assim, a comparação do grau de dependência espacial (GD) dos atributos em estudo (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Pela classificação de Cambardella et al. (1994), o atributo P pode ser classificado como grau de dependência espacial forte para 15 malhas e moderado para cinco malhas. O atributo Prem apresentou GD forte para 19 malhas e apenas um apresentou GD moderado. Já o atributo K apenas duas malhas com GD forte e 18 malhas moderadas. O atributo T apresentou 17 malhas com GD forte, uma malha com GD moderado e uma malha com GD fraco.

Os valores do alcance relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Os atributos estudados apresentaram diferentes alcances de dependência espacial, onde o P teve seu alcance variando de 56,74 m na Malha cinco até 185,07 m na Malha 14 e o atributo Prem teve seu alcance variando de 105,47 m (Malha 16) até 224,26 m (Malha cinco). Para o K, o alcance variou de 43,67 m (Malha 20) à 244,12 m (Malha quatro) e o alcance apresentado pelo atributo T variou de 40,52 m (Malha seis) à 169,69 m (Malha 16).

Silva et al. (2008), estudando dois anos agrícolas (2002/2003 e 2003/2004) de uma lavoura cafeeira com 6,7 ha e numa malha amostral de 68 pontos, encontraram que o atributo P apresentou efeito pepita de 0,09 e um alcance de 86,05 m na primeira safra e 0,52 e 210,04 m, respectivamente, na segunda safra. Para o K, os valores da primeira safra foram 579 e 142,08 m, e na segunda safra “C<sub>0</sub>” igual a 973 e “a” igual a 188,02m. Ferraz et al. (2012c), ao estudarem por três anos (2007, 2008 e 2009) uma lavoura cafeeira, amostrado em uma malha de um ponto/ha, encontraram que o atributo P apresentou efeito pepita igual a zero em todos os três anos e o alcance de dependência espacial igual a 133,31m (2007), 89,73m (2008) e 156,76m (2009). Ao estudarem o K, os autores encontraram efeito pepita zero para os anos de 2007 e 2008 e 0,0018 em 2009 e alcance de dependência espacial igual a 165,25m (2007), 437,67m (2008) e 83,70m (2009).

☞ Tabela 2 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários e pelo modelo esférico para o atributo Fósforo (P)

<b>Malha</b>	<b>NPG</b>	<b>Dist Máx</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub></b>	<b>a</b>	<b>GD</b>		<b>EA</b>	<b>DP<sub>(EA)</sub></b>	<b>IE</b>	<b>IP</b>	<b>IMO</b>
1	100	220	81,32	59,68	141,00	87,02	57,67	Mod	0,0096	14,17	0,9819	0,5688	77,54
2	91	220	5,16	103,25	108,41	105,25	4,76	For	-0,1156	13,11	0,7822	0,6010	69,16
3	82	220	17,14	113,95	131,08	109,09	13,07	For	-0,1691	13,71	0,6814	0,5828	63,21
4	73	220	0,00	144,36	144,36	104,22	0,00	For	-0,1524	13,95	0,7129	0,5754	64,42
5	64	220	45,77	132,80	178,57	56,74	25,63	Mod	0,0000	15,15	0,9999	0,5389	76,94
6	82	220	81,90	60,65	142,56	98,54	57,45	Mod	0,0834	15,07	0,8428	0,5414	69,21
7	73	220	8,13	103,96	112,09	148,52	7,25	For	0,1806	13,47	0,6598	0,5902	62,50
8	64	220	15,27	131,22	146,49	159,95	10,42	For	0,1723	14,26	0,6754	0,5659	62,06
9	55	220	0,00	160,29	160,29	153,76	0,00	For	0,3225	14,66	0,3924	0,5538	47,31
10	46	220	0,00	204,43	204,43	112,41	0,00	For	0,3158	15,52	0,4050	0,5276	46,63
11	62	210	78,65	96,35	175,00	64,40	44,94	Mod	0,1979	17,78	0,6272	0,4590	54,31
12	52	220	0,00	125,77	125,77	155,32	0,00	For	0,2353	14,92	0,5567	0,5460	55,14
13	42	220	0,00	195,85	195,85	177,64	0,00	For	0,3971	15,78	0,2519	0,5199	38,59
14	32	220	0,00	247,82	247,82	185,07	0,00	For	0,4561	16,10	0,1407	0,5101	32,54
15	23	245	0,00	352,84	352,84	149,41	0,00	For	0,5308	20,47	0,0000	0,3770	18,85
16	52	220	45,05	158,08	203,13	63,71	22,18	For	0,3085	18,47	0,4188	0,4379	42,83
17	42	220	0,00	104,00	104,00	143,08	0,00	For	0,5210	18,14	0,0185	0,4478	23,31
18	32	220	0,00	176,22	176,22	162,85	0,00	For	0,4102	20,39	0,2272	0,3794	30,33
19	22	220	0,00	229,88	229,88	181,54	0,00	For	0,2836	22,38	0,4657	0,3190	39,24
20	12	220	224,51	365,55	590,06	116,61	38,05	Mod	0,0004	32,86	0,9992	0,0000	49,96

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> - Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a - alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> - Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima; For – Forte; Mod – Moderado.

Tabela 3 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários e pelo modelo esférico para o atributo Fósforo Remanescente (Prem)

Malha	NPG	Dist Máx	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	a	GD		EA	DP <sub>(EA)</sub>	IE	IP	IMO
1	100	283	0,48	5,96	6,45	106,41	7,52	For	-0,0167	2,03	0,9609	0,2886	62,47
2	91	283	0,51	6,46	6,97	114,38	7,34	For	-0,0230	2,05	0,9461	0,2817	61,39
3	82	283	1,70	6,40	8,10	195,54	20,99	For	-0,0150	2,05	0,9649	0,2830	62,40
4	73	283	0,00	8,01	8,01	126,47	0,00	For	0,0100	2,03	0,9766	0,2872	63,19
5	64	283	2,45	7,11	9,55	224,26	25,60	Mod	-0,0284	2,17	0,9336	0,2379	58,57
6	82	243	0,85	5,55	6,41	106,82	13,33	For	-0,0235	1,99	0,9450	0,3030	62,40
7	73	243	1,25	5,59	6,84	119,90	18,23	For	-0,0327	2,02	0,9234	0,2907	60,71
8	64	243	1,27	6,62	7,90	176,32	16,12	For	0,0145	2,06	0,9661	0,2769	62,15
9	55	243	0,00	7,96	7,96	158,35	0,00	For	0,0050	2,10	0,9882	0,2644	62,63
10	46	243	0,00	10,05	10,05	204,67	0,00	For	-0,4271	2,06	0,0000	0,2795	13,97
11	62	223	0,19	4,62	4,81	119,09	3,97	For	0,0218	2,13	0,9491	0,2527	60,09
12	52	223	0,22	5,02	5,24	136,92	4,15	For	-0,0047	2,27	0,9890	0,2040	59,65
13	42	230	0,66	5,60	6,26	182,94	10,59	For	0,0015	2,37	0,9966	0,1694	58,30
14	32	223	0,52	6,22	6,74	188,58	7,64	For	0,0046	2,55	0,9891	0,1073	54,82
15	23	232	1,77	5,55	7,32	148,64	24,14	For	-0,0389	2,85	0,9089	0,0000	45,44
16	52	223	0,07	4,70	4,77	105,47	1,54	For	0,0937	1,92	0,7806	0,3278	55,42
17	42	223	0,00	5,41	5,41	111,53	0,00	For	0,0881	2,05	0,7938	0,2819	53,79
18	32	223	0,45	5,31	5,76	137,95	7,80	For	0,0733	2,02	0,8285	0,2908	55,96
19	22	229	0,00	6,91	6,91	161,95	0,00	For	0,1632	2,02	0,6179	0,2929	45,54
20	12	223	0,00	5,56	5,56	163,89	0,00	For	-0,0227	2,50	0,9469	0,1240	53,54

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a – alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> – Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima; For – Forte; Mod – Moderado.

2 Tabela 4 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários e pelo modelo esférico para o atributo Potássio (K)

<b>Malha</b>	<b>NPG</b>	<b>Dist. Máx</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub></b>	<b>a</b>	<b>GD</b>	<b>EA</b>	<b>DP<sub>(EA)</sub></b>	<b>IE</b>	<b>IP</b>	<b>IMO</b>	
1	100	285	499,39	606,97	1106,37	113,93	45,14	Mod	-0,1296	30,48	0,8225	0,3487	58,56
2	91	285	580,20	542,99	1123,19	76,41	51,66	Mod	-0,3296	30,87	0,5487	0,3404	44,45
3	82	285	816,17	306,79	1122,96	99,71	72,68	Mod	-0,1886	31,80	0,7417	0,3206	53,12
4	73	285	735,81	368,03	1103,84	244,12	66,66	Mod	0,0836	31,51	0,8856	0,3269	60,62
5	64	305	135,65	931,15	1066,80	80,67	12,72	For	-0,0016	32,06	0,9979	0,3151	65,65
6	82	243	649,13	564,79	1213,93	110,31	46,53	Mod	-0,4380	31,33	0,4002	0,3307	36,55
7	73	243	636,32	586,16	1222,47	109,13	52,05	Mod	-0,4570	31,32	0,3742	0,3309	35,26
8	64	243	897,43	401,16	1298,59	110,38	69,11	Mod	-0,3059	32,60	0,5811	0,3036	44,24
9	55	285	686,80	492,36	1179,16	226,62	58,24	Mod	-0,0935	32,31	0,8720	0,3098	59,09
10	46	300	261,21	1036,15	1297,37	222,32	20,13	For	-0,2706	31,88	0,6295	0,3190	47,42
11	62	285	382,16	861,43	1243,60	116,65	30,73	Mod	-0,4725	30,88	0,3530	0,3402	34,66
12	52	223	665,01	693,04	1358,05	103,53	48,97	Mod	-0,7036	32,13	0,0366	0,3135	17,50
13	42	223	769,21	883,03	1652,24	145,40	46,56	Mod	-0,7303	34,94	0,0000	0,2534	12,67
14	32	230	686,49	638,19	1324,67	148,68	51,82	Mod	0,0198	35,90	0,9729	0,2329	60,29
15	23	245	621,40	916,14	1537,54	158,03	40,42	Mod	-0,3649	38,39	0,5003	0,1798	34,01
16	52	223	532,64	832,91	1365,56	106,68	39,01	Mod	0,1015	30,56	0,8610	0,3470	60,40
17	42	223	598,88	841,56	1440,44	113,04	41,58	Mod	-0,3077	33,17	0,5787	0,2913	43,50
18	32	230	551,87	866,43	1418,30	145,67	38,91	Mod	-0,3881	36,14	0,4686	0,2280	34,83
19	22	223	484,95	1269,20	1754,14	182,66	27,65	Mod	0,5540	36,61	0,2414	0,2178	22,96
20	12	230	891,21	888,08	1779,29	43,67	50,09	Mod	0,0000	46,81	1,0000	0,0000	50,00

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a – alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> – Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima; For – Forte; Mod – Moderado.

Tabela 5 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários e pelo modelo esférico para o atributo CTC a pH 7 (T)

Malha	NPG	Dist Máx	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	a	GD	EA	DP <sub>(EA)</sub>	IE	IP	IMO	
1	100	290	0,12	2,03	2,15	100,94	5,58	For	0,0053	1,25	0,9799	0,1784	57,91
2	91	285	0,51	1,61	2,13	71,31	24,12	For	-0,0092	1,25	0,9651	0,1752	57,02
3	82	285	0,46	1,85	2,31	65,90	19,81	For	-0,0104	1,29	0,9606	0,1503	55,55
4	73	285	0,35	1,93	2,28	98,77	15,31	For	-0,2637	1,25	0,0000	0,1778	8,89
5	64	285	0,00	2,09	2,09	85,18	0,00	For	-0,0033	1,33	0,9875	0,1265	55,70
6	82	243	0,29	2,14	2,42	45,30	88,21	Fra	0,1174	1,26	0,5548	0,1724	36,36
7	73	243	0,21	2,15	2,36	44,15	8,86	For	-0,0053	1,28	0,9798	0,1575	56,87
8	64	243	0,04	2,56	2,61	40,52	1,70	For	-0,0135	1,31	0,9488	0,1384	54,36
9	55	243	0,33	2,01	2,34	102,95	14,24	For	-0,0225	1,21	0,9146	0,2046	55,96
10	46	200	0,00	2,36	2,36	90,33	0,00	For	0,0008	1,31	0,9968	0,1362	56,65
11	62	223	0,14	2,60	2,75	142,63	5,17	For	0,0214	1,27	0,9187	0,1623	54,05
12	52	223	0,15	2,32	2,48	138,22	6,25	For	-0,0015	1,31	0,9943	0,1380	56,62
13	42	223	0,04	2,75	2,79	114,20	1,59	For	-0,0081	1,39	0,9691	0,0834	52,63
14	32	223	0,00	2,41	2,41	88,79	0,00	For	-0,0620	1,33	0,7649	0,1263	44,56
15	23	223	0,48	2,03	2,52	92,65	19,23	For	0,0001	1,52	0,9997	0,0000	49,99
16	52	200	0,56	1,67	2,23	169,69	25,06	Mod	-0,0166	1,09	0,9371	0,2798	60,85
17	42	223	0,15	2,22	2,37	159,29	6,31	For	-0,0459	1,11	0,8260	0,2676	54,68
18	32	223	0,00	2,64	2,64	103,09	0,00	For	-0,0506	1,23	0,8082	0,1929	50,05
19	22	223	0,00	2,41	2,41	85,80	0,00	For	-0,1154	1,15	0,5624	0,2395	40,09
20	12												

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a – alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> – Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima; For – Forte; Mod – Moderado; Fra – Fraco.

Neste trabalho pode-se perceber que o efeito pepita e, principalmente, o alcance variaram em função dos atributos estudados e entre as malhas testadas. Desta maneira, para se avaliar as 20 malhas em estudo foram utilizados os critérios da validação onde se observou o Erro Absoluto (EA) e Desvio Padrão do Erro Absoluto ( $DP_{EA}$ ). Para efeitos comparativos foram desenvolvidos e propostos o Índice de Exatidão (IE), o Índice de Precisão (IP) e por fim um índice que correlaciona os dois o Indicador de Malha Ótima, para assim escolher uma melhor malha.

Ao se ajustar o semivariograma para cada uma das malhas amostrais para o Fósforo (P) e encontrar os valores da validação, procedeu-se à aplicação dos índices e do indicador. Logo, percebeu-se que as malhas mais exatas (maior IE) foram a cinco, 20, um e seis e as mais inexatas foram a 15, 17, 14 e 18. As malhas mais precisas (maior IP) foram a dois, sete, três e 12 e as mais imprecisas foram a 20, 19, 15 e 18. Porém, deseja-se encontrar uma malha amostral que seja ao mesmo tempo exata e precisa, para que assim seja a mais adequada para se avaliar a dependência espacial do P. Portanto, foi utilizado o Indicador de Malha Ótima (IMO), que apontou a Malha um, com 100 pontos amostrais, como a mais exata e mais precisa (IMO igual a 0,7754). Esta foi seguida ainda da Malha cinco, com 64 pontos amostrais, cujo valor de IMO de 0,7694 foi bem próximo ao valor da malha um. Outras malhas com valor de IMO elevados foram a seis, dois e quatro.

Para o fósforo remanescente (Prem) a malha amostral mais exata foi a Malha 13, seguida da malha 12, 14 e nove, enquanto que as malhas mais inexatas (menor IE) foram respectivamente a 19, 16, 17 e 18. A malha amostral mais precisa (maior IP) foi a Malha 16, seguida das malhas seis, 19 e oito. Já as malhas mais imprecisas foram a 15, 14, 20 e 13. Ao se observar os valores de IMO na Tabela 2, pode-se perceber que a Malha quatro (64 pontos da malha base e nove pontos da malha zoom) possui o maior valor, ou seja, é a mais exata

e mais precisa, o que pode garantir um bom mapeamento. Esta malha ainda é seguida das Malhas nove, um, seis e três.

Estudando o K, observou-se que a malha amostral mais exata (maior IE) foi a 20, seguida da cinco, 14 e quatro e as malhas mais inexatas foram a 13, 19, 15 e dois. A malha amostral mais precisa (maior valor de IP) foi a um, seguida da 16, dois e 11 e as mais imprecisas foram a 20, 15, 19 e 18. O Indicador de Malha Ótima (IMO) (Tabela 3) apontou a Malha cinco como a melhor malha para representar o teor de K no solo (maior IMO). Esta malha foi seguida das malhas quatro, 16, 14 e nove. Observa-se que a malha 20 apresentou a melhor exatidão, porém ao mesmo tempo apresentou a menor precisão o que refletiu diretamente no desempenho do IMO, fazendo com que esta malha não figurasse entre as melhores. Comportamento semelhante pode ser observado para o atributo P.

Testando-se as 20 malhas para a CTC a pH 7,0 (T), observou-se que a malha amostral que se destacou como a mais exata (maior IE) foi a malha 15, sendo seguida da malha 10, 12 e cinco. A malha mais precisa, destacada pelo maior valor de IP, foi a 16. Esta foi seguida das malhas 17, 19 e nove. As malhas mais inexatas (menor IE) foram a quatro, seis e 18 e as que apresentaram menor IP (mais imprecisas) foram a 15, 13, 10 e 12. O IMO apontou como a malha mais exata e mais precisa a Malha 16, com 52 pontos amostrais (12 pontos da malha base e 40 pontos da malha zoom), que pode ser destacada como a malha que representa bem a CTC a pH 7,0. Esta malha amostral foi seguida das Malhas um, dois, sete e 10.

Conforme exposto, os índices permitiram a observação da exatidão e precisão das malhas amostrais e o IMO permitiu identificar as malhas que melhor representam a variabilidade espacial dos atributos no campo. Observou-se que cada atributo apresentou uma malha que melhor a representou. Porém, quando se realiza a amostragem do solo espera-se não somente analisar um

atributo químico do solo em separado, mas sim um conjunto destes, de forma a otimizar e reduzir os custos da operação de amostragem e de análises laboratoriais. Dessa maneira, para se proceder à escolha da(s) melhor(es) malha(s) amostral(is) deve-se partir daquela(s) que melhor se ajustam(ram) aos quatro atributos em estudo. Sendo assim foi realizado o cálculo do IMO Médio, que nada mais é que o valor médio de IMO apresentado pelos quatro atributos para cada malha (Tabela 6). Logo, permitiu realizar o ranqueamento das malhas em função destes valores.

Tabela 6 Ranqueamento das malhas em função do IMO Médio

<b>Rank</b>	<b>Malha</b>	<b>Número de Pontos</b>	<b>IMO Médio (%)</b>
1	<b>5</b>	64	64,22
2	1	100	64,12
3	3	82	58,57
4	2	91	58,01
5	9	55	56,25
6	8	64	55,70
7	16	52	54,87
8	7	73	53,83
9	6	82	51,13
10	11	62	50,78
11	4	73	49,28
12	14	32	48,05
13	12	52	47,23
14	17	42	43,82
15	18	32	42,79
16	<b>10</b>	46	41,17
17	13	42	40,55
18	<b>15</b>	23	37,07
19	19	22	36,96
20	<b>20</b>	12	-

As malhas um, dois, três, cinco, oito, nove e 16 apresentaram os maiores valores de IMO e a 5 pode ser destacada como a melhor malha. Na prática, esta malha se torna interessante uma vez que ela corresponde à malha com 64 pontos (em média 2,9 pts/ha) e, também, não contém nenhuma malha zoom, o que

facilita o processo de amostragem e reduz os custos operacionais. Dessa maneira, as malhas com muitos pontos em sua malha base, o *zoom* pode não ter feito diferença, mas para as malhas que possuíam malhas base com menores quantidades de pontos amostrais, as malhas *zoom* fizeram efeito. Isso pode ser observado pelas malhas oito (2 *zoons*), nove (1 *zoom*) e 16 (4 *zoons*), que foram superiores às malhas base de seus grupos (malhas 10 e 20, respectivamente) e figuraram entre as melhores malhas amostrais. Ainda se pode destacar que as malhas um (4 *zoons*), dois (3 *zoons*) e três (2 *zoons*) mesmo não sendo superiores à sua malha base, foram superiores às demais malhas.

Conforme exposto, a malha cinco, com aproximadamente três pontos amostrais a cada hectare, foi a mais indicada. Caso fossem escolhidos a malha com dois pt/ha, 1pt/ha e 0,5 pt/ha, estas seriam ranqueadas com a 16<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup> e 20<sup>a</sup>, respectivamente, desta maneira não sendo indicadas para serem utilizadas. Destaca-se que a malha 20, que possui 12 pontos amostrais (0,5 pt/ha) não apresentou ajuste para a CTC a pH 7,0, o que inviabilizou a escolha desta malha para ser utilizada. Caso haja a necessidade de utilizar malhas bases com tão poucos pontos, recomenda-se a utilização de malhas *zoons* para aprimorar a amostragem.

Sendo assim, pode-se perceber que incorreremos em grandes erros ao utilizarmos a malha de dois pontos por hectare, um ponto por hectare para a maioria dos atributos. Se fosse escolhida a malha de um ponto a cada dois hectares os erros seriam ainda maiores.

Os estudos de Nanni et al. (2011) reforçam a necessidade da utilização de maiores quantidades de pontos amostrais por hectare. Estes autores, ao testarem diferentes malhas amostrais para a cultura do milho, não conseguiram realizar ajustes de dependência espacial para o P e nem para o K utilizando uma malha de um ponto por hectare. Isto ressalta a importância de se realizar uma escolha criteriosa da malha amostral conforme realizada por este trabalho.

### **3.4 Teste dos Índices e do Indicador aplicados a atributos da planta**

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial da Produtividade (Prod), do Índice de Maturação (IMAT) e da Diferença da Força de Desprendimento (DIFD) e em todas as malhas em estudo (Tabelas 7, 8 e 9).

O efeito pepita encontrado para a Produtividade (PROD) variou de zero, observado nas Malhas 10 e 15 até 1,84, observado na Malha três (Tabela 2). Para o Índice de Maturação (IM) variou de 43,38 (Malha 20) até 353,13 para a Malha quatro (Tabela 3). Já para a Diferença da Força de Desprendimento (DIFD), o efeito pepita variou de zero (Malha 19 e 20) à 0,64 (Malha 12) (Tabela 4).

Pela classificação proposta por Cambardella et al. (1994), a PROD pode ser classificada como grau de dependência espacial forte para duas malhas (Malha 10 e 15), moderado para 14 malhas e fraco para quatro malhas (Malha um, três, seis e sete). O IMAT apresentou GD moderado para 18 malhas e apenas duas malhas apresentaram GD fraco (Malhas oito e nove). Já para a DIFD, cinco malhas possuíam GD forte (Malha 10, 14, 15, 19 e 20), nove malhas com GD moderado e seis malhas com GD fraco (Malhas um, dois, três, seis, sete e oito).

Os atributos estudados apresentaram diferentes alcances de dependência espacial, em que o atributo PROD teve seu alcance variando de 100 m na Malha 20 até 354,63 m na Malha três e o atributo IMAT teve seu alcance variando de 115,53 m (Malha 20) até 353,13 m (Malha quatro). Para a DIFD o alcance variou de 39,93 m (Malha 14) a 279,04 m (Malha três). Estas diferenças somente podem ser explicadas pelas diferentes malhas aplicadas, visto serem todas estimativas da estrutura de dependência espacial de um mesmo atributo, isto é, tais diferenças são diferentes estimativas para os mesmos parâmetros. Deve-se

salientar que tais diferenças não se devem às diferentes estruturas de solo, espaçamentos entre plantas, entre linhas, manejo, cultivar.

Neste trabalho pode-se perceber que o efeito pepita e, principalmente, o alcance variaram em função dos atributos estudados e entre as malhas testadas. Mais uma vez deve-se enfatizar que tais diferenças são estimativas diferentes para os mesmos parâmetros, salientando novamente a necessidade de se estabelecer critérios de escolha da melhor malha. Desta maneira, foram avaliados três atributos da planta sendo eles a Produtividade (PROD), o Índice de Maturação (IMAT) e a Diferença da Força de Desprendimento (DIFD), de forma a se realizar uma boa avaliação das malhas amostrais aplicados aos atributos da planta.

Apesar de uma das empresas desenvolvedoras de colhedoras de café automatizadas ter desenvolvido e lançado um sensor de produtividade, utilizado por Molin et al. (2010), este ainda não se encontra difundido. Uma boa opção para se mapear a produtividade de uma lavoura cafeeira é realizar o georreferenciamento de pontos amostrais e realizar a colheita manual dos frutos, tais como propostos nos trabalhos de Ferraz et al. (2012a, 2012b, 2012c), Silva et al. (2007, 2008) e Silva, F. M. et al. (2010), e realizado por este trabalho. Assim torna-se importante a análise de uma malha amostral que possibilite o mapeamento da produtividade obtida manualmente em uma lavoura cafeeira.

Tabela 7 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Quadrados Mínimos Ordinários e pelo modelo esférico para a Produtividade (PROD)

<b>Malha</b>	<b>NPG</b>	<b>Dist Máx</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub></b>	<b>a</b>	<b>GD</b>	<b>EA</b>	<b>DP<sub>(EA)</sub></b>	<b>IE</b>	<b>IP</b>	<b>IMO</b>	
1	100	285	1,401	0,438	1,839	125,74	76,19	Fra	0,0011	1,3347	0,9345	0,1835	55,90
2	91	290	1,145	0,896	2,040	241,28	56,10	Mod	0,0042	1,3425	0,7518	0,1788	46,53
3	82	390	1,835	0,309	2,144	354,63	85,58	Fra	0,0032	1,3948	0,8133	0,1468	48,01
4	73	300	1,051	1,078	2,129	287,61	49,35	Mod	0,0042	1,2945	0,7547	0,2081	48,14
5	64	290	1,196	0,997	2,192	261,53	54,54	Mod	0,0036	1,3066	0,7909	0,2007	49,58
6	82	243	1,498	0,398	1,896	113,24	79,03	Fra	0,0017	1,3562	0,9005	0,1704	53,55
7	73	243	1,598	0,500	2,098	272,18	76,19	Fra	0,0050	1,3929	0,7071	0,1479	42,75
8	64	300	1,577	0,653	2,230	274,94	70,72	Mod	0,0066	1,4554	0,6117	0,1097	36,07
9	55	243	0,831	1,197	2,029	214,99	40,98	Mod	0,0121	1,3917	0,2922	0,1487	22,04
10	46	243	0,000	2,141	2,141	165,34	0,00	For	0,0121	1,3917	0,2922	0,1487	22,04
11	62	223	0,998	0,928	1,926	130,08	51,82	Mod	-0,0001	1,4011	0,9959	0,1430	56,94
12	52	223	1,128	0,933	2,061	178,36	54,74	Mod	0,0027	1,4900	0,8392	0,0886	46,39
13	42	223	1,283	1,298	2,582	216,09	49,71	Mod	0,0028	1,6348	0,8388	0,0000	41,94
14	32	223	0,747	1,449	2,197	175,96	34,03	Mod	0,0095	1,4748	0,4415	0,0979	26,97
15	23	223	0,000	2,636	2,636	117,98	0,00	For	0,0107	1,4955	0,3741	0,0852	22,97
16	52	223	1,130	0,564	1,694	129,02	66,73	Mod	0,0125	1,3440	0,2693	0,1779	22,36
17	42	223	1,237	0,628	1,864	134,95	66,34	Mod	0,0114	1,4543	0,3320	0,1104	22,12
18	32	220	1,393	0,660	2,053	148,24	67,84	Mod	0,0158	1,5981	0,0767	0,0225	4,96
19	22	223	0,752	1,067	1,819	137,61	41,34	Mod	0,0171	1,4468	0,0000	0,1150	5,75
20	12	223	0,527	1,527	2,054	100,00	25,65	Mod	0,0000	1,6126	1,0000	0,0136	50,68

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> - Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a - alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> - Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima (%); For – Forte; Mod – Moderado; Fra - Fraco.

Tabela 8 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Quadrados Mínimos Ordinários e pelo modelo esférico para o Índice de Maturação (IMAT)

<b>Malha</b>	<b>NPG</b>	<b>Dist Máx</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub></b>	<b>a</b>	<b>GD</b>	<b>EA</b>	<b>DP<sub>(EA)</sub></b>	<b>IE</b>	<b>IP</b>	<b>IMO</b>	
1	100	370	191,960	234,366	426,327	295,26	45,03	Mod	-0,1127	15,6631	0,7815	0,1794	48,04
2	91	283	211,488	176,959	388,447	271,66	54,44	Mod	-0,0733	15,9820	0,8580	0,1627	51,03
3	82	383	262,727	142,676	405,403	299,73	64,81	Mod	-0,0263	16,7818	0,9490	0,1208	53,49
4	73	390	353,126	237,108	590,234	353,13	59,83	Mod	-0,0013	16,0851	0,9974	0,1573	57,74
5	64	390	107,212	301,172	408,384	322,85	26,25	Mod	-0,0928	14,7928	0,8200	0,2250	52,25
6	82	280	198,746	149,903	348,648	242,12	57,00	Mod	-0,0968	15,1837	0,8123	0,2045	50,84
7	73	280	225,068	100,661	325,729	268,52	69,10	Mod	-0,0109	15,3372	0,9788	0,1965	58,76
8	64	310	288,278	17,605	305,882	257,11	94,24	Fra	0,0177	16,7868	0,9657	0,1205	54,31
9	55	290	273,527	22,607	296,134	264,77	92,37	Fra	0,0370	15,8031	0,9283	0,1721	55,02
10	46	248	99,495	146,956	246,451	234,36	40,37	Mod	-0,0175	14,1593	0,9661	0,2582	61,21
11	62	260	178,147	200,908	379,055	245,93	47,00	Mod	-0,1451	16,2174	0,7186	0,1504	43,45
12	52	280	186,451	187,318	373,769	248,62	49,88	Mod	-0,0170	16,7634	0,9670	0,1218	54,44
13	42	280	295,464	99,728	395,192	252,25	74,76	Mod	0,0905	18,3532	0,8245	0,0385	43,15
14	32	260	273,563	120,494	394,056	213,02	69,42	Mod	0,1565	17,4212	0,6965	0,0873	39,19
15	23	260	126,511	159,825	286,335	225,94	44,18	Mod	-0,2860	16,2954	0,4454	0,1463	29,59
16	52	270	123,618	268,523	392,141	246,69	31,52	Mod	0,0670	16,5124	0,8700	0,1349	50,25
17	42	270	163,912	204,191	368,103	258,15	44,53	Mod	0,2214	17,2464	0,5707	0,0965	33,36
18	32	270	257,819	149,688	407,507	230,62	63,27	Mod	0,3997	19,0877	0,2249	0,0000	11,25
19	22	280	255,148	98,337	353,485	240,07	72,18	Mod	0,5157	17,8227	0,0000	0,0663	3,31
20	12	280	44,385	132,710	177,095	115,53	25,06	Mod	0,0001	14,8196	0,9999	0,2236	61,17

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a - alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> - Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima (%); Fra – Fraco; Mod – Moderado.

Tabela 9 Parâmetros estimados pelo semivariograma ajustado pelo método dos Quadrados Mínimos Ordinários e pelo modelo esférico para a Diferença da Força de Desprendimento (DIFD)

Malha	NPG	Dist Máx	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	a	GD	EA	DP <sub>(EA)</sub>	IE	IP	IMO	
1	100	340	0,5538	0,161	0,715	250,92	77,50	Fra	0,001703	0,7166	0,9765	0,2271	60,18
2	91	340	0,633	0,111	0,744	261,73	85,10	Fra	0,001048	0,7376	0,9856	0,2045	59,50
3	82	350	0,616	0,104	0,721	279,04	85,53	Fra	6,12E-05	0,7257	0,9992	0,2173	60,82
4	73	380	0,436	0,222	0,658	135,82	66,31	Mod	0,005799	0,6916	0,9201	0,2541	58,71
5	64	300	0,216	0,436	0,652	193,70	33,15	Mod	-0,00361	0,6603	0,9503	0,2879	61,91
6	82	320	0,626	0,122	0,748	242,28	83,64	Fra	0,003427	0,7477	0,9528	0,1936	57,32
7	73	320	0,700	0,093	0,793	260,00	88,29	Fra	0,002805	0,7738	0,9613	0,1655	56,34
8	64	350	0,635	0,125	0,760	216,17	83,52	Fra	0,002462	0,7481	0,9661	0,1932	57,96
9	55	390	0,344	0,343	0,687	75,27	50,02	Mod	0,01329	0,7573	0,8168	0,1832	50,00
10	46	250	0,068	0,593	0,661	128,01	10,30	For	0,001193	0,7099	0,9836	0,2344	60,90
11	62	360	0,552	0,217	0,769	188,38	71,77	Mod	0,01081	0,7638	0,8510	0,1763	51,36
12	52	360	0,636	0,218	0,855	227,93	74,47	Mod	0,009791	0,7986	0,8651	0,1387	50,19
13	42	290	0,523	0,448	0,970	254,62	53,85	Mod	0,009958	0,7865	0,8628	0,1517	50,72
14	32	240	0,001	1,192	1,193	39,93	0,07	For	0,05205	0,8469	0,2827	0,0866	18,46
15	23	240	0,110	0,703	0,813	168,76	13,49	For	0,009881	0,8558	0,8638	0,0770	47,04
16	52	260	0,380	0,511	0,891	71,61	42,61	Mod	0,02031	0,7966	0,7201	0,1409	43,05
17	42	260	0,372	0,626	0,998	49,65	37,30	Mod	0,02654	0,8374	0,6342	0,0968	36,55
18	32	260	0,313	0,843	1,156	70,07	27,07	Mod	0,02194	0,8283	0,6976	0,1067	40,21
19	22	260	0,000	1,427	1,427	47,03	0,00	For	0,07256	0,9272	0,0000	0,0000	0,00
20	12	280	0,000	0,909	0,909	120,07	0,00	For	7,26E-02	0,9272	0,0000	0,0000	0,00

NPG – Número de Pontos da Malha Amostral; Dist. Máx. – Distância Máxima utilizada para o ajuste do semivariograma; C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a – alcance; GD – Grau de Dependência Espacial; EA – Erro Absoluto; DP<sub>EA</sub> – Desvio Padrão do Erro Absoluto; IE – Índice de Exatidão; IP – Índice de Precisão; IMO – Indicador de Malha Ótima (%); For – Forte; Mod – Moderado; Fra – Fraco.

Ao se realizar os ajustes do semivariograma para cada uma das malhas amostrais para a Produtividade (PROD) pode-se observar que os maiores valores do Índice de Exatidão foram encontrados nas malhas 20, 11, um e seis, respectivamente, destacando-as como as malhas mais exatas. As malhas mais precisas, que apresentaram os maiores valores do Índice de Precisão foram a quatro, cinco, um e dois. Pela análise do Indicador de Malha Ótima (IMO) pode-se perceber que a malha que melhor se ajustou a este atributo (maior IMO) foi a Malha 11, cujo valor foi 56,94%, com 62 pontos amostrais, seguida da Malha um, IMO igual a 55,90%, com 100 pontos amostrais, e das Malhas seis, 20 e cinco.

O Índice de Maturação (IMAT) é fortemente difundido entre os cafeicultores. Esse é um dos índices que indicam ao produtor quando iniciar a colheita, principalmente a colheita mecanizada, influenciando até mesmo na escolha do número de passadas que a colhedora realizará em uma determinada área. Sendo um índice desta importância, o estudo da variabilidade espacial pode refletir na indicação de locais mais propícios a se iniciar a colheita além de indicar mais precisamente quando iniciar a operação.

Pela observação do Índice de Exatidão (IE) apresentado pelas malhas testadas para o IMAT, tem-se que as malhas amostrais 20, quatro, sete e 12 apresentaram os maiores valores deste índice. Para o Índice de Precisão, as malhas que apresentaram maiores valores foram a 10, cinco, seis e sete. Ao se observar o IMO para o atributo IMAT pode-se perceber que a Malha 10, com 46 pontos amostrais, apresentou o maior IMO (61,21%). Esta se seguiu das malhas 20, sete, quatro e nove.

Na colheita manual seletiva, os cafeicultores podem escolher quais frutos desejam coletar, escolhendo aqueles que estiverem na maturação ótima para a colheita. Porém, quando se realiza a colheita mecanizada, pode ser difícil realizar este processo. Desta maneira, um parâmetro que pode colaborar para a

realização da colheita mecanizada e seletiva dos frutos de cafeeiro é o estudo da força de desprendimento. Silva, F. C. et al. (2010) citam que quanto maior a diferença entre a força de desprendimento dos frutos verdes e maduro (DIFD), melhor será a colheita mecanizada seletiva dos frutos do cafeeiro.

As malhas que apresentaram os maiores valores de IE para a DIFD foram a três, dois, dez e um. Já para o IP as malhas que se destacaram foram a cinco, quatro, um e três. Ao se testar as 20 malhas amostrais para a DIFD tem-se que a Malha cinco, com 64 pontos amostrais, foi a que apresentou o maior IMO (61,91%) sendo seguida das Malhas 10, três, um e dois.

Porém, o gerenciamento da colheita mecanizada e, também, seletiva dos frutos de cafeeiro envolve tanto a análise da produtividade quanto do Índice de Maturação e da Força de Desprendimento dos frutos, de modo a otimizar o processo de colheita. A obtenção da malha amostral que melhor se adequa aos atributos estudados permitirá a confecção de mapas de isolinhas mais representativos, que poderão ser utilizados no gerenciamento da colheita, tanto manual, quanto mecanizada ou semimecanizada.

Na colheita manual estes mapas contribuirão na estimativa da produtividade, na contratação de pessoal para a colheita e na escolha dos locais mais propícios ao início da colheita. Na colheita semimecanizada serão de suma importância, além dos já citados, na aquisição ou aluguel de derriçadoras portáteis.

Na colheita mecanizada do café, os mapas de produtividade podem ser utilizados na logística de transporte do conjunto trator carreta em apoio à colhedora. Em caso de colhedoras, que possuem reservatórios próprios, no planejamento do momento de descarga dos mesmos, podem reduzir paradas e manobras desnecessárias (FERRAZ et al., 2012a). Os mapas de índice de maturação permitirão observar os locais mais propícios para se iniciar a colheita, além de permitir definir o número de passadas da colhedora na área. Já o mapa

da diferença da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros permite inferir, além do local mais propício para o início da colheita, os locais mais propícios para se realizar a colheita mecanizada seletiva.

Dessa maneira, com o uso da cafeicultura de precisão pelo uso dos mapas mais condizentes com o encontrado no campo (obtidos pelo uso da melhor malha), alcançar-se-á um melhor gerenciamento da etapa de colheita.

Foi possível observar que os índices de Exatidão e de Precisão permitiram avaliar a qualidade do ajuste de cada atributo às malhas amostrais estudadas, e o IMO permitiu a escolha daquela malha que melhor se adequou a cada atributo da planta. Porém, para a obtenção de uma malha amostral que melhor represente os atributos da planta de cafeeiro, não se deve analisar os dados de PROD, IMAT e DIFD em separado e, sim, em conjunto de forma a otimizar e reduzir os custos da operação de amostragem e da colheita em si. Assim, para se proceder à escolha da(s) melhor(es) malha(s) amostral(is) deve-se partir daquela(s) que melhor se ajustam(ram) aos três atributos da planta em estudo. Dessa forma, foi realizado o cálculo do IMO Médio, que nada mais é que o valor médio de IMO apresentado pelos três atributos para cada malha. Na Tabela 10 foi realizado o ranqueamento das malhas em função dos valores do IMO Médio calculados.

A malha quatro, com 64 pontos amostrais acrescidos de nove pontos de malha *zoom*, foi aquela que mais se adequou aos três atributos da planta, sendo seguida das malhas um, cinco, três e seis (Tabela 10). Nesta lista destaca-se a malha cinco, com 64 pontos amostrais, em média 2,9 pt/ha, que não possui malhas *zoom*, o que facilita o processo de amostragem, sem perder em qualidade. Percebeu-se, ainda, grande influência das malhas *zoom*, para as quais, no geral, as malhas amostrais que a possuíam em sua conformação foram superiores às malhas bases de seus grupos.

Tabela 10 Ranqueamento das malhas em função do IMO Médio

<b>Rank</b>	<b>Malha</b>	<b>NPG</b>	<b>IMO Médio (%)</b>
1	4	73	54,86
2	1	100	54,71
3	5	64	54,58
4	3	82	54,11
5	6	82	53,90
6	7	73	52,62
7	2	91	52,35
8	11	62	50,59
9	12	52	50,34
10	8	64	49,45
11	10	46	48,05
12	13	42	45,27
13	9	55	42,35
14	16	52	38,55
15	20	12	37,28
16	15	23	33,20
17	17	42	30,68
18	14	32	28,21
19	18	32	18,81
20	19	22	3,02

Se fossem consideradas apenas as malhas base, sem *zoom*, (Malha cinco, 10, 15 e 20), então a Malha cinco, em média 2,9 pts/ha, se destacaria sendo seguida da Malha 10 (em média 2,09 pts/ha), Malha 20 com 0,5 pt/ha e da malha 15 com 1,0 pt/ha. Como se observa, os resultados obtidos sobre as malhas base não foram os melhores, contudo na aplicação prática ficaria difícil a recomendação de malhas *zoom* nas amostragens, assim as malhas base seriam mais adequadas à execução de campo. Neste sentido, pode-se inferir que a amostragem recomendada em cafeicultura poderia ser a de três pt/ha em malha quadrada. Observa-se ainda, que se pode incorrer em erros inaceitáveis ao se utilizar malhas de um a dois pt/ha, como se vem praticando.

#### 4 CONCLUSÕES

Caracterizou-se a magnitude da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo avaliados para quase todas as malhas propostas (excetuando-se a Malha 20 para CTC potencial), enquanto que esta caracterização foi possível para todos os atributos estudados da planta. Desta forma, os atributos apresentaram estrutura de dependência espacial, o que permitiu a obtenção dos parâmetros da validação.

Foi possível desenvolver e propor o Índice de Exatidão (IE) e o Índice de Precisão (IP) que permitiram observar a qualidade das malhas amostrais e, também, o Indicador de Malha Ótima (IMO) que possibilitou a apontar a malha que melhor se adequou aos atributos do solo e da planta estudados.

Para os atributos do solo, a malha apontada pelo IMO para representar conjuntamente o fósforo, o fósforo remanescente, o potássio e a CTC potencial foi a Malha cinco, que preconiza três pontos por hectare, em malha quadrada. Enquanto que para os atributos da planta o IMO indicou a malha a malha quatro, com 64 pontos amostrais na malha base mais uma malha *zoom* de nove pontos, totalizando 73 pontos. Contudo, para uma recomendação mais prática (sem *zoom*) a malha cinco com 64 pontos ou de três pt/ha, poderia ser utilizada sem perder em qualidade.

Os resultados apresentados evidenciaram que a escolha de uma malha amostral é de fundamental importância para a confiabilidade da aplicação das técnicas de cafeicultura de precisão.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 12, p. 1-14, Dec. 2009a.
- \_\_\_\_\_. Neuro-fuzzy operational performance of a coffee harvester machine. **Journal of Convergence Information Technology**, Gyeongju, v. 4, n. 2, p. 52-59, 2009b.
- BACHMAIER, M.; BACKERS, M. Variogram or semivariogram?: understanding the variances in a variogram. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 9, p. 173-175, Feb. 2008.
- BLISKA, F. M. M. et al. Custos de produção de café nas principais regiões produtoras do Brasil. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 29, n. 8, p. 5-20, ago. 2009.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, G. R. et al. Eficiência do Ethephon na uniformização e antecipação da maturação de frutos de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e na qualidade da bebida. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 1, p. 98-106, jan./fev. 2003.
- CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, nov./dez. 2004.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012b.
- \_\_\_\_\_. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, Jan. 2012a.

\_\_\_\_\_. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 906-915, set./out. 2011.

FERRAZ, G. A. S. et al. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012c.

GONTIJO, I. et al. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um latossolo vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1245-1254, dez. 2007.

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

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

MOLIN, J. P. et al. Teste procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.

NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, May/June 2011.

OLIVEIRA, M. S. **Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando geoestatística**. 1991. 100 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

PIERCE, F. J. et al. Yield mapping. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.). **The state of site specific management for agriculture**. Madson: ASA; CSSA; SSA, 1997. p. 211-243.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 mar. 2011.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.

SAMPAIO, F. M. T. et al. Variabilidade espacial da umidade de um latossolo vermelho-amarelo sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 5, p. 854-861, set./out. 2010.

SILVA, A. F. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes manejos. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 173-182, maio/ago. 2010.

SILVA, F. C. **Efeito da força de desprendimento e maturação dos frutos de cafeeiros na colheita mecanizada**. 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SILVA, F. C. et al. Comportamento da força de desprendimento dos frutos do cafeeiro ao longo do período da colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 468-474, mar./abr. 2010.

SILVA, F. M. et al. Desempenho operacional e econômico da derriça do café com uso da derriçadora lateral. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 119-125, jul./dez. 2006.

\_\_\_\_\_. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010.

\_\_\_\_\_. 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, jan./fev. 2008.

\_\_\_\_\_. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.

SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo distroférico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, nov./dez. 2003.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, maio 2004.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

## CAPÍTULO 3

### Variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta de lavoura cafeeira

#### RESUMO

Objetivou-se no presente capítulo caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos do solo, da recomendação de adubação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  e de atributos da planta em lavoura cafeeira e realizar o mapeamento desses atributos. Objetivou-se, ainda, comparar os teores médios dos atributos do solo levantados em malha amostral quadrada e em amostragem convencional aleatória, comparando também a recomendação de aplicação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para as duas formas de amostragem. O experimento foi conduzido na fazenda Brejão, no município de Três Pontas, Minas Gerais, utilizando-se 14 atributos do solo, amostrados de forma convencional e em malha amostral quadrada de 64 pontos georreferenciados. Na malha quadrada foram amostrados também oito atributos relacionados à planta de cafeeiros. A recomendação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  foi realizada para ambas as formas de amostragem visando compará-las. A análise destes dados, por meio das técnicas geoestatística, possibilitou caracterizar a variabilidade espacial de todos os atributos, permitindo desta maneira o mapeamento. Foi possível identificar as diferenças apresentadas nos teores dos atributos do solo comparativamente para as duas formas de amostragem, o que refletiu também na dose recomendada de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . Os mapas referentes aos atributos da planta se mostraram importantes no gerenciamento da operação de colheita e na identificação de distorções no desenvolvimento da planta.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, Geoestatística, Dependência Espacial, Gerenciamento, Amostragem Convencional, Amostragem em Malha.

## ABSTRACT

The aim of the present chapter was to characterize the structure and magnitude of the spatial distribution and map soil attributes, recommendation of fertilization with  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , and plant attributes of a coffee field. Besides to compare the mean levels of soil attributes obtained by sampling on a square grid and by the random conventional sampling, comparing also the recommended application of  $P_2O_5$  and  $K_2O$  for the two sampling methods. The experiment was conducted on Brejão farm in Três Pontas, Minas Gerais state, Brazil. As a data base were used 14 soil variables sampled conventionally and sampled in a 64 georeferenced points in a squared sampling grid. In the squared grid were sampled also 8 coffee plant variables. The recommendation of  $P_2O_5$  and  $K_2O$  were made to both of sampling methods in order to compare them. The analyses of these data by geostatitics techniques allowed characterizing the spatial variability of all variables, which enable to map them. It was possible to identify differences presented in the amount of soil attributes sampled by the two sampling methods. It reflected on the recommended dose of  $P_2O_5$  and  $K_2O$  as well. The maps of plant variables proved to be an important tool to manage the harvest operation and to identify the distortions in plant development.

Keywords: Precision Agriculture, Geostatistics, Spatial Dependence, Management, Conventional Sampling, Sampling Grid.

## 1 INTRODUÇÃO

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

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

A aplicação da agricultura de precisão no agronegócio café vem sendo denominada de cafeicultura de precisão (FERRAZ et al., 2012a). Ferraz et al. (2012c) definem Cafeicultura de Precisão como um conjunto de técnicas e tecnologias que são capazes de auxiliar o cafeicultor a manejar sua lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando maximizar a rentabilidade, aumentar eficiência da adubação, pulverização e colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto.

A tecnologia de aplicação à taxa variável (VRT) é uma parte importante da agricultura de precisão, pois preconiza a aplicação de insumos tais como fertilizantes, defensivos ou sementes, em níveis específicos, adequados à área de gestão (YUAN et al., 2010). Corá et al. (2004), Grego e Vieira (2005) e Morales, Vazques e Paz-Ferreira (2011) afirmam que o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado como

princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala. Segundo Basso et al. (2011), o manejo de uma propriedade que não leve em consideração a variabilidade espacial, presente no solo, é econômica e ambientalmente ineficiente.

Além do uso mais comum da cafeicultura de precisão, que é o estudo da variabilidade espacial do solo como consequente ferramenta de subsídio para a aplicação de adubos em taxa variável, essa técnica pode ser aplicada para atributos da planta, de forma a possibilitar o gerenciamento mais preciso do processo de colheita e, também, o acompanhamento do desenvolvimento da planta.

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

Dado o exposto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos do solo, da recomendação de adubação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  e de atributos da planta em lavoura cafeeira e realizar o mapeamento desses atributos de forma a visualizar a distribuição espacial, considerando a dependência espacial dos atributos. Também, objetivou-se, comparar os teores médios dos atributos do solo levantados em malha amostral quadrada e em amostragem convencional aleatória, comparando também a recomendação de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos para ambas as amostragens.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi desenvolvido na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais (Gráfico 1), em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) da cultivar Topázio, transplantada em dezembro de 2005, no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3289 plantas.ha<sup>-1</sup>. As coordenadas geográficas do ponto central da área são de 21°25'58" de latitude sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich. A altitude máxima desta área é de 914,7 m e o mapa planialtimétrico está apresentado no Gráfico 2. Os pontos limites da área (Gráfico 2) foram obtidos por meio do uso de GPS topográfico.

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

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

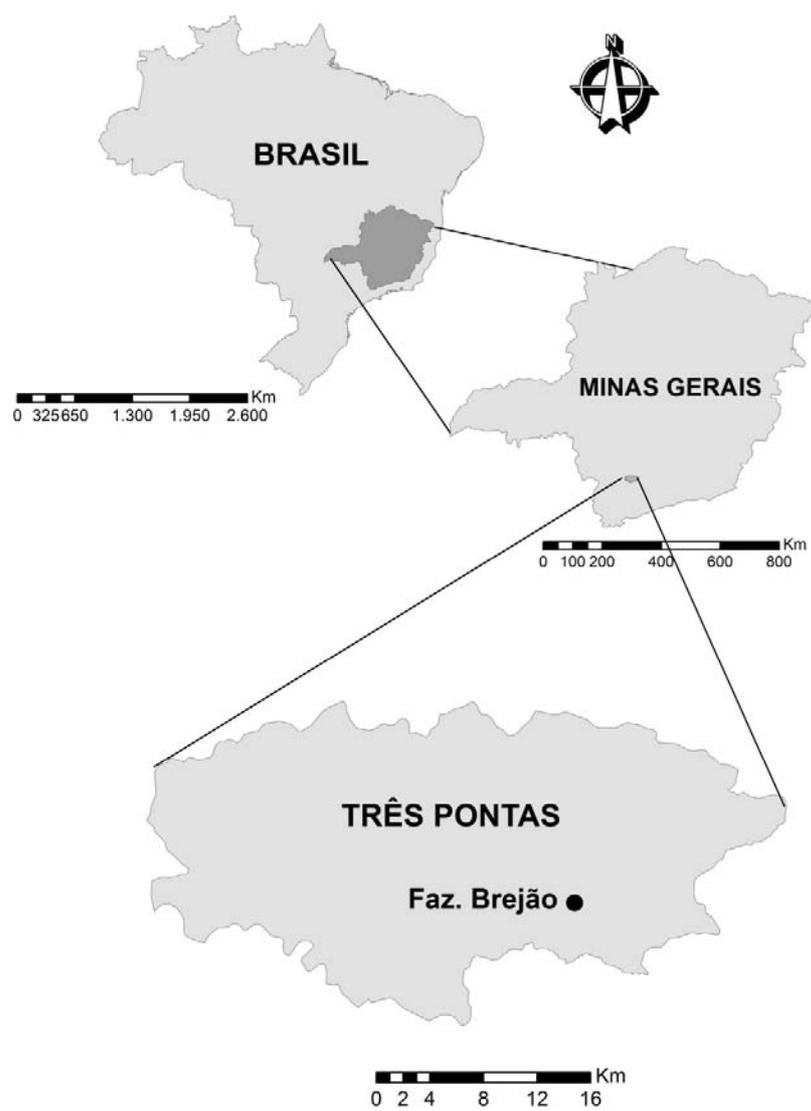


Gráfico 1 Localização da área experimental

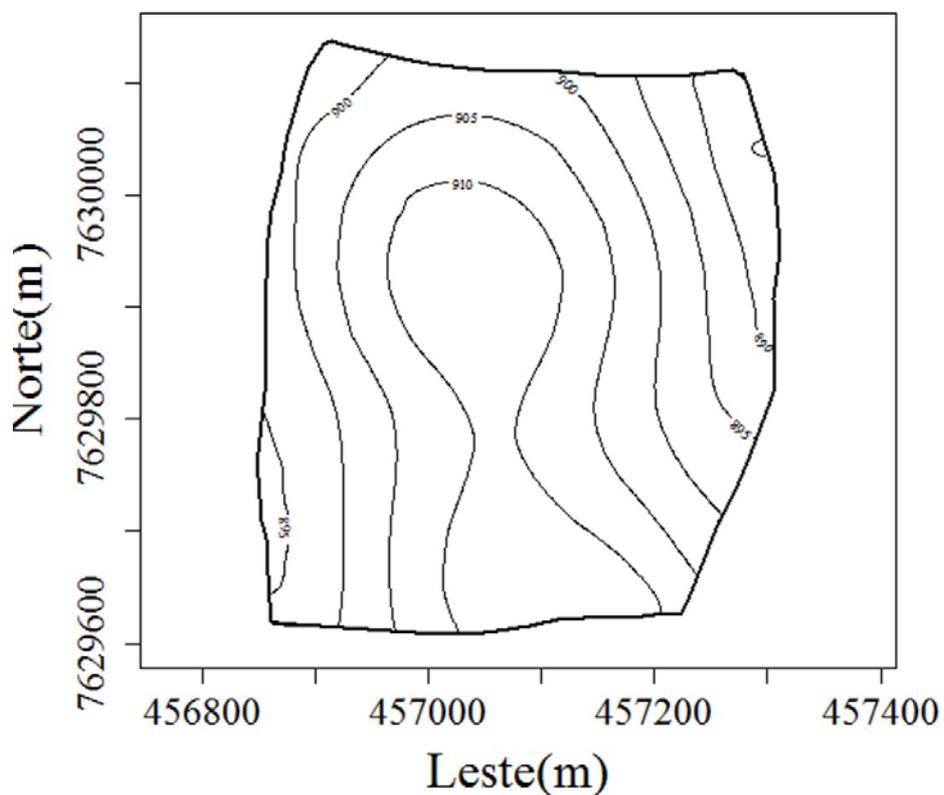


Gráfico 2 Mapa planialtimétrico da área de 22 ha da fazenda Brejão

## 2.2 Estudo da dependência espacial

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

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

em que  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ .  $Z$  pode ser qualquer um dos atributos estudados.  $x_i$  é a posição georreferenciada em que ocorreu a variável (atributo)  $Z$ . O semivariograma é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$  versus  $h$ . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$ , são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita ( $C_0$ ); patamar ( $C_0+C_1$ ); e o alcance ( $a$ ), conforme descrito por Bachmaier e Backers (2008). Foi utilizado o método dos quadrados mínimos ordinários para este ajuste de um modelo matemático.

O modelo matemático para semivariogramas escolhido foi o esférico, para todos os atributos estudados. Este modelo é muito utilizado em trabalhos de estudo de variabilidade espacial em lavouras cafeeiras de atributos do solo, produtividade, desfolha, força de desprendimento de frutos e infestação de praga (ALVES et al., 2009a; FERRAZ et al., 2012b; MOLIN et al., 2010; SILVA et al., 2007, 2008; SILVA, A. et al., 2010; SILVA, F. et al., 2010b). Ferraz et al. (2012c), estudando diferentes métodos e modelos, constatou que o modelo esférico foi o que se ajustou à maioria dos atributos do solo e à produtividade do cafeeiro.

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

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

### **2.3 Amostragem do solo**

Foi realizado nesta área, em julho de 2011, duas formas de amostragem do solo: a convencional e a em malha amostral quadrada. Para ambos os tipos de amostragem foram avaliados os seguintes atributos químicos do solo: pH do solo, disponibilidade de Fósforo (P) (Extrator Mehlich 1), Fósforo remanescente (Prem), disponibilidade de Potássio (K) (Extrator Mehlich 1), Cálcio Trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (Extrator: KCL – 1mol/L), Magnésio Trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (Extrator: KCL – 1mol/L), Acidez Trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) (Extrator: KCL – 1mol/L), Acidez Potencial (H + Al) (Extrator SMP), Saturação por Alumínio (m), CTC pontencial (T), CTC efetiva (t), Soma de Bases (SB) Sauração por Base (V) e Matéria Orgânica (MO). As amostras de solo compostas foram enviadas para o laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciência dos Solos da Universidade Federal de Lavras para se procederem às devidas análises dos atributos do solo.

#### **2.3.1 Amostragem convencional do solo**

Para amostragem convencional, foram realizadas a coleta de solo, com trado holandês, na profundidade de 0 – 20 cm na projeção da saia da planta de cafeeiro, retirando-se 10 subamostras para cada 11 ha e, assim, homogeneizando-as e obtendo apenas uma amostra composta. Dessa forma, obtiveram-se duas amostras compostas para a área em estudo, o que fez com que esta fosse dividida ao meio em dois lados, o Lado A e o Lado B (Gráfico 3).

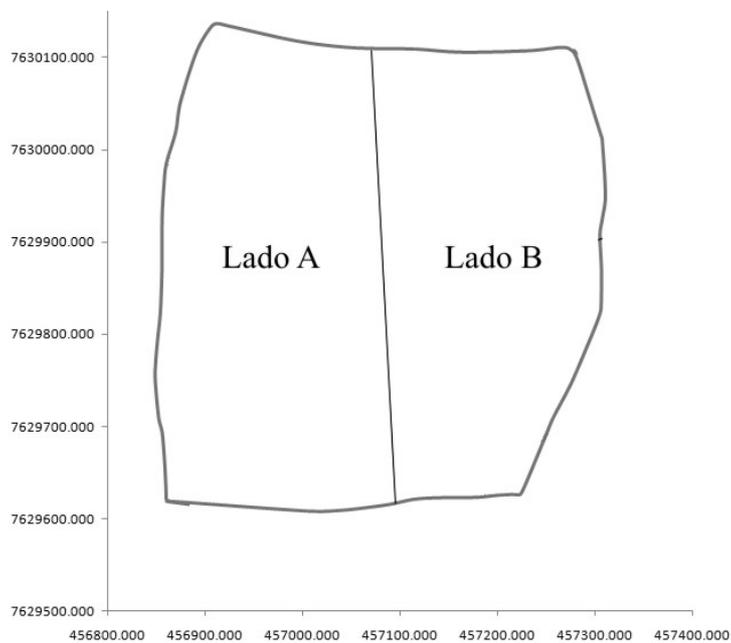


Gráfico 3 Amostragem Convencional

### 2.3.2 Amostragem em malha

Para a realização da amostragem em malha, demarcou-se na área em estudo uma malha amostral regular de 57 x 57 m, totalizando 64 pontos amostrais georreferenciados (em média 2,9 pontos por hectare) com a utilização do GPS topográfico Topcon FC 100, cujo erro médio era de 10 cm. Conforme foi observado no Capítulo dois, esta malha foi aquela que melhor se adequou aos atributos do solo, sendo assim escolhida para realização deste trabalho.

Cada ponto amostral corresponde a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referência (Gráfico 4).

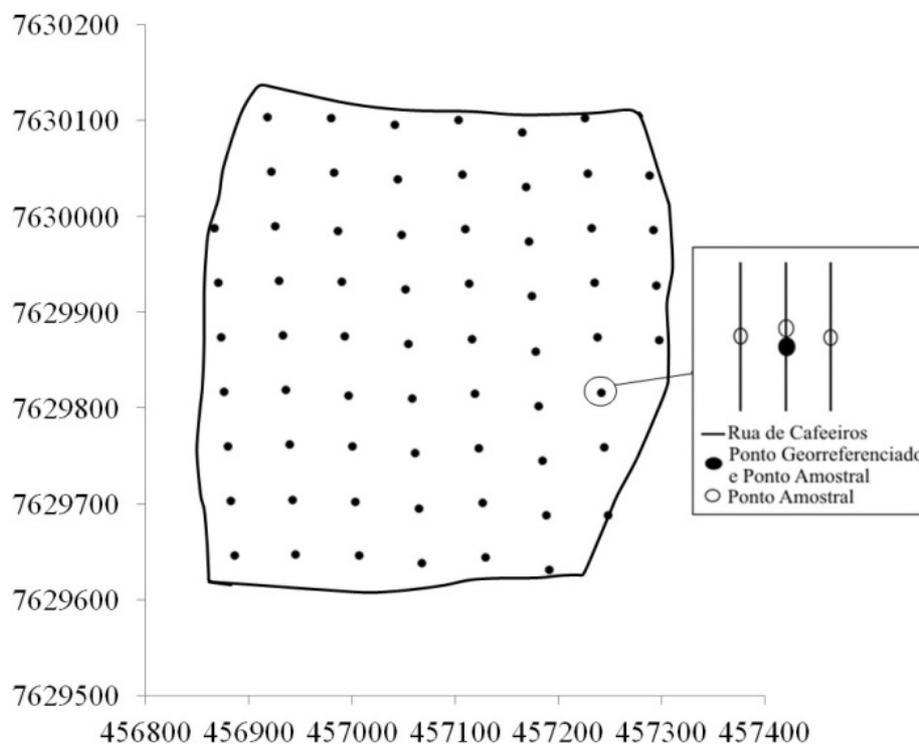


Gráfico 4 Malha Amostral e detalhamento da amostragem

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

### 2.3.3 Comparação entre amostragem convencional e em malha

Visando realizar um estudo comparativo entre as formas de amostragem utilizadas neste estudo, principalmente no tocante à interpretação da fertilizante

do solo e da disponibilidade dos atributos, foi utilizada a Tabela 1, permitindo, desta maneira, a observação das classes de interpretação.

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

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

Fonte: adaptado de Alvares et al. (1999)

#### 2.4 Dosagem de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O

Uma vez obtidos os resultados da análise do solo amostrados de forma convencional e em malha amostral quadrada, foi realizada a recomendação da dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a ser aplicada para suprir a necessidade de fósforo (P) para a cultura do cafeeiro. Além disto, calculou-se a recomendação da dose de K<sub>2</sub>O a ser aplicada para suprir a necessidade de potássio (K) para esta cultura. A recomendação da dosagem a ser aplicada, tanto de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, seguiu os conceitos propostos por Guimarães et al. (1999) para adubação de produção do cafeeiro.

A recomendação da dose P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, para a adubação da lavoura cafeeira, também passou pelos processos de caracterização da estrutura e da magnitude da dependência espacial e interpolação por krigagem ordinária,

seguindo a metodologia aplicada para disponibilidade dos atributos do solo, item 2.2 deste capítulo.

## 2.5 Amostragem dos atributos da planta

Nos pontos georreferenciados descritos no item 2.3.2 e pelo Gráfico 4, foram amostrados a produtividade, a força de desprendimento dos frutos verdes, a força de desprendimento dos frutos maduros, a diferença entre a força de desprendimento dos frutos verde e maduro, o índice de maturação, a altura de planta, o diâmetro de copa e o enfolhamento.

A produtividade (PROD) de café ( $L.planta^{-1}$ ) foi obtida por meio da colheita manual sobre panos das quatro plantas em torno do ponto amostral, e o volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após esta medição, foi obtida a média de produtividade destas quatro plantas, resultando no valor de produtividade para o ponto amostral.

Em cada ponto amostral, após as medições de produtividade, os frutos derriçados das quatro plantas componentes a este ponto foram colocados em um mesmo recipiente, onde foram homogeneizados para se retirar uma amostra de 0,5 L de frutos (CARVALHO et al., 2003; SILVA, 2008). Com este volume foi realizada a contagem de frutos para cada maturação (seco, passa, maduro e verde) e transformando-os em porcentagem para que desta maneira pudesse ser utilizada a equação dois, descrita por Alves et al. (2009b), calculando-se assim, o índice de maturação (IMAT):

$$IMAT = \sum \%maduro, \%passa, \%seco$$

(2)

Para a obtenção dos dados de Força de Desprendimento dos frutos do cafeeiro foi realizada a coleta de cinco frutos (dois frutos do terço superior, um fruto do terço médio e dois frutos do terço inferior) para cada estágio de maturação (Verde e Maduro) em cada planta componente do ponto amostral. Após a coleta destes frutos foi obtida a média da força de desprendimento das quatro plantas para cada estágio de maturação.

A determinação dessa força de desprendimento foi realizada por meio de um dinamômetro digital portátil modelo DD-500 fabricado pela *Instrutherm Instrumentos de Medição Ltda.*, que oferece medidas em Newton.

Após a obtenção da Força de Desprendimento dos Frutos Verde (FDFV) e da Força de Desprendimento do Fruto Maduro (FDFM) foi possível obter a diferença da força de desprendimento (DIFD) que é dado pela equação três:

$$\text{DIFD} = \text{FDFV} - \text{FDFM} \quad (3)$$

Nas quatro plantas que compunham o ponto amostral foram medidos, por meio de uma régua graduada em milímetros, a altura de planta e o diâmetro de copa. A medida da altura da planta (ALTU) foi obtida da superfície do solo até a parte superior da planta. O diâmetro de copa (DCOP) é a medida do ramo de maior comprimento. Após esta medição foi obtida a média da altura e do diâmetro de copa de cada ponto amostral dado em metros.

Para avaliação do enfolhamento (ENFO) foi utilizada a escala visual proposta por Boldini (2001) cujas variações se dão de 0 a 20%, de 21 a 40%, de 41 a 60%, de 61 a 80% e de 81 a 100%.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise descritiva dos dados de solo

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

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

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

Mín – Valor mínimo do atributo; Máx – Valor máximo do atributo;  $\bar{X}$  – Média; Med – mediana; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

Pode-se perceber que os valores médios encontrados pela amostragem em malha e os valores obtidos pela amostragem convencional apresentam diferenças. Porém apenas a observação destes valores pode ser temerária, pois

ao se analisar, também, os valores mínimos e máximos dos atributos do solo da amostragem em malha (Tabela 2), percebe-se que existe variação nos dados.

Contudo, somente o conhecimento desta variação não é suficiente para identificar os locais onde se encontram os altos teores, e os locais onde se encontram os teores mais baixos de um determinado atributo do solo. Nesse caso, torna-se necessário utilizar a Geoestatística, para que se possa identificar a estrutura de variabilidade espacial dos dados, bem como para realizar a confecção de mapas, a fim de possibilitar o gerenciamento preciso das intervenções necessárias.

### 3.2 Variabilidade espacial dos atributos do solo

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial de todos os atributos do solo em estudo (Tabela 3 e Gráfico 5).

Tabela 3 Parâmetros estimados para o semivariograma experimental dos atributos do solo em estudo

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

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

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

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

Após o ajuste do semivariograma (Tabela 3 e Gráfico 5) para cada atributo do solo estudado, estimaram-se, por meio da krigagem ordinária, os valores destes atributos para os locais não amostrados. Dessa maneira, foi possível construir mapas de distribuição espacial (isocores) para todos eles (Gráfico 6, 7 e 8), que permitiram visualizar a variabilidade espacial na área.

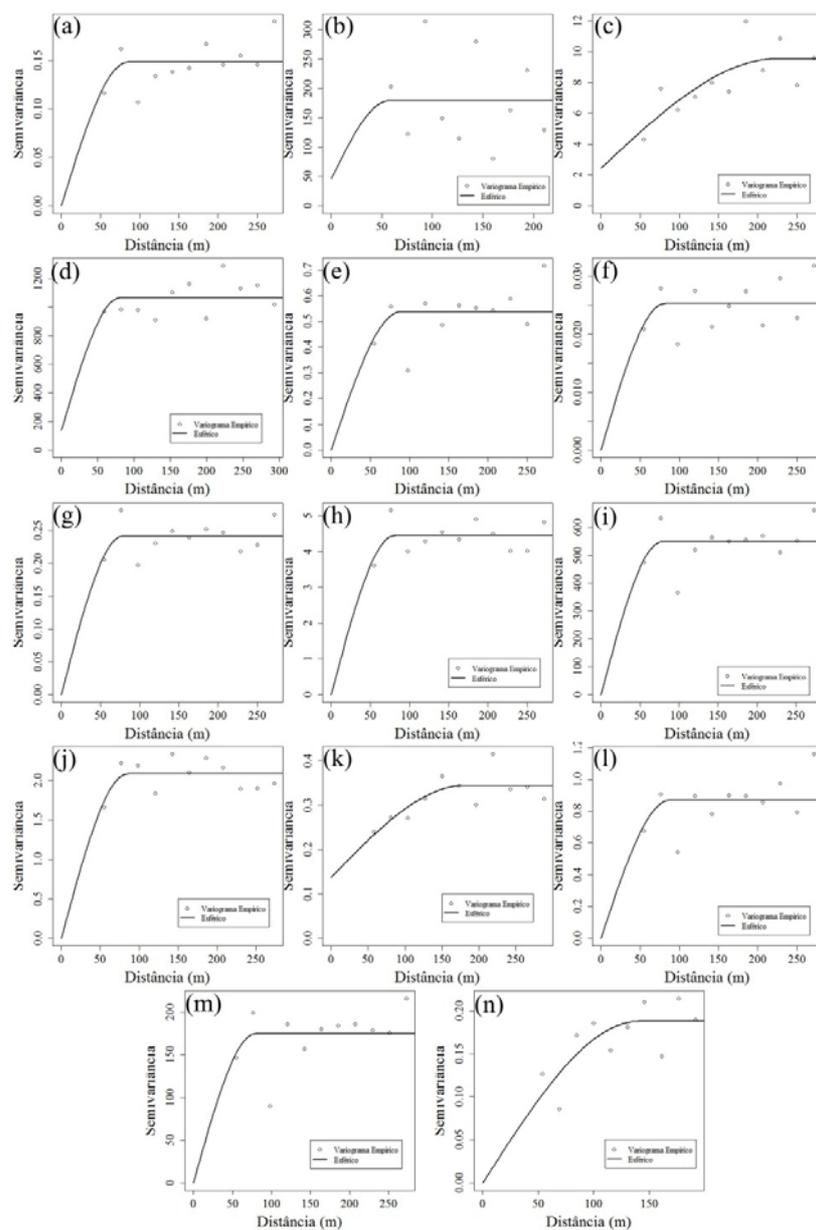


Figura 5 Semivariograma do pH (a), P ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) (b), Prem ( $\text{mg}/\text{L}$ ) (c), K ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) (d), Ca ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (e), Mg ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (f), Al ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (g), H + Al ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (h), m (%) (i), T ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (j), t ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (k), SB ( $\text{cmol}/\text{dm}^3$ ) (l), V (%) (m), MO ( $\text{dag}/\text{Kg}$ ) (n).

### 3.3 Comparativo entre amostragem convencional e em malha

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

Observa-se, pelas Tabelas 2 e 4, que a amostragem convencional indicaria teores de P baixo e muito baixo, enquanto que a amostragem em malha (Gráfico 6a e Tabela 4) indicou também a existência de teores médio e muito bom de disponibilidade do P.

O Prem é um fator utilizado pelas tabelas propostas por Alvarez et al. (1999) para realizar a recomendação para a adubação fosfatada. Ela não apresenta uma classificação de disponibilidade, apenas é repartida em classes numéricas. A amostragem convencional (Tabelas 2 e 4) indica Prem classificado de 10 a 19, enquanto que na amostragem em malha (Gráfico 6b e Tabela 4) foram observados também Prem de 0 a 4, e de 4 a 10 na maior parte da área.

O pH de um solo é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma cultura. Ao se comparar a amostragem convencional com a amostragem em malha, pode-se perceber que na amostragem em malhas (Gráfico 6c e Tabela 4) existiria pontos em que o teor de pH seria classificado como bom e pontos com pH muito baixo, que não foram observados na amostragem convencional. Porém o teor baixo de pH foi identificado em grande parte da área, na amostragem em malha, e em toda a área, amostragem convencional (Tabela 2 e 4).

O Potássio (K) na amostragem convencional teve sua disponibilidade classificada como bom e muito bom (Tabela 4). Para a amostragem em malha observou-se, ainda, uma disponibilidade de K médio (Gráfico 6d e Tabela 4).

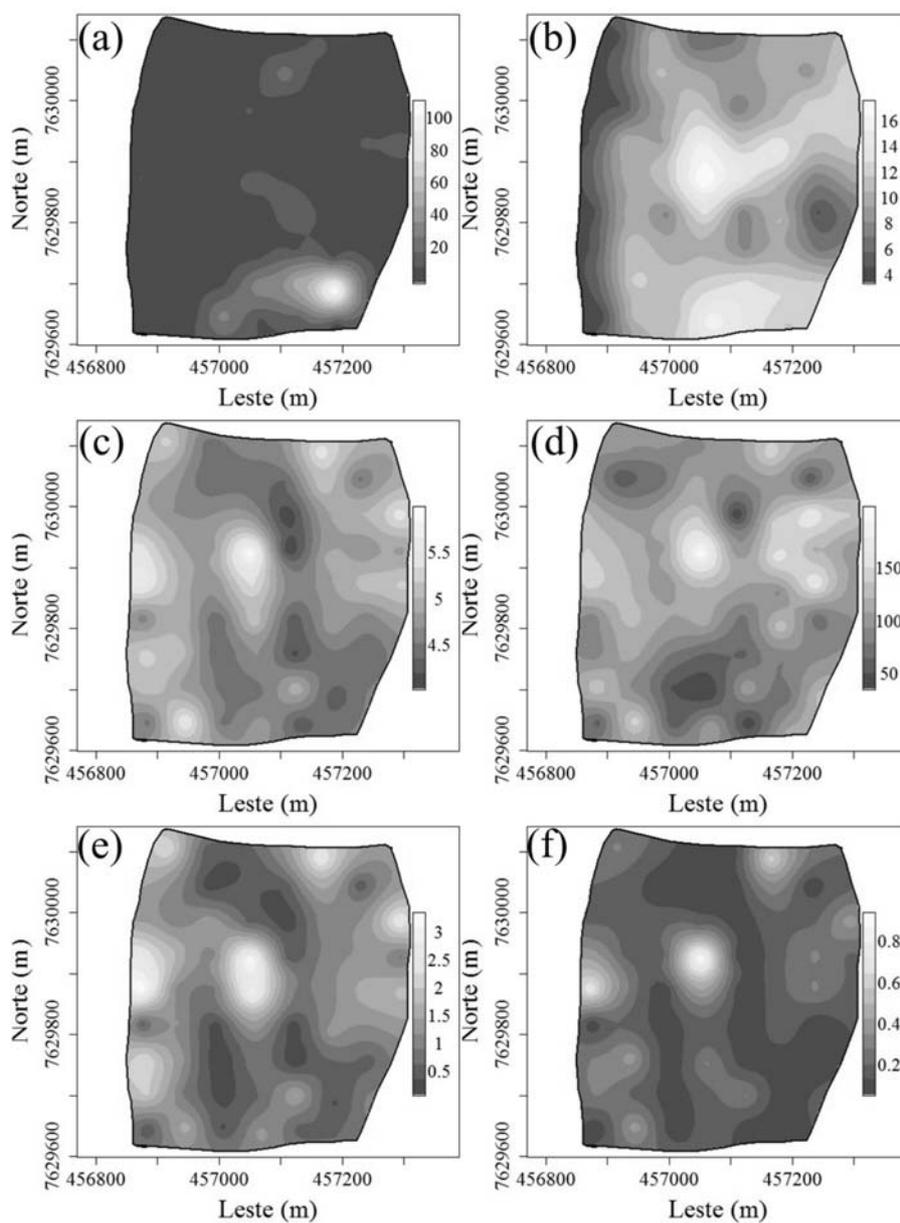


Gráfico 6 Distribuição espacial do P (mg/dm<sup>3</sup>) (a), Prem (mg/L) (b), pH (c), K (mg/dm<sup>3</sup>) (d), Ca (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) (e) e Mg (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) (f).

Os teores de  $\text{Al}^{3+}$ , de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  são variáveis utilizadas na fórmula proposta por Alvarez et al. (1999) para se calcular a necessidade de calagem. A amostragem convencional indicou que o teor Cálcio Trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) estaria classificado como médio (Tabela 4), que também foi observado em grande parte da Gráfico 6e. Porém a amostragem em malha ainda indicou teores de  $\text{Ca}^{2+}$  bom, baixo e muito baixo. Para o Magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ), a amostragem convencional indicou teor baixo (Tabelas 2 e 4) para toda a área, que foi observado na amostragem em malha (Gráfico 6f e Tabela 4) na maior parte do mapa. Porém esta amostragem indicou, ainda, teores médio e muito baixo.

Segundo Furtini Neto et al. (1999), dentre as principais causas do pouco crescimento das plantas em solos ácidos está a toxidez causada pelo alumínio. A amostragem convencional (Tabelas 2 e 4) indicou teores médio e baixo para a acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ). Porém, além destes teores, na amostragem em malha (Gráfico 7a e Tabela 4) pode-se observar que também existiam teores alto e muito baixo na área.

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

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

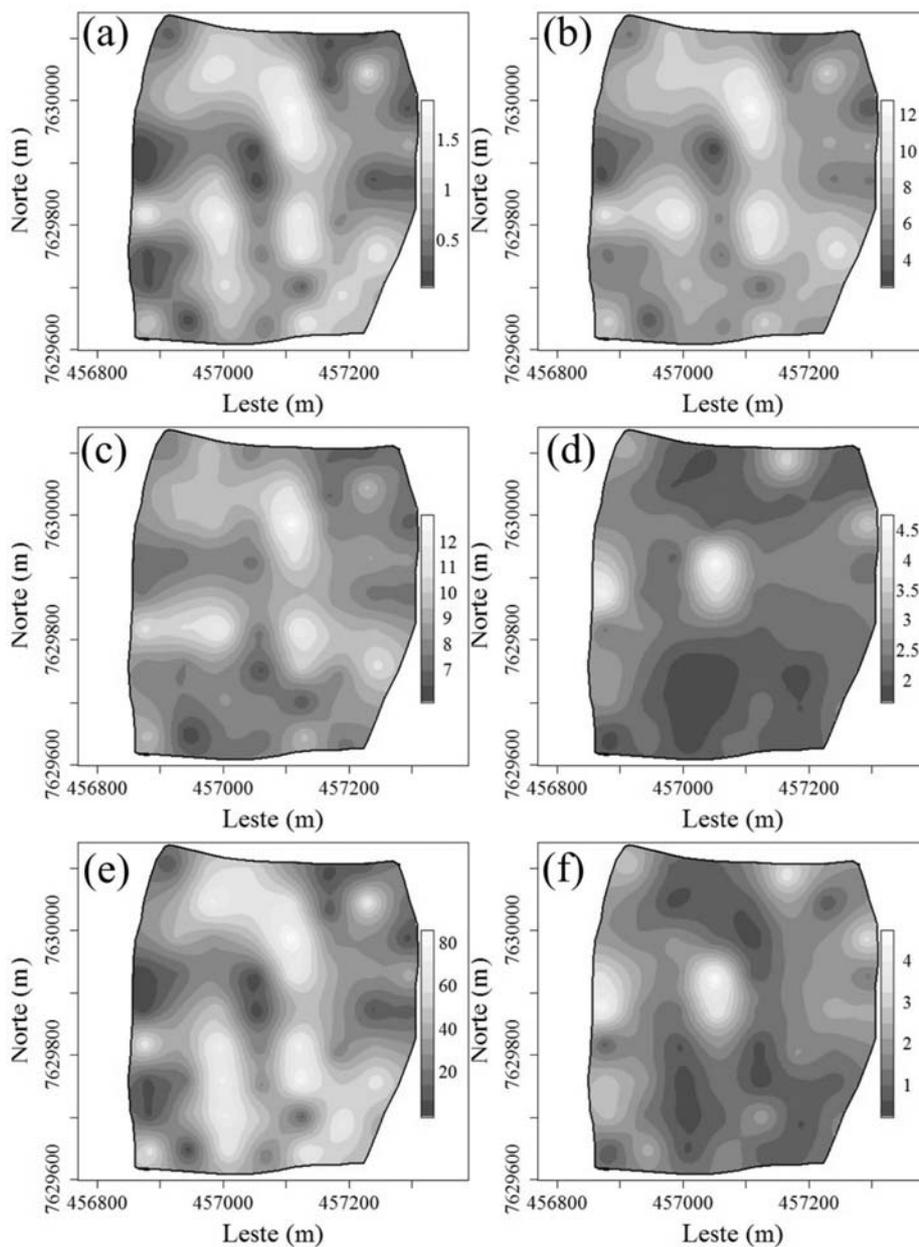


Gráfico 7 Distribuição espacial do Al ( $\text{cmol}_d/\text{dm}^3$ ) (a), H + Al ( $\text{cmol}_d/\text{dm}^3$ ) (b), T ( $\text{cmol}_d/\text{dm}^3$ ) (c), t ( $\text{cmol}_d/\text{dm}^3$ ) (d), m (%) (e) e SB ( $\text{cmol}_d/\text{dm}^3$ ) (f).

A CTC efetiva ( $t$ ) reflete a capacidade de troca de cátions efetiva do solo, ou seja, a capacidade do solo em reter cátions em seu pH natural. Na amostragem em malha (Gráfico 7d e Tabela 4) foram observados teores médios de  $t$ , em grande parte da área, e teores baixo no restante da área. A amostragem convencional indicou apenas o teor médio (Tabela 2 e 4).

A fração da CTC efetiva que é ocupada por alumínio trocável é chamada de porcentagem de saturação de alumínio ( $m$ ). A amostragem convencional indicou que o  $m$  seria classificado como baixo (Tabelas 2 e 4). Porém na amostragem em malha, além desta classificação, foram observadas, também, as classificações muito alta, alta e muito baixa (Gráfico 7e e Tabela 4).

A Soma de Bases (SB) reflete a soma de cálcio, magnésio e potássio trocáveis. Na amostragem em malha (Gráfico 7f e Tabela 4) foram observados SB classificado com Bom, médio, baixo e muito baixo, enquanto que na amostragem convencional foi observado apenas SB médio (Tabelas 2 e 4).

A porcentagem de saturação de bases da CTC a pH 7,0 ( $V$ ) reflete quantos por cento da CTC a pH 7,0 estão ocupados pelas bases existentes no solo. Na amostragem em malha (Gráfico 8a e Tabela 4) foram observados  $V$  bom, médio e baixo. Já na amostragem convencional foi observado apenas  $V$  médio (Tabelas 2 e 4).

Furtini Neto et al. (1999) citam que a Matéria Orgânica (MO) pode ser considerada como sinônimo de fertilidade do solo, pois, sua presença no solo afeta sobremaneira os atributos químicos, físicos e biológicos do mesmo e, entre vários benefícios, aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas. A amostragem convencional indicou teor de MO médio para toda a área (Tabelas 2 e 4), enquanto que a amostragem em malha (Gráfico 8b e Tabela 4) foram observados, além do teor médio, teores baixo e bom.

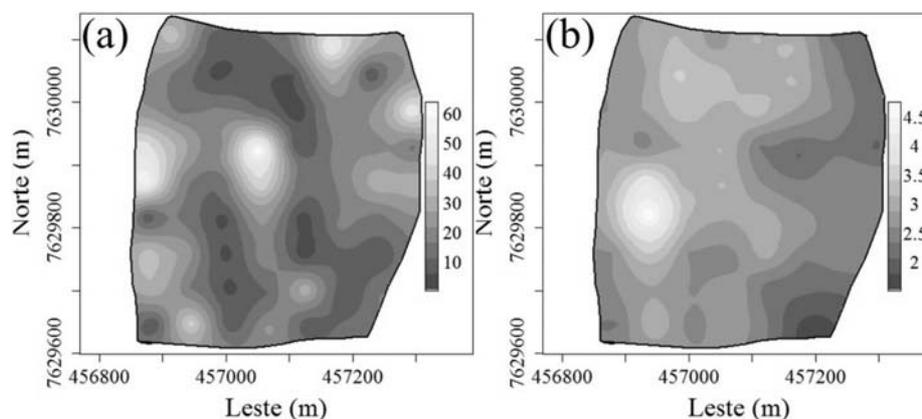


Gráfico 8 Distribuição espacial do V (%) (a) e MO (dag/Kg) (b).

A amostragem em malha, preconizada pela cafeicultura de precisão, como era de se esperar, identifica melhor as variações existentes no solo da área, em relação à amostragem convencional, baseada na média. A amostragem em malha apresentou pontos onde nem sempre necessitaria de uma correção via insumos (adubos e corretivos), e locais onde seriam necessárias dosagens maiores de fertilizantes e corretivos, evidenciando-se, desta maneira, as limitações de se usar o valor médio para recomendação de intervenções no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2008) ao estudar estas duas formas de amostragens para a cafeicultura. Portanto, a utilização de mapas, tais quais apresentados nos Gráficos 6, 7 e 8, contribuem para o manejo diferenciado da lavoura, pois permitem prescrever de forma mais precisa a dosagem de fertilizantes e corretivos, que resultará em operações de aplicação destes produtos de forma mais eficiente.

Tabela 4 Comparativo entre a amostragem em malha e a amostragem convencional identificando a localidade e classificação dos teores dos atributos

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

Tabela 4, continua

<b>Atributo</b>	<b>Classe</b>	<b>Amostragem em Malha</b>	<b>Amostragem Convencional</b>
Al	Alta	Regiões norte, noroeste, sul e sudoeste	-
	Média	Grande mancha na parte leste e noroeste	Lado A
	Baixa	Manchas nas regiões sudoeste e oeste e pontualmente na região noroeste	Lado B
	Muito Baixa	Manchas nas regiões sudoeste e oeste e pontualmente na região noroeste	-
H + Al	Muito Alta	Alguns pontos da região central norte, central leste e central oeste	-
	Alta	Grande parte da área	Toda a area
	Média	Alguns pontos espalhados pela área	-
(m)	Muito Alta	Alguns pontos da região norte, sul e sudoeste	-
	Alta	Pontos na região norte, sudoeste, sudeste e parte do nordeste	-
	Baixo	Pontos na borda oeste, na borda sudoeste, além de pontos na parte leste e nordeste	Toda a area
	Muito Baixo	Pontos na borda oeste, na borda sudoeste, além de pontos na parte leste e nordeste	-
	T	Bom	Grande parte da área
(t)	Médio	Grande parte da área	Toda a area
	Médio	Maior parte da área	Toda a area
	Baixo	Menor parcela da área	-
SB	Bom	Região central e leste	-
	Médio	Extremo norte da área, na borda leste e na borda noroeste	Toda a area
	Baixo	Machas nas regiões sudoeste, sudeste e noroeste	-
	Muito Baixo	Machas nas regiões sudoeste, sudeste e noroeste	-
V	Bom	Região central e a borda oeste	-
	Baixo	Grande parte da área	Toda a area
	Muito Baixo	Região norte, noroeste, sudeste e sul	-

Tabela 4, conclusão

<b>Atributo</b>	<b>Classe</b>	<b>Amostragem em Malha</b>	<b>Amostragem Convencional</b>
MO	Bom	Parte oeste e alguns pontos da região nordeste	-
	Médio	Maior parte da área	Toda a area
	Baixo	Região próxima a borda sudeste e pontos na região leste	-

### 3.4 Variabilidade espacial da recomendação da dose de $P_2O_5$ e $K_2O$

As análises descritivas da recomendação da dose de adubação de  $P_2O_5$  e de  $K_2O$ , obtidos pela amostragem em malha e para amostragem convencional, podem ser observadas na Tabela 5. Ressalta-se que os valores da Tabela 5 para o  $P_2O_5$  e o  $K_2O$ , baseados na amostragem em malha, são referentes à área representada por cada ponto (0,34 ha) e para a dosagem baseada na amostragem convencional, refere-se à área de cada Lado, que é de 11 ha.

Tabela 5 Estatística Descritiva do teor da dose recomendada de  $P_2O_5$  (Kg) e da dose recomendada de  $K_2O$  (Kg) para amostragem em malha e amostragem convencional.

	<b>Amostragem em Malha</b>					<b>Amostragem Convencional</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>Lado A</b>	<b>Lado B</b>
$P_2O_5$	8,25	25,44	17,62	7,36	41,74	704	814
$K_2O$	51,56	103,13	72,91	15,61	21,42	2475	1650

DP – Desvio Padrão e CV – Coeficiente de Variação.

A partir da análise dos valores mínimos e máximos e, também, da média da dosagem é possível perceber que existe uma considerável variação nos dados. Porém, somente o conhecimento desta variação não é suficiente para identificar os locais onde deveriam ser aplicados determinada dose de um fertilizante, seja

ela uma dosagem alta, média, baixa ou nula. Neste caso, torna-se necessária a utilização de ferramentas geoestatísticas, para que se possa identificar a estrutura da variabilidade espacial dos dados, bem como para realizar a confecção de mapas, a fim de possibilitar o gerenciamento preciso das intervenções necessárias.

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial dos atributos em estudo (Tabela 6 e Gráfico 9). Pela classificação (CAMBARDELLA et al., 1994), o  $P_2O_5$  apresentou GD forte e o  $K_2O$  apresentou GD moderado.

TABELA 6 Parâmetros estimados para o semivariograma experimental da dose de  $P_2O_5$  e  $K_2O$

Variável	Dist. Max	$C_0$	$C_0 + C_1$	$C_1$	a	GD
$P_2O_5$	285	4,52	49,69	54,21	88,02	8,34 Forte
$K_2O$	285	89,57	76,385	165,96	76,39	53,97 Moderado

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

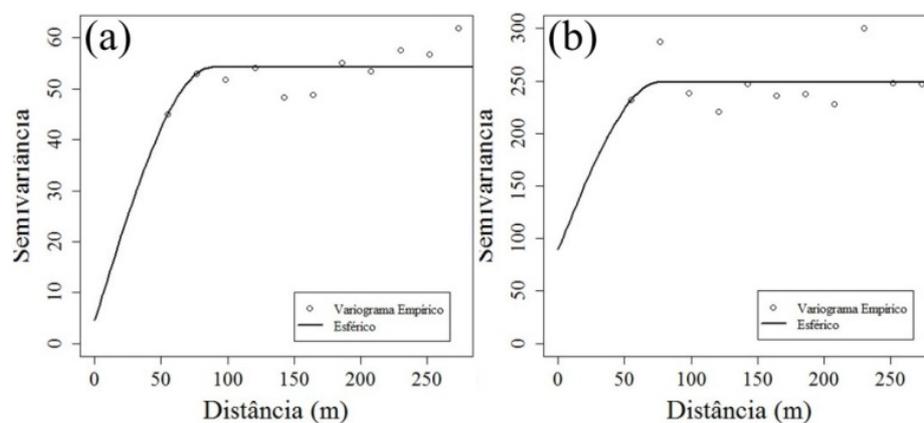


Gráfico 9 Semivariograma da Recomendação de Aplicação de Fósforo (Kg) (a) e da Recomendação de Aplicação de Potássio (Kg) (b).

Tendo o alcance considerável importância na determinação do limite da dependência espacial, observou-se, que os alcances encontrados para a recomendação da adubação não superaram 89 m.

Após o ajuste do semivariograma (Tabela 6 e Gráfico 9), para cada variável, foram estimados valores das doses necessárias de adubos por meio da krigagem ordinária. Desta maneira, foi possível construir mapas de distribuição espacial (isocores) para estas variáveis (Gráfico 10), que permitiram visualizar a variabilidade espacial da dosagem de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para suprir as necessidades deste solo.

Para que fosse realizada uma análise mais profunda da recomendação da dosagem de adubos fosfatados e potássicos, utilizou-se, também, os mapas de isocores do fósforo (P) e potássio (K), observados no gráfico 6a e 6d, respectivamente. Assim, se torna possível comparar os mapas de disponibilidade no solo de determinado atributo e a sua respectiva dose de adubo necessária para suprir a necessidade deste solo.

Desta maneira, observou-se nos mapas de teor dos atributos químicos P (Gráfico 6a) e K (Gráfico 6d) que as cores mais escuras representam os baixos teores, enquanto que as cores mais esbranquiçadas representam os teores mais elevados. Nos mapas de recomendação de aplicação de  $P_2O_5$  (Gráfico 10a) e de  $K_2O$  (Gráfico 10b) as cores mais escuras representam as menores doses, enquanto que as cores esbranquiçadas as maiores dosagens.

Pela observação do Gráfico 6a, pode-se perceber que grande parte da área estava com cores escurecidas e, em um ponto da área, pode-se observar coloração mais esbranquiçada. Isto se reflete no mapa de recomendação de aplicação de  $P_2O_5$ , onde se percebeu que na maior parte da área há a necessidade de se aplicar doses maiores (cores esbranquiçadas).

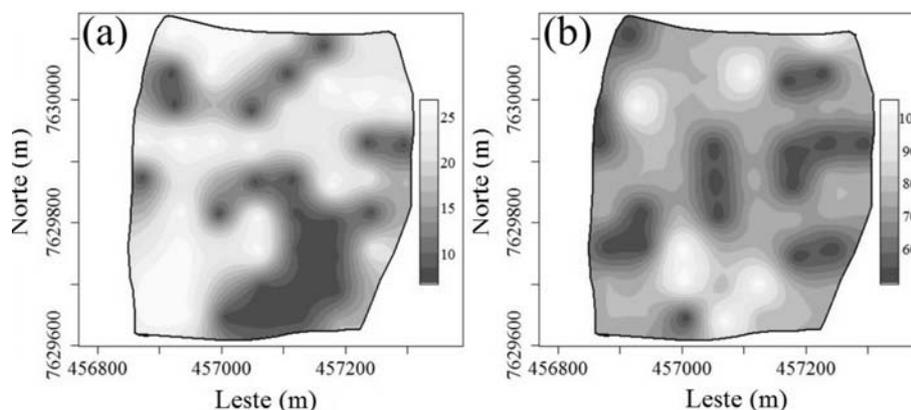


Gráfico 10 Distribuição espacial da Recomendação de Aplicação de Fósforo (Kg) (a) e Recomendação de Aplicação de Potássio (Kg)(b)

Pela análise do Gráfico 6d percebe-se que grande parte da área apresenta valores intermediários (cinza claro para intermediário) para valores superiores (esbranquiçados). Analisando-se os Gráficos 6d e 10b percebe-se uma relação direta onde pontos escurecidos no Gráfico 6d estão esbranquiçados no Gráfico 10b.

Mapas como os do Gráfico 10a e 10b têm uma importância considerável para guiar a aplicação diferenciada de fertilizantes, indicando a quantidade a ser aplicada em cada localidade, corroborando para uma aplicação mais eficaz. Em cafeicultura a adubação diferenciada, ou a taxas variáveis, pode ser realizada por meio da adubação manual, conforme citada no trabalho de Ferraz et al. (2011) ou mesmo mecanizada, conforme descrita por Molin et al. (2010). Ressalta-se que estes mapas podem ser utilizados em qualquer uma destas formas de adubação a taxa variada.

Ao se realizar um comparativo da dosagem recomendada para o  $P_2O_5$  para os dois sistemas de amostragem de solo (convencional e em malha), pode-se observar que a quantidade total a ser aplicada deste elemento nos 22 ha, quando se realizou a recomendação baseada na amostragem convencional, seria

da ordem de 1518 kg. Já, baseando-se nos resultados da análise de solo provindos da amostragem em malha, para cafeicultura de precisão, a recomendação seria de 1128 Kg para a área em estudo, o que representou 25,7% de redução em relação à amostragem convencional.

Para o  $K_2O$ , ao se observar os resultados da análise de solo obtida por amostragem convencional, a recomendação seria aplicar 4125 Kg na área total (22 ha), enquanto que a recomendação baseada na amostragem em malha recomendaria à aplicação 4666 Kg de  $K_2O$  nos 22 ha em estudo. Neste caso a amostragem em malha, para cafeicultura de precisão, recomendaria uma dosagem de  $K_2O$  11,6% maior que a amostragem tradicional.

Desta maneira, podem-se observar as diferenças nas recomendações de aplicação de fertilizantes proporcionadas pela interpretação das análises de solo provindas dos dois sistemas de amostragem. Ressalta-se que nem sempre há a redução da quantidade de um determinado produto (fertilizantes, corretivos, defensivos) a ser aplicado em uma área, quando se utilizam os princípios da cafeicultura de precisão, porém sua maior vantagem é identificar os locais e aplicar tais produtos dentro da necessidade específica de cada região, fazendo com que assim a utilização destes produtos seja mais eficiente e racional, o que torna vantajosa a sua utilização.

### **3.5 Análise descritiva dos atributos da planta**

Os dados da análise descritiva dos atributos da planta em estudo estão na Tabela 7. A partir da análise dos valores mínimos e máximos e, também, da média dos atributos da planta é possível perceber que existe variação considerável nos dados. Porém, apenas o conhecimento desta variação não é suficiente para identificar os locais onde se encontram os valores altos de um atributo, e nem os locais onde se encontram os valores mais baixos deste. Neste

caso, o uso da geoestatística, se torna necessário para identificar se há variabilidade espacial e como esta variabilidade se dá na área em estudo, com a consequente confecção de mapas, de forma a permitir o gerenciamento preciso das intervenções de campo necessárias.

Tabela 7 Estatística descritiva para os atributos: PROD (L.planta<sup>-1</sup>), IMAT (%), FDFV (N), FDFM (N), DIFD (N), ALTU (m), DCOP (m) e ENFO (%).

	Mín	Máx	$\bar{X}$	Med	DP	CV (%)	Var	K	Assimetria
PROD	1,40	7,45	4,26	4,36	1,42	33,27	2,01	-0,50	0,15
IMAT	8,21	90,77	64,04	65,58	19,01	29,69	361,55	0,45	-0,82
FDFV	5,49	8,81	6,88	6,86	0,77	11,17	0,59	-0,46	0,30
FDFM	2,73	5,80	4,17	4,10	0,66	15,79	0,43	-0,37	0,20
DIFD	1,38	4,13	2,71	2,73	0,77	28,29	0,59	-0,93	0,07
ALTU	1,67	2,17	1,92	1,93	0,09	4,77	0,01	0,92	-0,42
DCOP	1,54	1,92	1,73	1,73	0,09	5,12	0,01	-0,65	-0,07
ENFO	78,75	95,00	87,46	87,50	3,21	3,67	10,32	-0,05	-0,03

Mín – Valor mínimo do atributo; Máx – Valor máximo do atributo;  $\bar{X}$  – Média; Med – mediana; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação; Var – Variância e K – Curtose.

### 3.6 Variabilidade espacial dos atributos da planta

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial de todos os atributos em estudo (Tabela 8 e Gráfico 11).

Pela classificação proposta por Cambardella et al. (1994), os atributos Enfolhamento (ENFO), Força de Desprendimento de Frutos Maduros (FDFM) e o Diâmetro de Copa (DCOP) apresentaram GD forte. Enquanto que a Produtividade (PROD), o Índice de Maturação (IMAT), a Força de Desprendimento dos frutos verdes (FDFV) e Diferença da Força de Desprendimento (DIFD) apresentaram GD moderado. A altura da planta (ALTU) apresentou GD fraco.

O alcance encontrado pelos atributos variou de 60,21 m (FDFM) a 322,85 m (IMAT). Desta maneira, o planejamento de uma amostragem de planta na área que contemplasse a variabilidade espacial existente de um determinado atributo ou mesmo de múltiplos atributos, teria de levar em conta o valor do alcance, buscando-se definir uma malha cuja distancia seja menor que o menor valor de alcance encontrado, ou mesmo indicando a necessidade do uso das malhas *zoom* para poder melhorar o ajuste do semivariograma.

Tabela 8 Parâmetros estimados para o semivariograma experimental dos atributos: PROD (L.planta<sup>-1</sup>), IMAT (%), ENFO (%), FDFV (N), FDFM (N), DIFD (N), ALTU (m) e DCOP (m).

<b>Atributo</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub></b>	<b>A</b>	<b>GD</b>	
PROD	1,196	0,997	2,192	261,53	54,54	Moderado
IMAT	107,212	301,172	408,384	322,85	26,25	Moderado
ENFO	1,511	6,960	8,471	110,99	17,84	Forte
FDFV	0,320	0,293	0,613	124,64	52,24	Moderado
FDFM	0,024	0,224	0,248	60,21	9,54	Forte
DIFD	0,216	0,436	0,652	193,70	33,15	Moderado
ALTU	0,008	0,001	0,009	120,00	92,94	Fraco
DCOP	0,002	0,006	0,008	120,00	21,05	Forte

C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> - Contribuição; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; a – alcance e GD – Grau de Dependência Espacial.

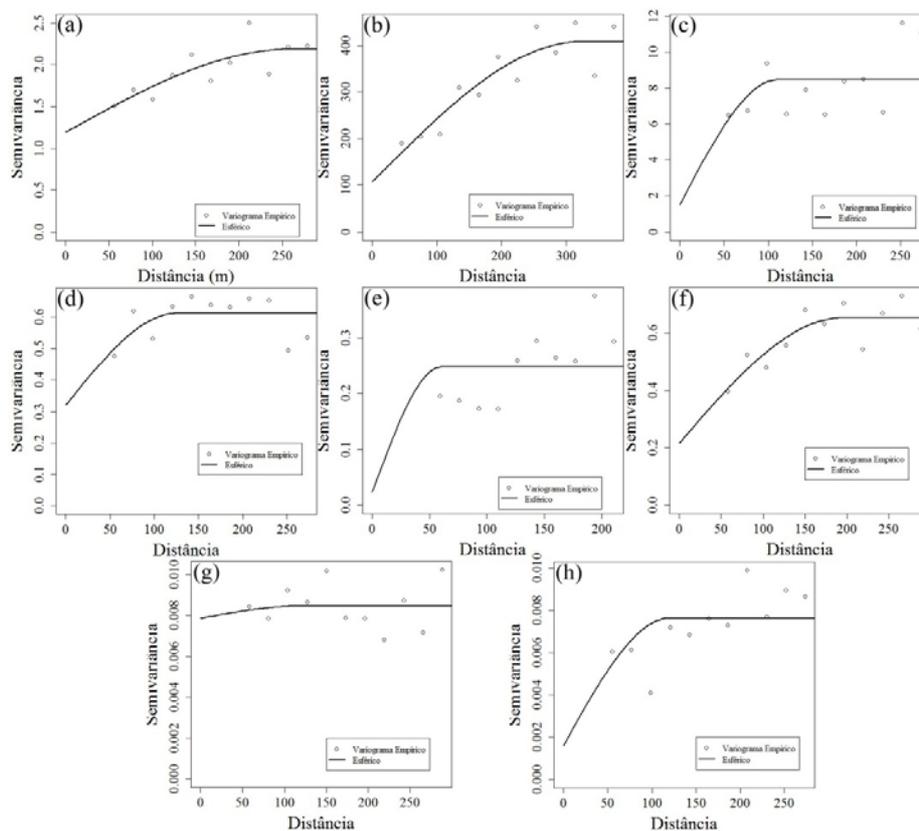


Gráfico 11 Semivariograma da PROD ( $L.planta^{-1}$ ) (a), IMAT (%) (b), ENFO (%) (c), FDFV (N) (d), FDFM (N) (e), DIFD (N) (f), ALTU (m) (g) e DCOP (m) (h).

Após o ajuste do semivariograma (Tabela 8 e Gráfico 11) para cada atributo da planta foram estimados valores da PROD, do IMAT, da FDFM, da FDFV, da DIFD, da ALTU, do DCOP e do ENFO por meio da krigagem ordinária. Desta maneira, foi possível construir mapas de distribuição espacial (isocores) para todos os atributos deste estudo (Gráficos 12 e 13), que permitiram visualizar a variabilidade espacial na área.

A produtividade média encontrada na área foi de 4,21 L planta<sup>-1</sup> (Tabela 9). Quando se analisa o mapa de variabilidade espacial da produtividade, pode-se perceber que as regiões leste e nordeste da área apresentaram as maiores produtividades da lavoura, que também puderam ser observadas na porção oeste e noroeste. Os menores valores de produtividade foram observados na região central e, também, na parte sudeste da área.

A utilização de mapas, tais quais apresentados pelo Gráfico 12a, pode vir em conjunto com a manipulação dos mapas de atributos químicos do solo, de forma a encontrar os motivos da ocorrência da variabilidade da produtividade, principalmente em se tratando de baixas produtividades, o que possibilitará a correção das falhas, permitindo que na próxima safra estes problemas possam ser minimizados. Desta forma, o cafeicultor pode tirar proveito das informações históricas da área providas de mapeamentos anteriores para tomar as decisões necessárias para o bom andamento da cultura.

Estes mapas podem ainda ser utilizados no gerenciamento da colheita, tanto manual, quanto mecanizada ou semimecanizada. Na colheita manual estes mapas contribuirão na estimativa de produtividade e na contratação de pessoal para a colheita. Na colheita semimecanizada serão importantes, além dos citados para a colheita manual, na aquisição ou aluguel de derriçadoras portáteis. Na colheita mecanizada do café, esses mapas podem ser utilizados na logística das carretas e trator de apoio à colhedora, ou em caso de colhedoras que possuem reservatórios próprios, na logística e determinação do ponto de descarga da colhedora, o que pode reduzir paradas e manobras desnecessárias.

O Índice de Maturação (IMAT) médio da área foi de 66,89%. De acordo com Silva et al. (2006), o índice de maturação permite definir o período de colheita de um determinado talhão. Quando o talhão apresentar em suas plantas 20 a 25% de frutos verdes (IMAT de 75 a 80%) este se caracterizaria por estar no início da colheita, se estiver entre 10 a 15% de frutos verdes estará

caracterizado como meio da colheita (IMAT de 85 a 90%) e menos que 5% caracteriza o fim da colheita (IMAT de 95%).

Observando-se o mapa de distribuição espacial do IMAT (Gráfico 12b) pode-se perceber que boa parte da área se encontra classificada como início de colheita, assim, caso seja possível, o produtor poderá aguardar um pouco mais para colher estas regiões. Plantas com maturação classificada como estando no meio de colheita puderam ser observadas em alguns pontos da região sul, da região sudoeste e em algumas manchas nas regiões nordeste e noroeste. Nenhuma área pode ser classificada como fim de colheita. Pelo mapa pode-se ainda perceber que a colheita não poderia ser iniciada, ou ser realizada nas localidades próximas às bordas leste e nordestes, na extremidade sudoeste e em algumas manchas ao longo do mapa. Desta maneira fica clara a importância do estudo da variabilidade espacial do Índice de Maturação no gerenciamento da colheita de frutos de cafeeiro, seja ela manual, semimecanizada ou mecanizada.

O estudo da Força de Desprendimento dos frutos de cafeeiro, tanto verde quanto maduro, pode ser um importante indicador para realizar a colheita mecanizada e seletiva. Além disto, podem ser utilizados para indicar o momento de se iniciar esta forma de colheita (SILVA, 2008).

Percebeu-se que os maiores valores de Força de Desprendimento de Frutos Maduros (FDFM) foram encontrados na região central, norte e na borda noroeste e oeste da área (Gráfico 12d). Os menores valores de FDFM foram encontrados na região sudeste, leste e nordeste. No Gráfico 12c observa-se que os maiores valores de Força de Desprendimento de Frutos Verde (FDFV) foi encontrada na região noroeste, sudoeste e oeste da área enquanto que os menores valores foram identificados na região sudeste, leste e nordeste. Os valores elevados de força de desprendimento representam maiores dificuldades de se retirar o fruto da planta.

Para que se realize a colheita mecanizada e seletiva, os cafeicultores

devem ser capazes de regular suas colhedoras para esta operação. Na colheita seletiva deseja-se colher apenas os frutos maduros, ou o máximo de frutos maduros com o mínimo de frutos verdes. Silva, F. et al. (2010a) citam que quanto maior a diferença entre a força de desprendimento dos frutos verdes e maduros, melhor será a colheita mecanizada seletiva dos frutos do cafeeiro. Dessa forma, os mapas de isocores da diferença entre a força de desprendimento podem ser utilizados pelos cafeicultores para regular suas colhedoras, além de permitirem a escolha do melhor momento e dos melhores locais para se iniciar a colheita mecanizada e seletiva do café.

A partir da análise do mapa da Diferença da Força de Desprendimento dos Frutos Verde e Maduro (DIFD) do cafeeiro (Gráfico 12e), o melhor local para iniciar a colheita pode ser a região central, leste e/ou sul, que apresentam uma grande diferença entre a força de desprendimento entre frutos verde e maduro, ou seja, maior valor de DIFD, que permitiram a manutenção dos frutos verdes na planta e a colheita dos frutos maduros.

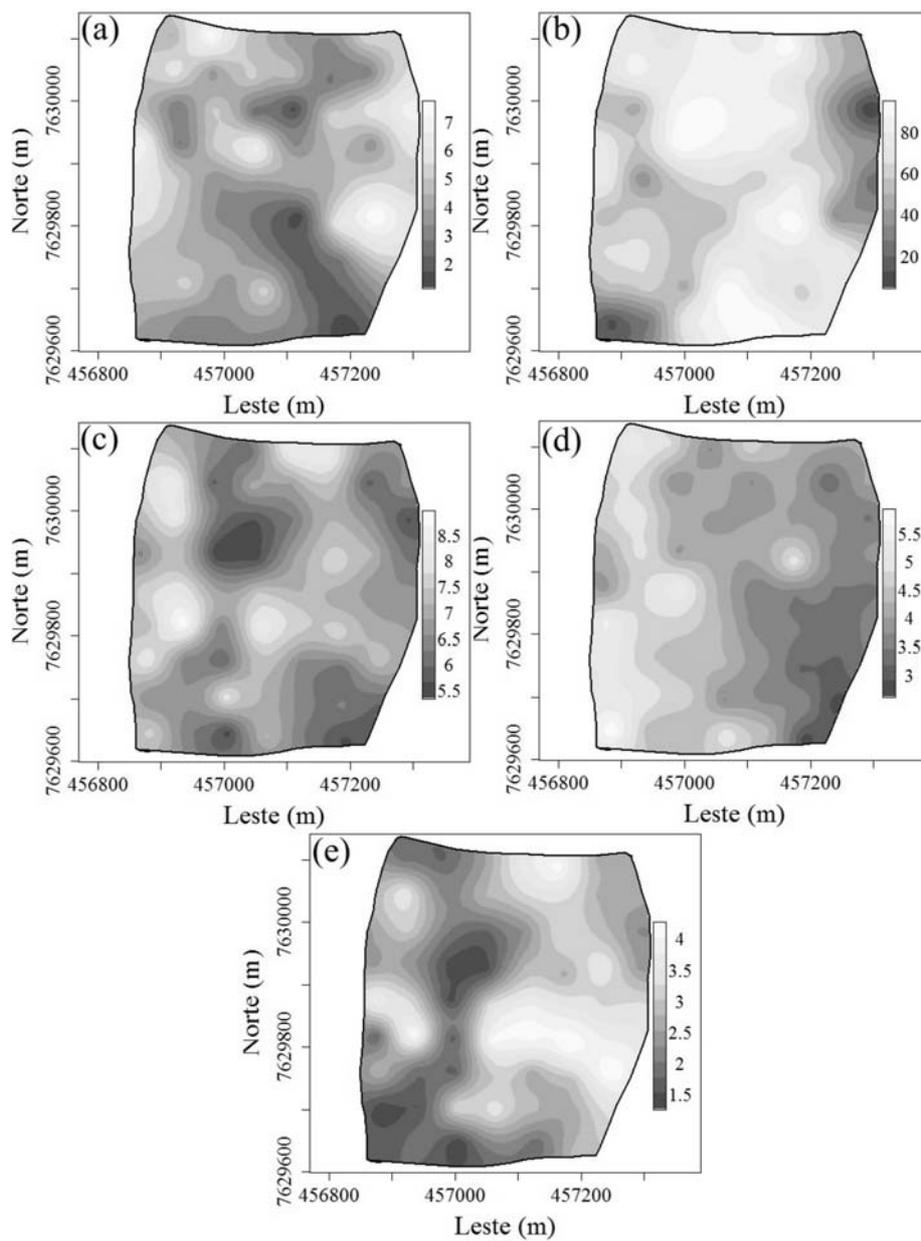


Gráfico 12 Distribuição espacial da PROD (L.planta<sup>-1</sup>) (a), IMAT (%) (b), FDFV (N) (c), FDFM (N) (d) e DIFD (N) (e).

A Altura de Planta e o Diâmetro de Copa são importantes características de crescimento da planta que indicam seu desenvolvimento. Estas características estão intimamente relacionadas ao manejo imposto à lavoura. Desta forma, a identificação da variabilidade espacial destes 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.

Os maiores valores de Altura de Planta (ALTU) puderam ser observados alguns pontos espalhados pela área na porção leste, sudeste e sudoeste (Gráfico 13a) e os menores valores identificados na borda oeste da área e na parte sul. Para o Diâmetro de Copa (DCOP, Gráfico 13b) os maiores valores foram identificados na porção norte, noroeste e oeste e os menores valores apresentados na região central e região leste.

Boldini (2001) desenvolveu uma escala de notas para classificar o enfolhamento de uma planta cafeeira: quando a planta apresentar de 0 a 20% de enfolhamento dá-se a nota um, de 21 a 40% nota dois, de 41 a 60% nota três, de 61 a 80% nota quatro e de 81 a 100% nota cinco. Ao se analisar o mapa de variabilidade espacial do enfolhamento (Gráfico 13c) observa-se que grande parte da área apresentou enfolhamento variando de 81 a 100%, ou seja, recebendo a nota cinco e o restante pode ser classificado na nota quatro. Desta maneira, pode-se perceber que esta área possui uma boa condição de enfolhamento.

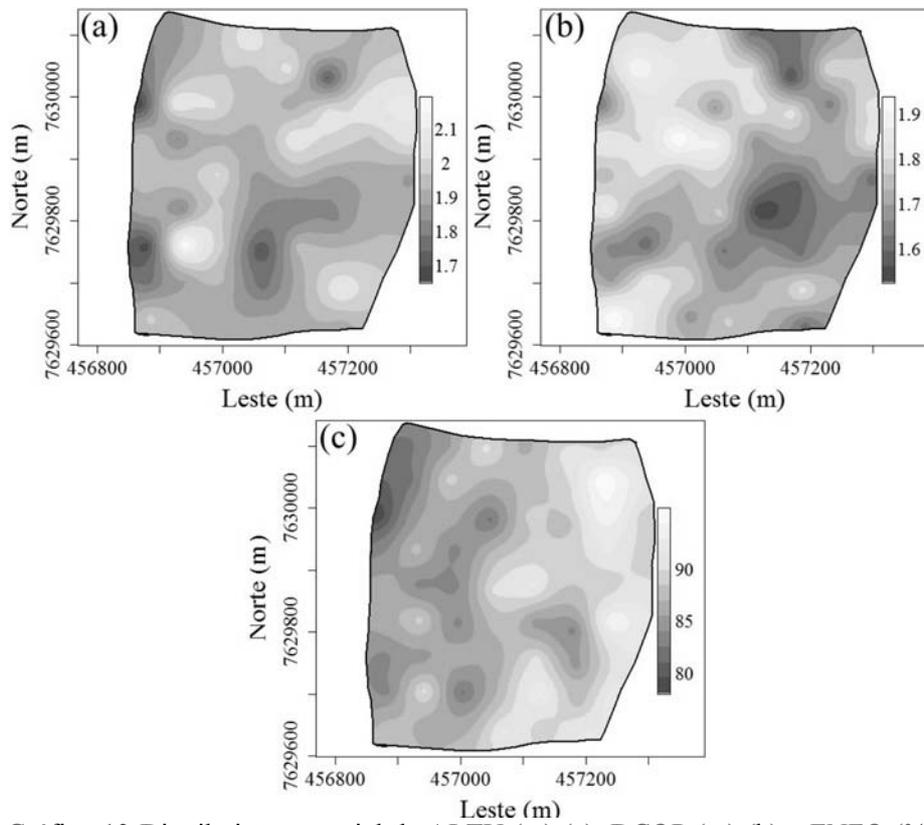


Gráfico 13 Distribuição espacial da ALTU (m) (a), DCOP (m) (b) e ENFO (%)

(c)

#### 4 CONCLUSÕES

Foi possível caracterizar a magnitude e a estrutura de dependência espacial dos atributos do solo, da recomendação de adubos e dos atributos da planta em lavoura cafeeira por meio de ajuste de semivariograma.

A análise dos mapas de isocores da distribuição espacial dos atributos do solo da lavoura cafeeira em estudo, obtidos por krigagem, possibilitou a visualização da variabilidade da distribuição espacial de todos os atributos em estudo.

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

Os resultados dos teores dos atributos do solo apresentados pelos dois sistemas de amostragem avaliados demonstram que se pode incorrer erros ao se aplicar fertilizantes ou corretivos com base nos teores médios dos atributos (amostragem convencional) em determinada gleba da lavoura. Esta informação foi ressaltada pelas diferenças existentes entre a dosagem recomendada para aplicação de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , obtidos pela amostragem convencional e para amostragem em malha quadrada para cafeicultura de precisão. Para o de  $P_2O_5$  a amostragem em malha recomendou uma dose 25,7% menor que a amostragem convencional e para o  $K_2O$  a amostragem em malha recomendou uma dose 11,6% maior que a amostragem convencional.

Pela observação dos mapas de distribuição espacial dos atributos da planta, constatou-se que estes mapas são de fundamental importância para a cafeicultura de precisão, uma vez que permitem o gerenciamento da colheita dos

frutos de cafeeiro por meio dos mapas de Produtividade, Índice de Maturação, Força de desprendimento de Frutos Verde, Força de Desprendimento de Frutos Maduros e a Diferença da Força de Desprendimento do Fruto Verde e Maduro, e também na identificação de distorções no desenvolvimento da planta pela observação dos mapas de Enfolhamento, Altura de Planta e Diâmetro de Copa.

Desta maneira, foi possível observar a importância da utilização da cafeicultura de precisão no manejo do solo e da planta visando à otimização das operações de campo de forma a garantir o bom desenvolvimento da cultura.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5<sup>a</sup> aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 12, p. 1-14, Dec. 2009a.
- \_\_\_\_\_. Neuro-fuzzy operational performance of a coffee harvester machine. **Journal of Convergence Information Technology**, Gyeongju, v. 4, n. 2, p. 52-59, 2009b.
- BACHMAIER, M.; BACKERS, M. Variogram or semivariogram?: understanding the variances in a variogram. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 9, p. 173-175, Feb. 2008.
- BASSO, B. et al. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. **European Journal of Agronomy**, London, v. 35, n. 4, p. 215-222, Nov. 2011.
- BOLDINI, J. M. **Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado**. 2001. 67 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, G. R. et al. Eficiência do Ethephon na uniformização e antecipação da maturação de frutos de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e na qualidade da bebida. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 1, p. 98-106, jan./fev. 2003.
- CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, nov./dez. 2004.

DONG, X.; VURAN, M. C.; IRMAK, S. **Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor network with center pivot irrigation systems**. Disponível em: <[http://watercenter.unl.edu/ResearchDB/publications/Wireless\\_Sensor\\_Center\\_Pivot\\_Integration.pdf](http://watercenter.unl.edu/ResearchDB/publications/Wireless_Sensor_Center_Pivot_Integration.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2012.

FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012c.

\_\_\_\_\_. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, Jan. 2012a.

\_\_\_\_\_. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 906-915, set./out. 2011.

\_\_\_\_\_. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012b.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

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

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5<sup>a</sup> aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 289-302.

MOLIN, J. P. et al. Teste procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.

MORALES, L. A.; VÁZQUEZ, E. V.; PAZ-FERREIRO, J. Spatial and temporal variability of Mehlich-1 extractable Fe, Mn and Zn over a rice field as a function of lime amendement. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, New York, v. 25, n. 8, p. 1039-1048, Dec. 2011.

OLIVEIRA, R. B. et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, jan./mar. 2008.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 mar. 2011.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.

SILVA, A. F. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes manejos. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 173-182, maio/ago. 2010.

SILVA, F. C. **Efeito da força de desprendimento e maturação dos frutos de cafeeiros na colheita mecanizada**. 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SILVA, F. C. et al. Comportamento da força de desprendimento dos frutos do cafeeiro ao longo do período da colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 468-474, mar./abr. 2010a.

SILVA, F. M. et al. Desempenho operacional e econômico da derriça do café com uso da derriçadora lateral. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 119-125, jul./dez. 2006.

\_\_\_\_\_. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010b.

\_\_\_\_\_. 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, jan./fev. 2008.

\_\_\_\_\_. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

YUAN, J. et al. Gaussian process based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 70, n. 1, p. 33-41, Jan. 2010.