



LUIS CARLOS CIRILO CARVALHO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS
AGRONÔMICAS DA CULTURA DO CAFÉ**

LAVRAS - MG

2012

LUIS CARLOS CIRILO CARVALHO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E
CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DA CULTURA DO CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Fábio Moreira da Silva

Lavras-MG

2012

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

Carvalho, Luis Carlos Cirilo.

Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café / Luis Carlos Cirilo Carvalho. – Lavras : UFLA, 2012.

59 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Fábio Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Geoestatística. 3. Física do solo. 4. Café. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.43

LUIS CARLOS CIRILO CARVALHO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E
CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DA CULTURA DO CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de Fevereiro de 2012

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato - UFLA

Prof. Dr. Luciano Baião Vieira - UFV

Dr. Fábio Moreira da Silva

Orientador

Lavras-MG

2012

*Deus, por absolutamente tudo,
meus pais, Alberto e Elaine, por todo amor,
meus avós, Geraldo e Amélia, pelos bons momentos, parceria e apoio,
minha namorada e melhor amiga, Juliana, pela compreensão e incentivo,
DEDICO*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras - UFLA e ao Departamento de Engenharia Agrícola - DEG, pela realização do curso de pós-graduação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, por conceder a bolsa de estudos.

Ao prof. Dr. Fábio Moreira da Silva, pela orientação e apoio para a realização deste trabalho.

Aos professores do DEG, pelo conhecimento transmitido ao longo do curso.

Ao proprietário da fazenda Brejão, Eric Miranda Abreu, por ceder a área experimental e permitir a realização do trabalho em sua propriedade.

Ao doutorando Gabriel Araújo e Silva Ferraz, pelas contribuições dadas e ajuda.

Aos colegas, Flávio Castro Silva, Juliana Stracieri, Róberson Machado Pimentel e David Cardoso Dourado, pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos funcionários do DEG, em especial à secretária da pós-graduação em Engenharia Agrícola, Greice da Costa Oliveira.

RESUMO

A agricultura de precisão difere da convencional por unir relações espaciais à variabilidade existente no campo, tornando-se uma importante ferramenta de gestão do sistema agrícola. Desta forma, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de, por meio de técnicas geoestatísticas e princípios da agricultura de precisão, identificar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo indicadores de compactação e de características agronômicas da cultura do café (*Coffea arabica* L.), bem como a relação existente entre as variáveis de solo com as de café. O trabalho foi realizado na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, MG. Em uma malha irregular de 24 pontos, foram coletados dados de densidade do solo, resistência mecânica do solo à penetração e teor de argila, em diferentes profundidades, bem como a altura e produtividade das plantas de café. De modo geral, as variáveis apresentaram dependência espacial moderada ou forte. Por meio dos mapas confeccionados, nota-se a variação de valores que as variáveis podem apresentar ao longo da área. Observando os mapas de solo com os de mapas da cultura do café, de modo geral, percebe-se que a produtividade e a altura são maiores em regiões em que há maiores valores de densidade do solo e menor teor de argila e resistência mecânica do solo à penetração, para todas as camadas de solo avaliadas.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Geoestatística. Física do solo. Café.

ABSTRACT

Precision agriculture differs from the conventional unite by spatial relationships the variability in the field, becoming an important tool managemen of the agricultural systems. Thus, this study aimed, by means of geostatistical techniques ans principles of precision agriculture, identify the spatial variability of physical attributes of soil compaction indicators and agronomic characteristics of soil with those of coffee. The study was conducted at Brejão farm, located in Três Pontas, MG. In a irregular grid of 24 points, data were collected for bulk density, soil mechanical resistance to penetration e clay content, at different depths, and also the size and yield of coffee plants. In general, the variables showed moderate to strong spatial dependence. Through the maps made, there is a range of values that variables can have throughout the area. Observing the maps of soil's variables with of coffee's variables, it was noticed that the size and yield are higher in regions where there are higher values of bulk density and lower of clay content and soil mechanical resistance to penetration, for all evaluated soil layers.

Keywords: Precision Agriculture. Geostatistics. Soil Physics. Coffee.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	CAFEICULTURA E SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA	11
2.2	INDICADORES DE COMPACTAÇÃO DO SOLO	13
2.3	AGRICULTURA DE PRECISÃO	16
2.4	GEOESTATÍSTICA	18
2.4.1	Semivariograma	19
2.4.1.1	Modelos de ajuste do semivariograma	20
2.4.2	Validação cruzada e krigagem	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	Caracterização da área experimental e época de coleta dos dados	22
3.2	Metodologia para coleta dos dados	23
3.2.1	Atributos físicos do solo	23
3.2.1.1	Densidade do solo (Ds)	23
3.2.1.2	Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP)	24
3.2.1.3	Teor de argila	25
3.2.2	Características agronômicas	25
3.2.2.1	Altura de plantas	26
3.2.2.2	Produtividade	26
3.3	Análises estatísticas	27
3.3.1	Estatística descritiva	27
3.3.2	Geoestatística	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade econômica de grande importância para o Brasil, sobretudo para o estado de Minas Gerais, responsável por ser o principal estado produtor. A cultura do café exige operações mecanizadas desde a implantação até a colheita, contando ainda com a utilização de insumos agrícolas e práticas culturais, que tornam a atividade onerosa. Dessa forma, cafeicultores buscam adotar novas técnicas de manejo a fim de aumentar o retorno econômico.

A produção da cultura do café é influenciada por uma série de fatores, dentre eles a compactação do solo ocasionada pelo tráfego de equipamentos agrícolas na lavoura. A compactação do solo afeta o desenvolvimento radicular das plantas e afeta os processos de infiltração de água e trocas gasosas, além de alterar as propriedades físicas do solo, de modo temporário ou permanente.

Com a finalidade de reduzir os custos de produção e aumentar o retorno financeiro, são adotados novos métodos de manejo, dentre eles a agricultura de precisão (AP), que une relações espaciais a uma variável do sistema produtivo, tornando a atividade mais competitiva, aumentando sua eficiência e com menor impacto ambiental. Por meio do uso desta técnica, é possível ter um melhor conhecimento da área cultivada e, desse modo, estabelecer uma estratégia de manejo adequada considerando as informações obtidas.

A geoestatística é a ferramenta utilizada na agricultura de precisão para analisar os fatores envolvidos nos sistemas produtivos. Ela difere da estatística clássica por considerar que os dados amostrados são dependentes espacialmente. Por meio dela, é possível identificar se há ou não dependência espacial para os fatores analisados, possibilitando a criação de mapas temáticos que auxiliam na tomada de decisões na lavoura.

Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar, por meio da estatística clássica, geoestatística e de princípios de agricultura de precisão, alguns atributos físicos do solo indicativos de compactação, como a densidade do solo, resistência mecânica à penetração e teor de argila, além de algumas características agronômicas da planta de café, como a altura e a produtividade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CAFEICULTURA E SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

O Brasil é o maior produtor e exportador de café e o segundo maior consumidor do produto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ - ABIC, 2009), detendo cerca de 30% da produção mundial. A atividade cafeeira se destaca por ser responsável por um dos mais importantes complexos agroindustriais do país, formado por diversos agentes, como fornecedores de insumos, máquinas e equipamentos, produtores primários, cooperativas, empresas de processamentos, exportadores, empacotadores, assistência técnica, compradores internacionais e consumidores interno e externo (FARINA; SAES, 1999 citados por LANNA, 2010).

De acordo com o levantamento de dados pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2011), a produção brasileira de grãos de café (arábica e conilon), para o ano de 2011, foi estimada em 43,48 milhões de sacas beneficiadas, cerca de 9,6% inferior à do ano anterior. A produção do café arábica no país representa 74,0% (32,19 milhões de sacas) da produção total (arábica e conilon) do país e tem como principal estado produtor Minas Gerais, com 68,0% da produção nacional (21,88 milhões de sacas) de café beneficiado.

Ainda segundo o levantamento, a produção de café arábica do estado de Minas Gerais é dividida de acordo com as regiões: (a) Zona da Mata, com 7,43 milhões de sacas beneficiadas (34,0% da produção estadual); (b) Cerrado, com 4,00 milhões de sacas beneficiadas (18,3% da produção estadual); e (c) Sul e Centro-Oeste, com 10,44 milhões de sacas beneficiadas (47,7% da produção estadual). Conforme observado, a região do Sul de Minas é a que possui maior participação na produção do Estado.

Evangelista, Carvalho e Sediayama (2002) demonstraram, por meio do uso de um sistema de informações geográficas, o zoneamento climático

associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. Para tanto, foram considerados intervalos de temperatura e de deficiência hídrica das regiões avaliadas bem como o seu potencial produtivo. O Estado foi dividido em três zonas: (a) apta, quando a região apresenta condições térmicas e hídricas favoráveis à exploração da cafeicultura; (b) restrita, quando a região apresenta sob o ponto de vista climático, restrições térmicas ou hídricas. Nesta zona, a cultura pode ser implantada desde que haja o controle dos fatores de restrição; e (c) inaptas, quando as características do clima não são apropriadas para exploração comercial da cultura, em razão das limitações graves dos fatores térmicos e hídricos.

Os resultados encontrados descrevem como zona apta o Sul e o Centro-Oeste, como zona restrita o Centro-Norte do Estado, o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba, e como zona restrita o Norte e o Nordeste do Estado. Observa-se que as zonas consideradas aptas, restritas e inaptas condizem, respectivamente, com as regiões de maior, intermediária e menor produção de grãos de café, de acordo com o levantamento da CONAB citado anteriormente.

A cultura do café tem seu crescimento, desenvolvimento e produção influenciados pelos fatores: clima (CAMARGO; CAMARGO, 2001; CARVALHO et al., 2004); fertilidade do solo (CORRÊA et al., 2001); escolha das cultivares (NEVES et al., 2006); doenças (SANTOS et al., 2008); pragas (FERREIRA et al., 2003); podas (CUNHA et al., 1999), adensamento (PEREIRA et al., 2011); adoção e época de irrigação (GOMES; LIMA; CUSTÓDIO, 2007; SILVA; TEODORO; MELO, 2008), altitude (SEDIYAMA et al., 2001), declividade (ZAMBOLIM, 2002); compactação do solo (PAIS et al., 2011); entre outros.

Como visto, são muitos os fatores a serem considerados para tornar a atividade cafeeira economicamente rentável.

2.2 INDICADORES DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

O solo é submetido a pressões ocasionadas pelo uso e manejo de máquinas e implementos agrícolas, pisoteio animal, forças impostas pelo crescimento das raízes das plantas, peso das camadas de solo e processo de umedecimento e secagem. Dessas, as que impõem maiores alterações ao solo são as pressões causadas pelas máquinas (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000).

Lima (2004) destaca que práticas de manejo do solo e das culturas ocasionam mudanças nos atributos físicos do solo, sendo estas mudanças permanentes ou temporárias. Por isso, o conhecimento da qualidade física de um solo é fundamental para tomada de decisões quanto às práticas de manejo a serem adotadas.

De acordo com Silva, Tormena e Imhoff (2002), os atributos físicos do solo relacionados com a produtividade e desenvolvimento das culturas podem ser divididos em duas categorias: aqueles diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas, como temperatura, água, oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes; e os indiretamente relacionados, tais como a porosidade, agregação, textura e a densidade do solo.

Diversos estudos têm sido conduzidos, para incrementar o conhecimento da relação entre propriedades físicas do solo, sobretudo àquelas ligadas à compactação do solo, com a produtividade das culturas

Entende-se por camada de solo compactada, a faixa de seu perfil que, devido a ação antrópica, em sua extensão superficial ou subsuperficial, apresenta, em virtude de uma carga de compressão mecânica, um valor de densidade maior que em seu estado natural, gerando uma diminuição em seu volume, causando um rearranjo do solo reduzindo a porosidade (CARVALHO FILHO; SILVA; FERNANDES 2004).

Camargo e Alleoni (1997) citam que, dentre as limitações que um solo pode impor à planta, a compactação toma muitas vezes sérias dimensões, pois, ao causar restrição ao desenvolvimento radicular, afeta direta e indiretamente o crescimento e a produção das plantas.

Com a modernização da agricultura, o peso de máquinas e implementos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, resultando em significativas alterações nas suas propriedades físicas (FREDDI et al., 2007). Esses tipos de alterações, bem como a compactação do mesmo, são identificados como os principais processos causadores de degradação da estrutura física do solo de terras agrícolas, prejudicando conseqüentemente a obtenção de maior produtividade.

A compactação do solo é considerada medida indireta, podendo ser índice qualitativo que se relaciona com a densidade do solo.

Existem diversas formas de se avaliar a compactação do solo. A maioria dos métodos envolve análises de laboratório, com coleta de solo para análise. Diversos parâmetros da física do solo podem ser usados como indicativos para a compactação, como a densidade, textura, porosidade e outros. Existem também equipamentos que permitem avaliar a compactação em campo, denominados penetrômetros. Estes equipamentos medem a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) de uma haste metálica, que simula a penetração de raízes ou ferramentas agrícolas. A RMSP deve ser medida quando o solo se encontra próximo à capacidade de campo (FURLANI et al., 2003). No entanto, Klein, Libardi e Silva (1998) consideraram que, quando a análise de RMSP é feita próxima à capacidade de campo, seu valor é mascarado pela umidade.

Também existem versões eletrônicas de penetrômetros que permitem a armazenagem de dados como o utilizado neste trabalho.

As diferenças entre os penetrômetros e o sistema radicular dificultam o estabelecimento de boa correlação entre a pressão exercida pelas raízes e a

RMSP medida no mesmo local com o penetrômetro. Segundo Bengough e Mullins (1990), numa mesma condição de solo, a RMSP avaliada pelo penetrômetro pode resultar em valores de dois a até oito vezes mais elevados que as pressões exercidas pelas raízes.

Canarache (1990) afirma que, apesar de a RMSP ser afetada pela textura, pela densidade do solo e pelo teor de água, valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes da maioria das plantas.

Segundo Torres e Saraiva (1999), as diferenças entre a pressão das raízes e a resistência ao penetrômetro é menor nos solos arenosos e menos coesivos e maiores nos solos argilosos de alta coesão. Sene et al. (1985) consideram críticos os valores de RMSP que variam de 6,0 a 7,0 MPa, para solos arenosos e, em torno de 2,5 MPa, para solos argilosos.

Segundo Assis et al. (2009), a granulometria do solo mostra-se significativamente influente nos resultados da RMSP, sendo que os solos mais argilosos apresentam valores mais elevados para esse índice do que os mais arenosos.

De acordo com Daniel e Maretti (1990), a determinação da densidade do solo para avaliação de camadas de solo compactado, deverá seguir o Método de UHLAND, utilizando-se para tal amostrador de impacto com anéis volumétricos, coletando-se amostras de solo indeformadas.

Conforme afirmado por Ferreira e Dias Júnior (2001), muitas pesquisas já foram realizadas com intuito de demonstrar o efeito da compactação nos atributos físicos do solo. Os autores destacam que a compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica do solo à penetração e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros. Richart et al. (2005) ainda destacam a textura do solo no processo de compactação do solo, uma vez que a composição mineralógica da fração argila e o seu teor no solo atuam de forma a

transmitir a pressão recebida para camadas mais profundas, acentuando a compactação do solo.

2.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura é uma atividade muito dinâmica, pois depende de fatores que mudam constantemente no espaço e no tempo. Os fatores inerentes ao solo, ao clima e à planta podem influenciar, isoladamente ou em conjunto, o seu desenvolvimento. Alia-se a isto a ação antrópica que, direta ou indiretamente, afeta o desenvolvimento das culturas de uma maneira positiva ou negativa. Para que se alcance o máximo de rendimento, de acordo com a potencialidade do solo e com o mínimo de poluição e degradação, é necessário o acompanhamento e gerenciamento de um volume muito grande de informações que variam no espaço e no tempo (ROCHA; LAMPARELLI, 1998).

Objetiva-se, na agricultura moderna, aumentar a eficiência dos sistemas produtivos, reduzindo custos e o impacto ambiental causado pela atividade agrícola. Dessa maneira, empresas, institutos de pesquisas e de ensino e, até mesmo produtores, buscam adotar ou adequar técnicas de manejo que propiciem este aumento na eficiência do sistema produtivo, por meio de um maior controle sobre as variáveis envolvidas. Para isso, tem-se adotado a agricultura de precisão (AP), que caracteriza a variabilidade existente no campo de forma precisa e une relações espaço – temporais a elas, proporcionando maior conhecimento sobre o sistema produtivo e, também, a possibilidade de desenvolver estratégias de manejo a serem adotadas.

Para Queiroz, Dias e Mantovani (1998), a AP constitui uma ferramenta de grande potencialidade, que proporcionará ao agricultor o mapeamento do solo, da aplicação de insumos e das atividades de colheita, considerando a área de modo diferenciado, a fim de racionalizar o uso de insumos e o consumo de energia. Ainda segundo os autores, o objetivo da AP consiste em manusear

pequenas áreas, dentro do campo de produção, visando reduzir o uso de produtos químicos e aumentar a produtividade.

Marques Júnior e Corá (1998) afirmam que, para implantação da AP, é preciso conhecer detalhadamente as causas e a variabilidade espacial dos fatores que controlam o sistema solo - planta - atmosfera e que, por consequência, controlam a produção das culturas. Dessa maneira, é possível entender como a variabilidade destes fatores se relaciona com a variabilidade espacial da produção agrícola.

Alves e Silva (2008) dividem a AP em três etapas: (a) componente de localização – responsável por identificar a variabilidade espacial das variáveis envolvidas no sistema de produção por meio de equipamentos como sistema de posicionamento global (GPS, em inglês), fotografias aéreas, sensores e equipamentos eletrônicos; (b) componente de análise – responsável por processar e analisar os dados provenientes da etapa de localização, utilizando para isso Sistema de Informações Geográficas (SIG), análise geoestatística, modelagem matemática e softwares inteligentes de apoio à decisão. É nesta etapa que são feitos os mapas temáticos das variáveis envolvidas no sistema produtivo; (c) componente de manejo – responsável pelo manejo localizado da variável por interação entre a tecnologia de correção em taxa variável, mapas de correção, sistema de posicionamento e tecnologias de comunicação e armazenamento de dados. A própria prática do manejo pode ser mapeada para posterior avaliação.

Cafeicultura de precisão é o nome dado ao conjunto de técnicas de agricultura de precisão utilizadas na cultura do cafeeiro. Pouco tem sido relatado do uso de agricultura de precisão em café, em comparação a outras culturas, como as de cereais (SILVA et al., 2007).

2.4 GEOESTATÍSTICA

Os principais fundamentos da geoestatística surgiram na África do Sul em 1951, quando o engenheiro de minas Daniel Krige, por meio de observações das minas de ouro do Rand, percebeu a necessidade de considerar a distância entre as amostras coletadas a fim de dar sentido às variâncias encontradas. Os estudos iniciais de geoestatística transformaram-na em um instrumento de avaliação de jazidas minerais (ANDRIOTTI, 2003; VIEIRA, 2000).

Em 1963, o francês George Matheron combinou estes princípios de geoestatística com fundamentos da estatística convencional, criando a teoria das variáveis regionalizadas. Matheron define variável regionalizada como sendo uma função espacial numérica, que varia de um local para o outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples (VIEIRA, 2000). Dessa forma, em geoestatística é considerado que a diferença entre valores de um atributo em dois pontos de coleta mais próximos é menor do que a diferença entre os valores tomados em dois pontos mais distantes. Ainda é considerado que a relação espacial influencia a manifestação de uma variável.

O uso da geoestatística em AP resume-se a identificar a variabilidade espacial dos fatores que controlam o sistema solo - planta - atmosfera, considerando que estes variam no espaço e no tempo em diferentes escalas.

Para Andriotti (2003), as técnicas geoestatísticas são usadas para descrever e modelizar padrões espaciais (variografia), para prever valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar malhas de amostragem. A geoestatística é baseada em dois conceitos: o semivariograma e a krigagem

2.4.1 Semivariograma

O semivariograma é, em termos matemáticos, a esperança matemática do quadrado dos acréscimos da variável regionalizada em estudo em uma determinada direção ou o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos presentes na área estudada, tomados a uma distância h uns dos outros. Indica quão díspares se tornam os valores da variável quando a distância de medida entre as amostras aumenta (ANDRIOTTI, 2003).

O semivariograma descreve o grau de dependência entre amostras em função da direção e da distância de separação da coleta dessas amostras, além de estabelecer os parâmetros exigidos para a estimativa da variável nos locais em que não foi feita amostragem, por meio do uso da krigagem.

O semivariograma clássico (VIEIRA et al., 1983) é estimado da seguinte forma:

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

em que $N(h)$ o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h .

Observa-se, conforme visto acima, que o valor de $\hat{\gamma}(h)$ é igual a zero quando h zero. Entretanto, à medida que o valor tende a zero, $\hat{\gamma}(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita e recebe o símbolo de C_0 . O valor de C_0 revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras e, também, pode representar possíveis erros de medição.

Com o aumento de h , espera-se que o valor de $\hat{\gamma}(h)$ aumente, uma vez que medições localizadas mais distantes tenham valores mais discrepantes. Entretanto, $\hat{\gamma}(h)$ aumenta até atingir um valor máximo, no qual se estabiliza,

chamado de patamar (C_0+C_1). A distância em que $\hat{\gamma}(h)$ se estabiliza é chamada de alcance e representa a distância limite em que há dependência espacial. Para distâncias maiores que o alcance, a variação existente entre duas amostras não é mais função da distância que as separa, podendo ser aplicada a estatística clássica.

Quando o semivariograma apresenta $\hat{\gamma}(h)$ igual ao patamar para qualquer valor de h , há um efeito pepita puro e considera-se que há ausência total de dependência espacial. A Contribuição (C_1) representa a diferença entre o efeito pepita e o patamar.

2.4.1.1 Modelos de ajuste do semivariograma

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambiguidade e polêmicas nessas aplicações. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (VIEIRA, 2000).

Nos trabalhos de geoestatística, os principais modelos utilizados são o esférico o exponencial e o gaussiano (VIEIRA, 2000).

2.4.2 Validação cruzada e krigagem

A validação cruzada é utilizada para Isaaks e Srivastava (1989) comparar os valores amostrados com os valores preditos, avaliando os erros da estimativa realizada. O valor referente a um dado ponto é retirado, temporariamente, e é feita a interpolação do seu valor utilizando os valores dos demais pontos. Dessa forma, obtém-se alguns dados para a escolha do melhor modelo, como: erro médio; erro médio reduzido, desvio padrão dos erros médios; e desvio padrão dos erros médios reduzidos. O melhor modelo será o

que apresentar: erro médio e erro médio reduzido mais próximos de zero; desvio padrão dos erros médios menor possível; e desvio padrão dos erros médios reduzidos mais próximo de um (CRESSIE, 1993).

A krigagem é o método de interpolação usado para prever valores para locais em que a amostragem não foi realizada, utilizando a dependência espacial caracterizada pelo semivariograma entre amostras coletadas próximas. É considerada como um interpolador excelente, por obedecer a duas condições: possuir variância mínima e não tendencioso. A condição de variância mínima indica que as diferenças que ocorrem ponto a ponto entre o valor predito e o observado é mínima. Quanto à condição de não possuir tendência, indica que a diferença do valor predito e do valor observado em um ponto é nula (ANDRIOTTI, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental e época de coleta dos dados

O experimento foi realizado na fazenda Brejão, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico - LVd de textura argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2006), localizada no município de Três Pontas - Sul do Estado de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas médias 21°26'08 " de latitude Sul e 45°24'53" de longitude oeste de Greenwich. A área experimental possui 10,52 ha cultivados com café (*Coffea arabica* L.) cultivar Mundo Novo 376/4, sendo a lavoura implantada em 2005 no espaçamento 3,8 metros entre linhas e 0,8 metros entre plantas. Por meio do uso de um GPS geodésico foram obtidos os pontos limites da área experimental.

A coleta dos dados foi feita em uma malha irregular de 24 pontos, demarcados pelo uso de um GPS de navegação. O número de pontos de coleta foi escolhido, considerando que a malha utilizada possa ser usada de forma comercial, economicamente viável, haja vista que se trata de uma área de menor tamanho. A maior distância entre dois pontos é igual a 377,5 metros e a menor distância igual a 39,7 metros.

A coleta dos dados foi realizada em 2010, sendo os dados das características agronômicas coletados em junho, época de colheita da cultura, e os dados dos atributos do solo coletados em dezembro, época mais recomendada em virtude da facilidade para retirar as amostras do solo.

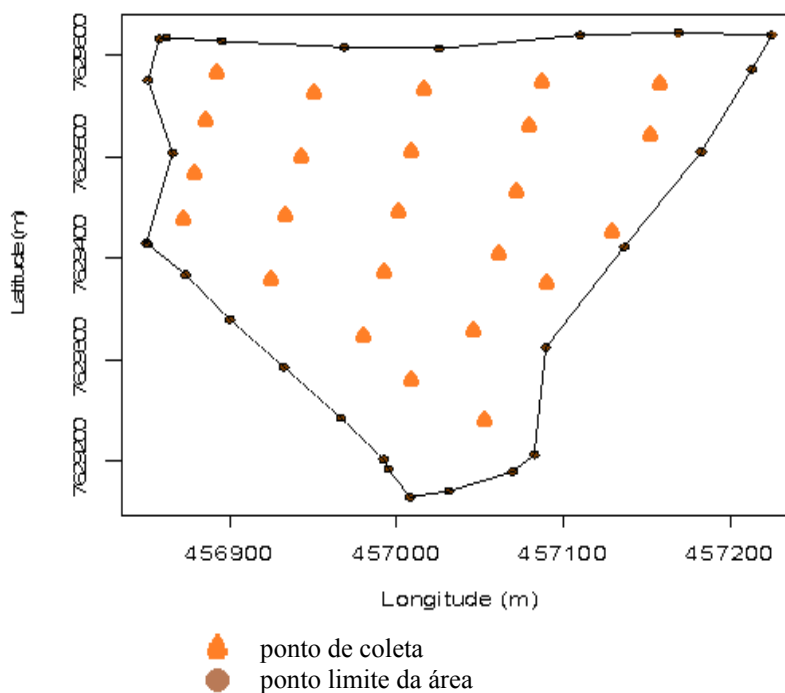


Figura 1 Croqui da área experimental, com os pontos de amostragem demarcados

3.2 Metodologia para coleta dos dados

3.2.1 Atributos físicos do solo

Para todos os atributos, a metodologia de coleta dos dados foi a mesma. As amostras foram tomadas na metade da distância da planta de café que corresponde ao ponto demarcado e a planta ao lado, na linha do transplantio.

3.2.1.1 Densidade do solo (Ds)

A determinação de Ds foi feita, por meio do método do anel volumétrico, de volume igual a $84,53 \text{ cm}^3$, com auxílio de um amostrador de

Uhland (DANIEL; MARETTI, 1990). Foram coletadas amostras indeformadas, a cada intervalo de 10 centímetros de profundidade, da superfície até a profundidade de 60 centímetros. As amostras foram posteriormente levadas à estufa, por 24 horas, na temperatura de 105° Celsius, até obterem massa constante, permitindo obtenção de todas as informações para calcular a Ds das amostras, como segue:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t}$$

Ds - densidade do solo (g/cm³); Ms - massa de solo seco em estufa (g); Vt - volume do cilindro (cm³).

3.2.1.2 Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP)

A coleta dos dados da RMSP também foi feita a cada intervalo de 10 centímetros de profundidade, da superfície do solo até a profundidade de 60 centímetros. Para isso, foi utilizado o penetrômetro eletrônico PenetroLOG, marca Falker, segundo a norma ASAE S.313.3 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE, 1999). O aparelho registra, a cada camada de solo de cinco milímetros, a pressão necessária, em KPa, para seu rompimento. O aparelho foi programado para operar até a profundidade de 60 centímetros, sendo os dados posteriormente enviados para o computador e, de forma manual, transformados em média a cada camada de 10 centímetros. Por fim, foi feita a conversão dos dados para a unidade de MPa.

A RMSP, entre outros fatores, é dependente da umidade do solo, conforme citam Camargo e Alleoni (1997) e Carvalho Filho, Silva e Fernandes (2004). Para complementar a avaliação da RMSP, foi também coletada a umidade gravimétrica (UG) do ponto, uma vez que esta influencia a expressão

da RMSP. Para tanto, foi utilizado o valor médio de UG das seis camadas avaliadas, uma vez que não apresentou grandes variações ao longo do perfil. A umidade gravimétrica foi obtida como segue:

$$UG = \frac{Ma}{Ms} \times 100$$

UG - umidade gravimétrica (%); Ma - massa de água; Ms - massa de solo seco.

3.2.1.3 Teor de argila (Arg)

As amostras foram coletadas nas camadas de solo de 0 a 20 centímetros e de 20 a 40 centímetros. Posteriormente, as amostras foram enviadas ao Laboratório de Análises de Solo da Universidade Federal de Lavras, para determinação do teor de argila, utilizando o método de Bouyoucos (1927).

3.2.2 Características agronômicas do café

Foram avaliadas as seguintes características agronômicas: produtividade e altura. Os dados foram obtidos com a média observada de avaliações de quatro plantas, sendo o valor encontrado como o referente ao ponto demarcado. Para a determinação do valor médio, foi usada a planta referente ao ponto, uma planta ao lado na mesma linha, uma planta na linha abaixo e outra acima à planta do ponto demarcado (Figura 2).

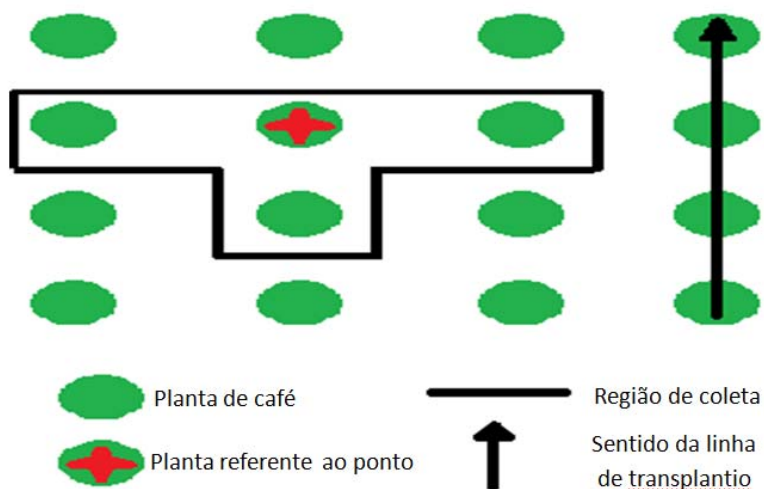


Figura 2 Esquema de coleta dos dados das características agrônômicas da cultura do café

3.2.2.1 Altura das plantas

Com auxílio de uma trena graduada em milímetros, foi medida a altura das plantas de café, da superfície do solo, com resultados expressos em metros.

3.2.2.2 Produtividade

A produtividade foi obtida por meio de derrça manual dos grãos de café no pano, sendo posteriormente feita a abanação para retirada de galhos e folhas. Os grãos foram, então, colocados no interior de um recipiente graduado, em mililitros, para determinação do volume colhido (L/planta).

3.3 Análises estatísticas

3.3.1 Estatística descritiva

Inicialmente, foi feita uma análise de correlação linear de Pearson entre as características agronômicas do café com os atributos do solo, a fim de identificar o grau e a direção (positiva ou negativa) da correlação entre duas variáveis distintas.

Posteriormente, todas as variáveis foram analisadas por meio da estatística descritiva, determinando-se: valor mínimo; valor máximo; média; mediana; variância; desvio padrão; coeficiente de variação; coeficiente de assimetria; coeficiente de curtose; e teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

3.3.2 Geoestatística

A dependência espacial das variáveis foi analisada por meio do ajuste dos semivariogramas, pelo estimador clássico (VIEIRA et al., 1983), como segue:

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

em que $N(h)$ o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h .

O ajuste dos semivariogramas escolhido foi em função da Máxima Verossimilhança Restrita (REML - restricted maximum likelihood, em inglês), uma vez que é a mais recomendada para uma pequena amostragem (KERRY; OLIVER, 2007; PARDO-IGÚZQUIZA, 1998; WEBSTER; OLIVER, 2007). O

modelo do semivariograma ajustado foi o esférico, uma vez que este é o mais utilizado em estudos da área de geoestatística ligada ao solo e à cultura do café (GREGO; VIEIRA, 2005; SILVA et al., 2007).

Foi calculado o erro médio - EM (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989) para todos os semivariogramas, a fim de verificar se os ajustes para o modelo esférico atenderam às exigências da validação cruzada. Para tanto, o EM deve apresentar o valor mais próximo possível de zero.

Quando identificada a variabilidade espacial da variável, após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada a interpolação dos dados por meio de krigagem ordinária. Dessa forma, é feita uma estimativa da variável em locais onde a mesma não foi amostrada, permitindo visualizar sua distribuição no espaço na forma de mapas temáticos. Os mapas criados foram gerados em coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) na zona 23K, que é onde se localiza a área experimental.

Para completar a análise geoestatística, foi analisado, também, o grau de dependência espacial (GDE) das variáveis, seguindo classificação proposta por Cambardella et al. (1994). Essa classificação sugere que há forte dependência espacial quando os semivariogramas apresentam um efeito pepita igual ou inferior a 25% do patamar, moderada dependência espacial quando está entre 25% e 75%, e fraca, quando for maior que 75%.

Para a análise geoestatística e para a criação dos mapas temáticos foi utilizado o software estatístico R, de distribuição livre, por meio do pacote geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise de correlação de Pearson (tabela 1), observou-se correlação linear negativa significativa ($p \leq 0,01$) entre a altura de plantas e a resistência mecânica do solo à penetração 10-20 e 20-30 centímetros e, também, entre a produtividade e ambas as camadas de solo para a variável teor de argila.

Tabela 1 Matriz de correlação linear entre as observações de altura de plantas e produtividade da cultura do café com alguns atributos físicos do solo

	Altura	Produtividade
Ds 0-10 cm	0,1815 ns	0,3839 ns
Ds 10-20 cm	-0,1814 ns	0,1022 ns
Ds 20-30 cm	0,1044 ns	0,2699 ns
Ds 30-40 cm	0,2402 ns	0,3213 ns
Ds 40-50 cm	0,2780 ns	0,4656 ns
Ds 50-60 cm	0,3019 ns	0,3916 ns
RMSP 0-10 cm	-0,1330 ns	-0,0150 ns
RMSP 10-20 cm	-0,5501 **	-0,0399 ns
RMSP 20-30 cm	-0,5245 **	-0,1189 ns
RMSP 30-40 cm	-0,2743 ns	0,0029 ns
RMSP 40-50 cm	0,0697 ns	-0,3510 ns
RMSP 50-60 cm	-0,2129 ns	-0,1563 ns
Arg 0-20 cm	-0,0339 ns	-0,5515 **
Arg 20-40 cm	-0,0038 ns	-0,5252 **
Altura	1	0,1552 ns

Ds - Densidade do solo; RMSP - Resistência mecânica do solo à penetração, Arg - Teor de argila; ** - significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); ns - não significativo ($p \geq 0,01$)

A correlação negativa indica que enquanto o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui. A maior concentração de raízes de café está na camada superficial do solo (SOARES et al., 2007), o que pode justificar a correlação encontrada entre a altura e a resistência mecânica do solo à penetração. Ao contrário do que foi observado no presente estudo, Durigon et al. (2009) observaram correlação positiva entre o teor de argila e a produtividade da cultura do arroz, justificando que maior teor de argila está relacionado à melhor capacidade de adsorção de nutrientes minerais pelo solo.

A análise descritiva dos atributos físicos do solo e das características agronômicas da cultura do café está apresentada na tabela 2.

Em relação ao teste Kolmogorov-Smirnov, observa-se normalidade para todas as variáveis avaliadas, exceto para a densidade do solo a 40-50 cm, resistência mecânica do solo à penetração a 0-10 cm e 20-30 cm. Os valores de média e mediana encontrados possuem pequena diferença, mostrando distribuições simétricas, que pode ser confirmado pelos valores do coeficiente de assimetria próximos de zero, exceto para a resistência mecânica do solo à penetração nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm, e 20-30 cm. Conforme descrito por Isaaks e Srivastava (1989), o coeficiente de assimetria é muito influenciável por valores extremos, em relação à mediana, média e ao desvio padrão.

Para Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação (CV), que pode ser: baixa, quando inferior a 10%; moderada, quando entre 10 e 20%; alta quando entre 20 e 30%; e muita alta quando acima de 30%. Dessa forma, variáveis que apresentam CV inferior a 10% são consideradas homogêneas. Frogbrook et al. (2002) afirmam que valores elevados de CV são considerados como os primeiros indicadores de existência de heterogeneidade dos dados.

O menor valor médio de densidade do solo está na camada de 0 a 10 centímetros. Menor densidade do solo na camada superficial foi encontrada também em trabalhos de Genro Júnior, Reinert e Reichert (2004) e Reinert et al. (2008). Os maiores valores médios de densidade do solo foram encontrados na camada de solo entre 20 e 40 centímetros. Estes resultados também foram observados por Alves, Suzuky e Suzuky (2007). Observa-se que apenas a densidade do solo avaliada nas camadas entre 30 a 50 metros apresentaram valores de CV inferiores a 10%. Carvalho et al. (2010a, 2010b) encontraram CV abaixo de 10% as para diferentes camadas de solo avaliadas.

Para a resistência mecânica do solo à penetração, os maiores valores foram encontrados na camada de solo entre 30 a 50 centímetros de profundidade. Para todas as camadas avaliadas, o valor de CV foi superior a 10%, indicando maior variabilidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Castelari et al. (2010), Rosa et al. (2011) e Vieira et al. (2010).

Embora as frações granulométricas dos solos sejam consideradas como características estáveis (FERREIRA, 2010), foi encontrado CV superior a 10% para ambas as camadas avaliadas. Trabalhos como os de Gonçalves, Folegatti e Mata (2001) e Souza et al. (2004) encontraram CV abaixo de 10%.

A produtividade apresentou CV alto, sendo encontrada a mesma situação nos trabalhos de Ferraz et al. (2011) e Silva et al. (2007, 2008). Já a altura das plantas apresentou CV inferior a 10%.

Tabela 2 Estatística descritiva das variáveis Densidade do solo (Ds, em g/cm³), Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP, em MPa), Umidade gravimétrica (UG, em %), Teor de argila (Arg, em %), em diferentes camadas, e da altura (m) e da produtividade (L/planta) das plantas de café

Variável	Estatística descritiva									
	Mín	Máx	Md	Méd	Var	DP	C _s	C _k	CV	D
Ds 0-10 cm	0,92	1,43	1,13	1,16	0,03	0,18	0,14	-1,43	15,3	0,15
Ds 10-20 cm	0,99	1,63	1,35	1,31	0,04	0,20	-0,29	-1,06	14,9	0,12
Ds 20-30 cm	1,08	1,78	1,52	1,47	0,04	0,21	-0,23	-1,13	14,0	0,13
Ds 30-40 cm	1,24	1,74	1,55	1,51	0,02	0,13	-0,33	-0,67	8,7	0,15
Ds 40-50 cm	1,20	1,64	1,48	1,44	0,02	0,13	-0,46	-0,67	9,0	0,18*
Ds 50-60 cm	0,98	1,68	1,40	1,38	0,03	0,18	-0,51	-0,08	12,9	0,12
RMSP 0-10 cm	0,18	0,66	0,27	0,33	0,02	0,15	1,12	0,21	44,5	0,23*
RMSP 10-20 cm	0,17	1,42	0,43	0,47	0,06	0,25	2,48	8,77	52,8	0,17
RMSP 20-30 cm	0,20	2,28	0,61	0,69	0,15	0,39	3,14	12,18	56,6	0,26*
RMSP 30-40 cm	0,57	1,99	1,04	1,13	0,16	0,40	0,76	-0,20	35,0	0,16
RMSP 40-50 cm	0,82	2,12	1,15	1,25	0,13	0,35	0,78	-0,11	28,3	0,16
RMSP 50-60 cm	0,50	1,36	1,01	0,99	0,06	0,24	-0,32	-0,98	24,8	0,12
UG	18,85	28,45	21,92	22,33	5,37	2,31	0,74	0,59	10,3	0,13
Arg 0-20 cm	32,00	55,00	45,00	44,04	58,99	7,68	-0,17	-1,52	17,4	0,16
Arg 20-40 cm	34,00	55,00	46,00	45,21	47,91	6,92	-0,18	-1,25	15,3	0,13
Altura	1,86	2,48	2,16	2,16	0,23	0,15	-0,07	-0,07	7,1	0,08
Produtividade	2,40	12,52	7,49	7,40	7,78	2,79	0,28	-0,42	37,7	0,11

Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Md - Mediana; Méd - Média; Var - Variância; DP - Desvio padrão; C_s - Coeficiente de assimetria; C_k - Coeficiente de curtose; CV - Coeficiente de variação; D - Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, * não significativo

Conforme observado, os dados apresentados referentes à média, valor mínimo e máximo encontrados na tabela 2 mostram a variação de valores que podem ser expressos pelas variáveis estudadas. Entretanto, apenas o conhecimento destas medidas não pode ser utilizado como único modo de identificar a expressão da variável em uma área. Para tanto, é feita a análise

geoestatística com o objetivo de verificar a variabilidade espacial de uma variável e, caso identificada, confeccionam-se mapas temáticos que auxiliam a entender o seu comportamento no campo.

Os parâmetros de ajuste dos semivariogramas do modelo esférico, bem como o erro médio (EM) calculado pela validação cruzada, estão apresentados na tabela 3.

Observa-se que, para todas as variáveis, o EM apresentou valores muito próximos de zero, mostrando que os ajustes para o modelo esférico foram bem feitos e preencheram os requisitos da validação cruzada. O menor valor de EM (-0,2608) encontrado foi do teor de argila na camada de solo entre 20 a 040 centímetros, e o maior foi observado para a produtividade (0,0436).

Por meio dos resultados da análise geoestatística, todas as variáveis apresentaram dependência espacial (Tabela 3 e Figuras 3, 4, 5, 6 e 7). Observou-se dependência espacial para todas as variáveis avaliadas, uma vez que o valor absoluto da diferença entre duas amostras aumentou para distâncias entre coletas cada vez maiores, até chegar a um valor estável. Dessa forma, ocorreu a estabilidade do semivariograma, definindo a distância máxima em que a variável apresenta dependência espacial.

Tabela 3 Parâmetros de ajuste dos semivariogramas do modelo esférico, pelo método da Máxima Verossimilhança Restrita, das variáveis avaliadas

Variável	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	A	GDE	EM
Ds 0-10 cm	0,005	0,027	0,032	294,78	16	-0,0020
Ds 10-20 cm	0,031	0,007	0,038	39,27	82	0,0000
Ds 20-30 cm	0,000	0,039	0,039	147,04	0	0,0004
Ds 30-40 cm	0,001	0,015	0,016	129,23	6	0,0040
Ds 40-50 cm	0,014	0,003	0,017	39,59	85	0,0000
Ds 50-60 cm	0,007	0,033	0,04	303,24	17	-0,0002
RMSP 0-10 cm	0,017	0,005	0,022	223,68	79	0,0003
RMSP 10-20 cm	0,039	0,025	0,065	168,31	61	0,0004
RMSP 20-30 cm	0,000	0,154	0,154	50,11	0	0,0001
RMSP 30-40 cm	0,000	0,158	0,158	52,86	0	0,0000
RMSP 40-50 cm	0,083	0,047	0,131	248,62	64	0,0000
RMSP 50-60 cm	0,058	0,002	0,06	209,8	97	0,0000
UG	0,856	3,621	4,477	205,57	19	-0,0371
Arg 0-20 cm	0,000	59,000	59	39,18	0	0,0000
Arg 20-40 cm	0,000	36,480	36,48	265,75	0	-0,2608
Altura	0,004	0,029	0,033	246,53	11	-0,0052
Produtividade	3,201	6,179	9,38	287,66	34	0,0436

Ds - densidade do solo (g/cm^3); RMSP - Resistência mecânica do solo à penetração (MPa); Arg - Teor de argila (%); Altura (metros); Produtividade (L/planta); C₀ - efeito pepita; C₁ - contribuição; C₀+C₁ - patamar; a - alcance (metros); GDE - grau de dependência espacial (%); EM - erro médio

O efeito pepita (C₀) indica a variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986). A ocorrência de efeito pepita zero foi observada somente para Ds 20-30 cm, resistência mecânica do solo à penetração 20-30 cm e 30-040 cm e para ambas as camadas de teor de argila avaliadas.

O alcance do semivariograma representa a zona de influência de uma observação e separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes) (ANDRIOTTI, 2003). Houve uma grande variação de valores entre as camadas de solo avaliadas para os atributos do solo. Para a D_s , o menor (39,27 metros) foi o da camada 10-20 cm e o maior (303,24 metros) foi o 50-60 cm. A resistência mecânica do solo à penetração apresentou menor (50,11 metros) na camada 20-30 cm e maior (248,62 metros) para a camada 40-50 cm. Quanto ao teor de argila, a camada 0-20 cm apresentou alcance igual a 39,18 metros e, para a camada 20-40 cm foi igual a 265,75 metros. Essa variação nos valores de alcance demonstra que, utilizando a grade amostral proposta, a distância de coleta das amostras deve ser diferente, para cada variável e camada a ser avaliada. Já as características agrônômicas avaliadas apresentaram valores de alcance muito próximos (246,53 metros para a altura e 287,66 metros para a produtividade), mostrando que podem ser amostradas em um espaçamento intermediário próximo aos valores de alcance encontrados.

Andrade et al. (2005) avaliaram a densidade do solo nas camadas de solo 0 a 30 cm, 30 a 60 cm e 60 a 90 cm. Os valores de efeito pepita e alcance encontrados foram: 0,0004 e 46 metros (0 a 30 cm); 0,0006 e 255,1 metros (30 a 60 cm); e 0,0018 e 46 metros (60 a 90 cm). Amaro Filho et al. (2007) encontraram efeito pepita e alcance iguais a 10,00 e 104,60 metros, respectivamente, avaliando a densidade do solo entre 0 e 20 cm de profundidade, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico. No trabalho de Cruz et al. (2010), em um ARGISSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico arenoso, a densidade do solo foi avaliada na camada entre 0 e 20 cm. Encontrou-se valor de efeito pepita igual a 0,0 e alcance igual a 12,58 metros.

Souza et al. (2006) estudaram, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico, argiloso, a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à

penetração em duas épocas diferentes (a primeira 24 horas após uma chuva de 32 mm e a segunda 72 horas após essa mesma chuva) e em três diferentes camadas de solo (0 a 15; 15 a 30; e 30 a 45 cm de profundidade). Para a primeira época, todas as camadas apresentaram efeito pepita puro, justificado pelo autor em razão da elevada umidade do solo. Já na segunda época, os valores de efeito pepita encontrados foram 0,11(0 a 15 cm), 0,16 (15 a 30 cm) e 0,18 (30 a 45 cm). Os valores de alcance foram, respectivamente, 48,6 metros, 21,1 metros e 20,8 metros.

Amaro Filho et al. (2007), em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico, encontraram efeito pepita e alcance iguais a 25,61 e 93,54 metros. Leão et al. (2010) avaliaram o teor de argila nas profundidades de 0 a 20 e de 60 a 80 cm, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico. Os valores de efeito pepita e alcance encontrados foram: 12,7 e 310 metros (0 a 20 cm); e 35,7 e 371 metros (60 a 80 cm). Já Rámirez-Lopez, Reina-Sánchez e Camacho-Tamayo (2008) avaliaram o teor de argila nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, em um Latossolo com textura média, na Colômbia e encontraram efeito pepita puro para ambas camadas.

Tais diferenças encontradas pelos autores citados acima, para os atributos do solo, podem ser em função do tipo de manejo do solo utilizado, cultura implantada, declividade e relevo da área.

Silva et al. (2008), avaliando a safra 2002/2003 e 2003/2004, encontraram efeito pepita e alcance iguais a 0,58 e 65,04 metros (primeira safra) e 0,79 e 60,43 metros (segunda safra). Avaliando a produtividade do café em três safras (2005, 2006 e 2007), Silva et al. (2010) encontraram efeito pepita igual a zero para as duas primeiras safras e 0,76 para a última. Os valores de alcance foram iguais a 21,3 metros (primeira safra), 27,6 metros (segunda safra), e 36 metros (terceira safra). Em relação à produtividade, Ferraz et al. (2011) encontraram efeito pepita igual a 0,1579 e alcance igual a 150,94 metros. Estas

diferenças podem ser justificadas, entre outros fatores, por: manejo da cultura, idade da lavoura, cultivar escolhida, manejo e tipo de solo, clima.

Conforme observado na tabela 3, de forma geral, todas as variáveis não apresentam distribuição aleatória no espaço, uma vez que possuem GDE forte ou moderado.

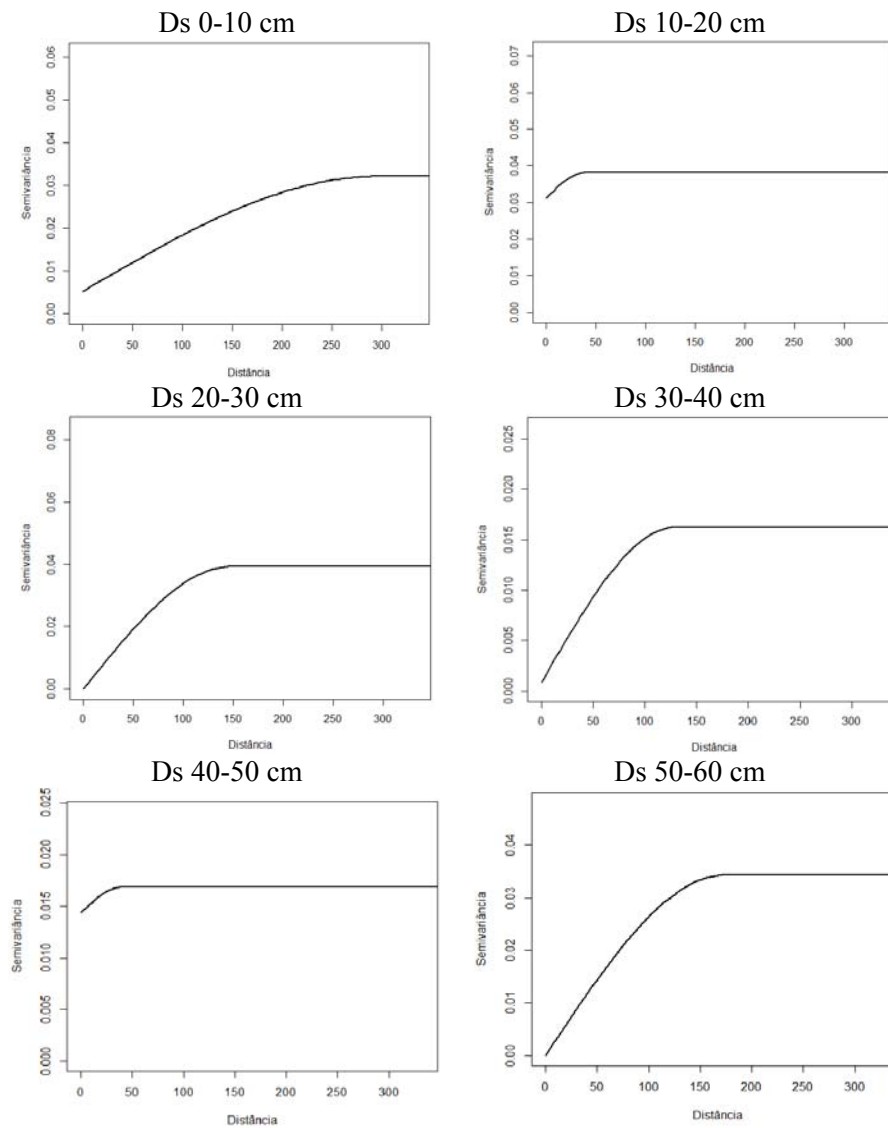


Figura 3 Semivariogramas ajustados pelo modelo esférico para a variável densidade do solo - D_s (g/cm^3), em diferentes camadas de solo.

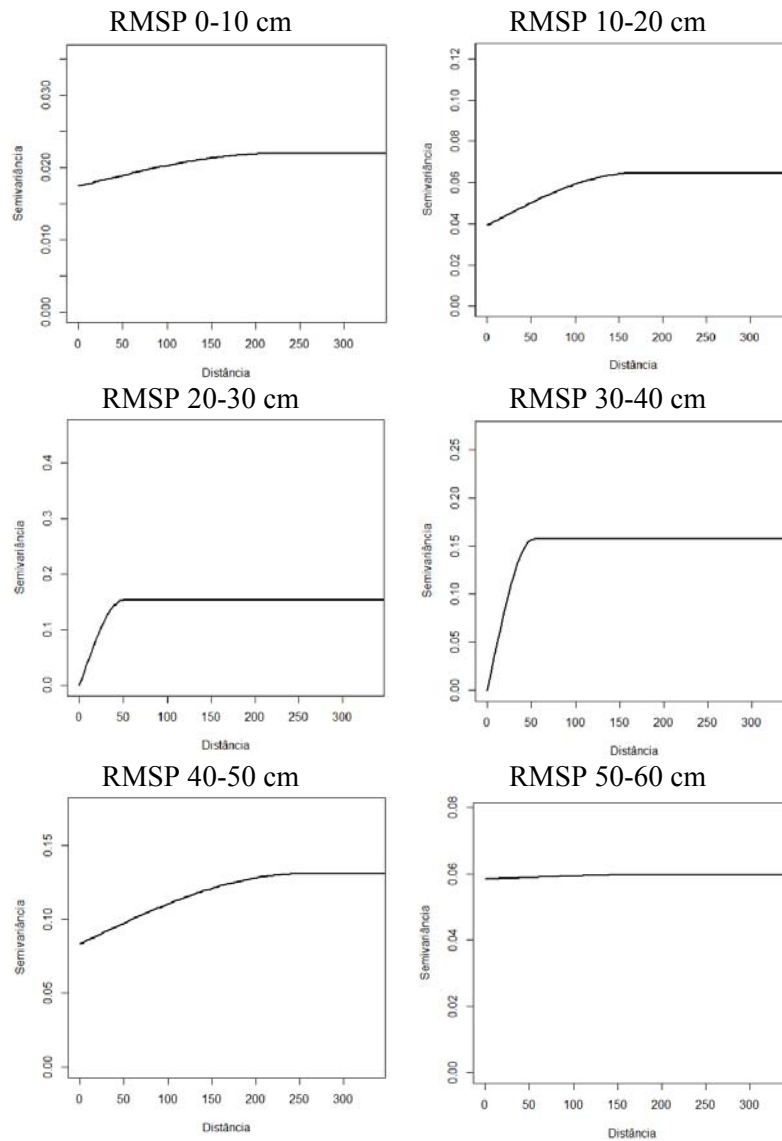


Figura 4 Semivariogramas ajustados pelo modelo esférico para a variável resistência mecânica do solo à penetração - RMSP (MPa), em diferentes camadas de solo.

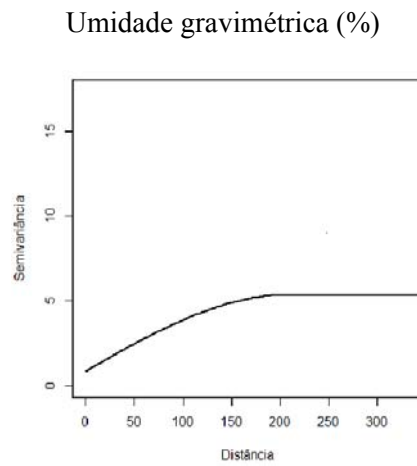


Figura 5 Semivariograma ajustado pelo modelo esférico para a variável umidade gravimétrica média.

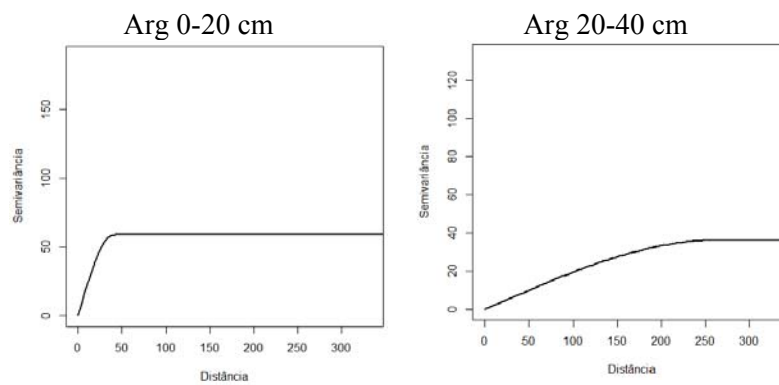


Figura 6 Semivariogramas ajustados pelo modelo esférico para a variável teor de argila - Arg(%), em diferentes camadas de solo.

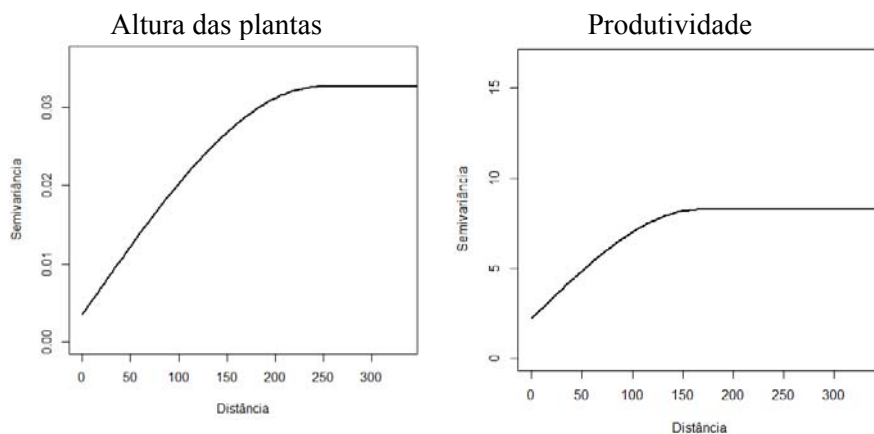


Figura 7 Semivariogramas ajustados pelo modelo esférico para as variáveis altura de plantas (metros) e produtividade (L/planta).

Todos os mapas confeccionados (Figuras 8, 9, 10, 11 e 12) apresentaram uma grande amplitude em seus valores. Esta amplitude demonstra como a adoção da média de observações no campo pode ocasionar erros no manejo realizado. Relatos semelhantes são citados nos trabalhos de Ferraz et al. (2011) e Silva et al. (2007, 2008). Isso demonstra a importância da agricultura de precisão no manejo das culturas e a necessidade de utilizar uma ferramenta estatística que considere as relações espaciais existentes para suas análises.

É importante ressaltar que os mapas confeccionados possuem escalas diferentes, ou seja, a mesma cor em diferentes mapas podem indicar valores distintos.

Os valores médios de densidade do solo (Tabela 2), nas camadas avaliadas, foram: 1,16; 1,31; 1,47; 1,51; 1,44; e 1,38 g/cm^3 , respectivamente, da camada superior para a inferior. No geral, os mapas (Figura 8) apresentaram um

padrão aonde os menores valores são encontrados na parte superior dos mapas, enquanto os maiores valores situam-se na parte central e inferior dos mapas.

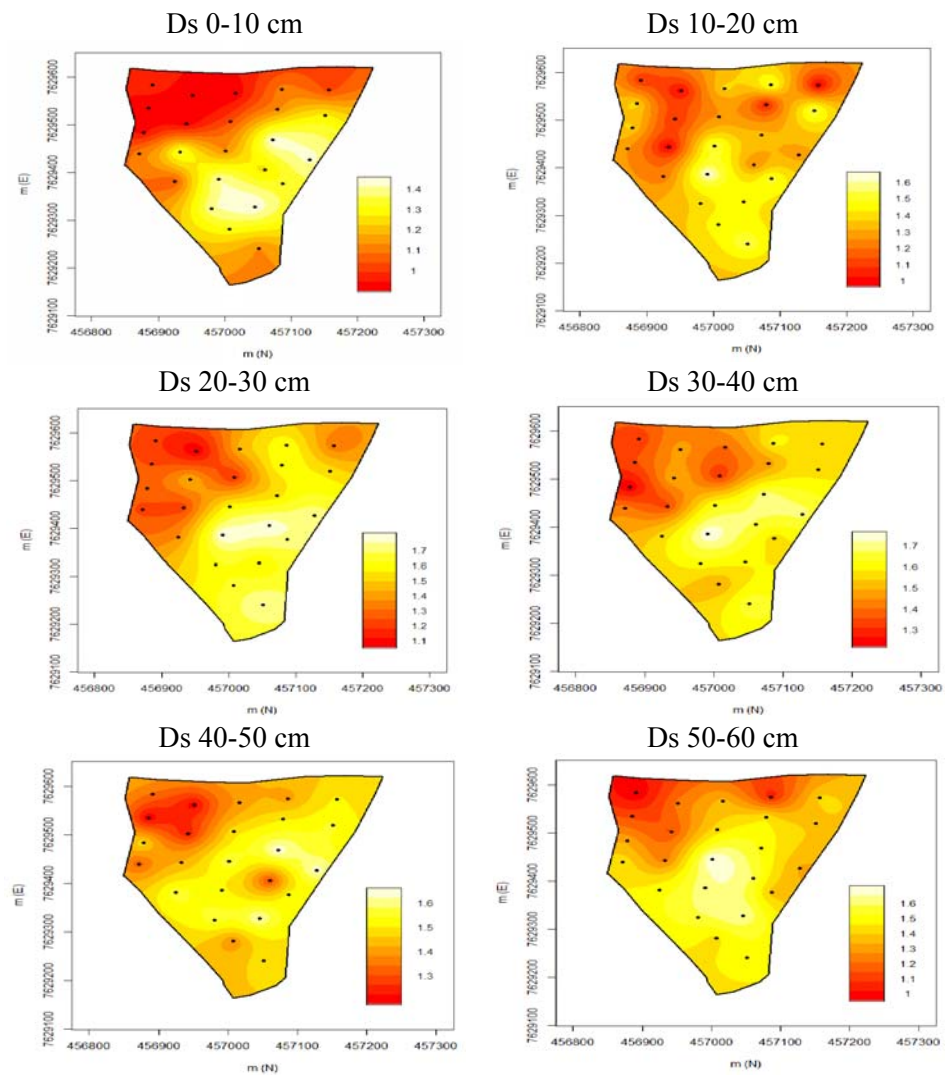


Figura 8 Distribuição espacial da variável densidade do solo - D_s (g/cm^3), em diferentes camadas de solo.

Para a resistência mecânica do solo à penetração, os valores médios (Tabela 2) nas camadas avaliadas, foram: 0,33; 0,47; 0,69; 1,13; 1,25; e 0,99 MPa, respectivamente, da camada superior para a inferior. Observa-se que, nestes mapas (Figura 9), não existe um padrão de valores em profundidade, para um mesmo ponto amostrado, em diferentes mapas, bem como entre pontos próximos.

Segundo Campbell e O'Sullivan (1991 citados por VIEIRA; CERQUEIRA, 2009), os principais fatores que devem ser considerados no uso de penetrômetros e na interpretação dos valores medidos são: presença de pedras; efeito da profundidade; e a variabilidade dos valores. Para os autores citados, o número de dados a serem coletados para estudos de RMSP dependem do coeficiente de variação (CV) e da percentagem dos dados contidos dentro de um determinado intervalo (L), com determinado nível de probabilidade. A quantidade de coletas a serem feitas será igual ao quadrado da razão entre duas vezes o CV e o intervalo L. No presente estudo, a amostragem utilizada apresentou elevados valores de CV para a RMSP, uma vez que para cada ponto foi feita uma única coleta. Dessa forma, recomenda-se que, para estudos de variabilidade espacial deste atributo, seja adotado como valor do ponto a média de sete a nove observações, a fim de obter valores mais representativos da RMSP na área a ser avaliada.

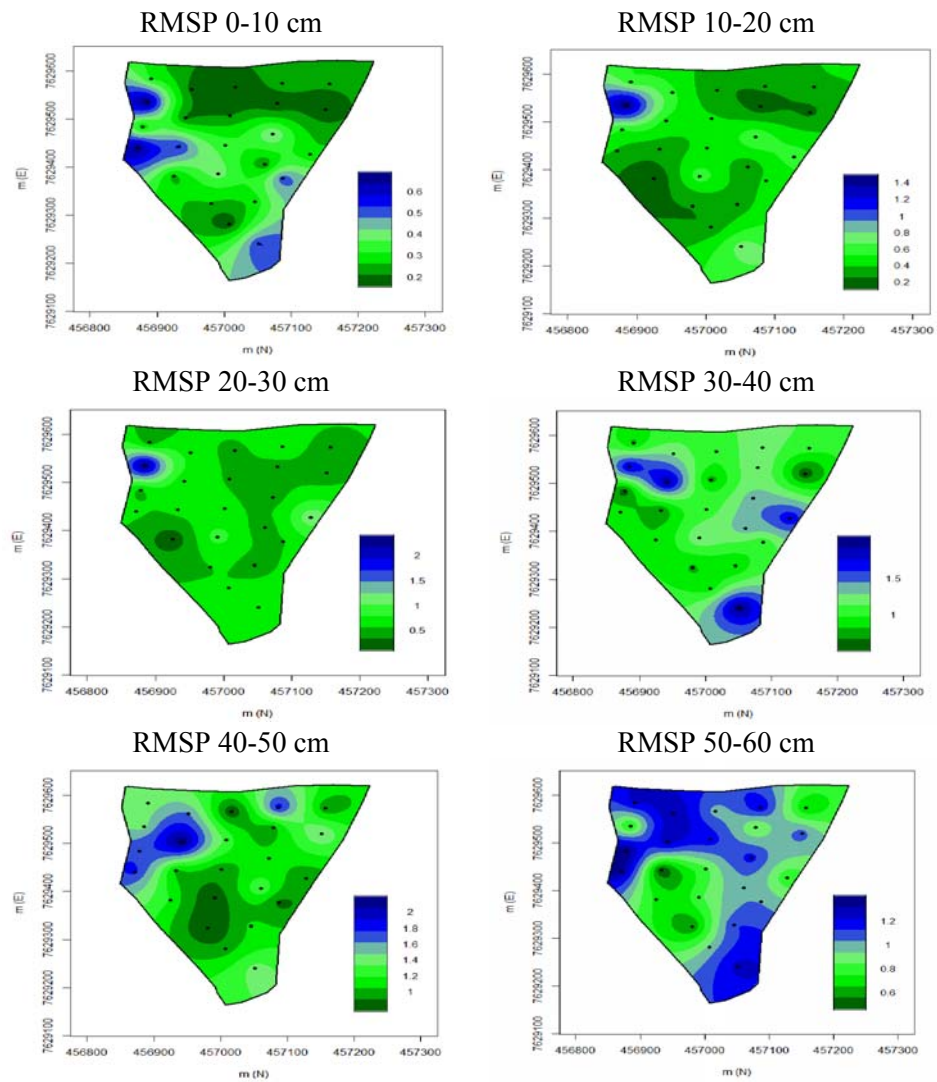


Figura 9 Distribuição espacial da variável resistência mecânica do solo à penetração - RMSP (MPa), em diferentes camadas de solo.

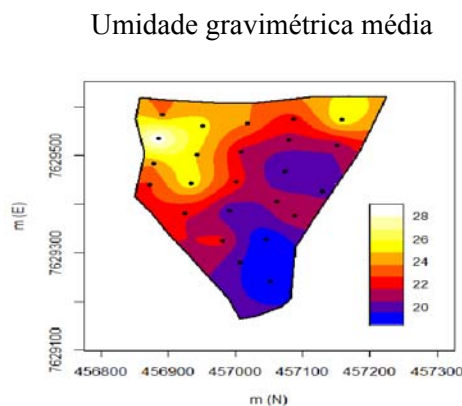


Figura 10 Distribuição espacial da variável umidade gravimétrica média (%).

Para Assis et al. (2009), o aumento da resistência mecânica do solo à penetração está ligado a baixos valores de umidade do solo. O mapa de umidade gravimétrica média (Figura 10) apresenta valores inferiores (18 a 21%) na parte inferior e na região central do lado direito, sendo valores intermediários e superiores (21% a 28%) encontrados na parte superior e na região central do lado esquerdo.

A maior umidade encontrada na parte superior esquerda do mapa coincide com valores mais elevados de resistência mecânica do solo à penetração, nas camadas avaliadas. Esta relação pode indicar que nesta região há compactação do solo, afetando negativamente as características agronômicas avaliadas (Figura 12). Para o restante da área, observa-se que regiões com menores valores de umidade gravimétrica apresentam menores valores de resistência mecânica do solo à penetração.

O teor de argila médio (Tabela 2), considerando-se respectivamente a camada de 0-20 cm e a de 20-40 cm, apresentou valores iguais a 44,04 e

45,21%. Da mesma forma que a densidade do solo, os mapas do teor de argila (Figura 11) indicam um padrão ao longo do perfil, onde maiores teores de argila são encontrados na parte superior dos mapas e menores teores estão localizados na região central e inferior dos mapas.

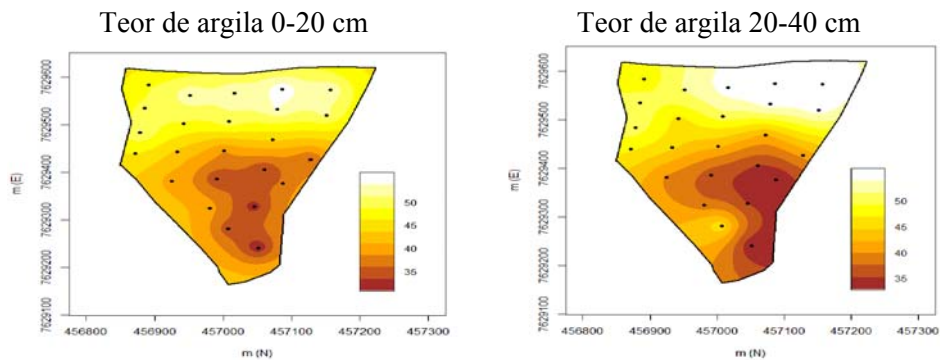


Figura 11 Distribuição espacial da variável teor de argila (%), em diferentes camadas de solo.

Para as características agrônômicas, os valores médios (Tabela 2) da altura e produtividade, respectivamente, foram 2,16 metros e 7,40 L/planta. Na parte superior dos mapas (Figura 12) são encontrados os menores valores dessas variáveis, exceto para o canto superior direito em que ambas variáveis apresentaram maiores valores. O mapa da altura apresenta, em sua região central e inferior, valores intermediários. Ao analisar-se o de produtividade, verifica-se que valores elevados e intermediários estão localizados na parte inferior do mapa. À medida que se caminha para a parte superior e esquerda, os valores encontrados vão diminuindo.

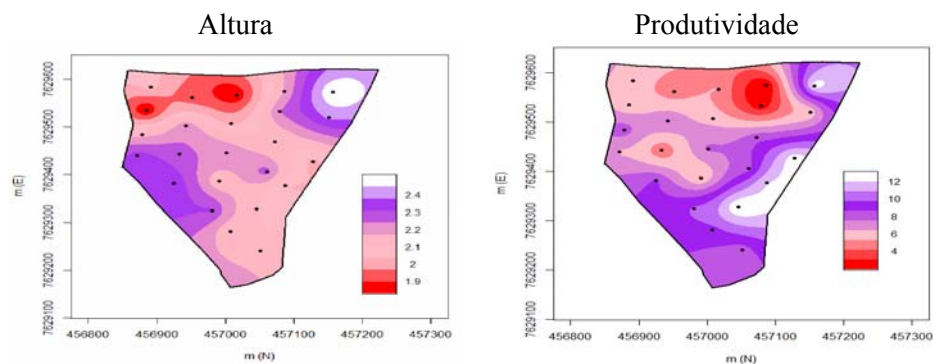


Figura 12 Distribuição espacial das variáveis altura de plantas (metro) e produtividade (L/planta).

Comparando-se os mapas de Ds com os de características agrônômicas, verifica-se que as regiões com maiores valores de densidade do solo (cor amarela) coincidem com as de maior produtividade e de maior altura (cores roxa e branca). Isto demonstra que a densidade do solo não atingiu valores que prejudicassem o desenvolvimento da cultura do café.

Em relação à comparação dos mapas de resistência mecânica do solo à penetração com os de características agrônômicas, observa-se que até a profundidade de 40 centímetros ocorreu baixa resistência mecânica do solo à penetração na maior parte da área, proporcionando maior altura e maior produtividade da cultura do café, haja vista que maior atividade do sistema radicular dessa cultura encontra-se até a profundidade de 20 cm (SOARES et al., 2007). Nas camadas abaixo de 40 cm, ocorrem maior resistência mecânica do solo à penetração e não sofrem os efeitos de compactação impostos por máquinas e implementos utilizados. As camadas superficiais do solo sofrem maiores efeitos, conforme citam Daniel e Maretti (1990). Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes e o desenvolvimento da maioria das plantas, já para Sene et al. (1985)

são considerados como valores críticos aqueles em que a resistência mecânica do solo à penetração está igual ou acima de 6,0 a 7,0 MPa, para solos mais arenosos, e igual ou acima de 2,5 MPa, para solos mais argilosos.

Para os mapas de teor de argila, em comparação com os de altura e produtividade da cultura do café, nota-se que, em regiões com menor teor de argila, encontram-se valores intermediários de altura (intervalo de 2,0 a 2,2 metros) e valores intermediários e maiores (8 a 12 L/planta) para a produtividade. Também se verifica que regiões com maior teor de argila (45 a 55%) coincidem com as que apresentam maior umidade gravimétrica (24 a 28%), conforme descrito em Ferreira e Dias Júnior (2001).

Por meio da comparação dos mapas de densidade do solo com os de resistência mecânica do solo à penetração, observa-se que, no geral, regiões em que ocorrem os maiores valores de densidade do solo (cor amarela) coincidem com as de menores valores de resistência mecânica do solo à penetração (cor verde escuro e verde), discordando do observado por Assis et al. (2009).

Ao comparar os mapas de teor de argila com os de densidade do solo, observa-se que regiões com maior teor de argila (45 a 55%) possuem menor valor de densidade do solo ($1,0$ a $1,3 \text{ g/cm}^3$), conforme citado por Reichert, Reinert e Braida (2003), que propuseram como densidade do solo crítica para algumas classes texturais: $1,30$ a $1,40 \text{ g/cm}^3$ para solos argilosos (acima de 35% de argila), $1,40$ a $1,50 \text{ g/cm}^3$ para os franco-argilosos (de 28 a 40% de argila) e de $1,70$ a $1,80 \text{ g/cm}^3$ para os franco-arenosos (de 0 a 20% de argila). Nota-se que, mesmo a densidade do solo do presente estudo sendo superior ao limite crítico recomendando para a classe argilosa, ela não limitou a altura e produtividade da cultura do café.

Percebe-se, também, comparando os mapas de teor de argila com os de resistência mecânica do solo à penetração, que as regiões com maiores teores de argila (cores amarela e branca, com valores entre 45 e 55%, para os dois mapas)

coincidem com as de menores valores de Resistência mecânica do solo à penetração (cor verde escuro e verde, com valores inferiores a 1,0 Mpa, exceto para a camada de 50-60 cm) concordando com Sene et al. (1985) conforme citado acima, e com Assis et al. (2009).

CONCLUSÕES

1 Utilizando-se apenas a estatística clássica, observa-se que os valores médios encontrados para as variáveis analisadas não representam a variação de valores que podem ser encontrados em toda a área estudada.

2 Por meio da análise geoestatística, observou-se que todas as variáveis apresentam grau de dependência espacial: forte (densidade do solo 0-10 cm; densidade do solo 20-30 cm; densidade do solo 30-40 cm; densidade do solo 50-60 cm; resistência mecânica do solo à penetração 20-30 cm; resistência mecânica do solo à penetração 30-40 cm; umidade gravimétrica média; teor de argila 0-20 cm; teor de argila 20-40cm; e altura de plantas), moderado (resistência mecânica do solo à penetração 10-20 cm; resistência mecânica do solo à penetração 40-50 cm; e produtividade), e fraca (densidade do solo 10-20 cm; densidade do solo 40-50 cm; resistência mecânica do solo à penetração 0-10 cm; e resistência mecânica do solo à penetração 50-60 cm). Isso demonstra que, de modo geral, os valores que as variáveis apresentam ao longo da área não são aleatórios.

3 Foi possível, por meio da observação dos mapas gerados, avaliar as variáveis de solo com as variáveis da cultura do café. Observa-se que as regiões com maiores valores de altura e produtividade coincidem com as regiões em que há maior densidade do solo, menor teor de argila e menor resistência mecânica do solo à penetração.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C.; SILVA, F. M. **Agricultura de precisão: teoria e prática**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2008. 114 p.
- ALVES, M. C.; SUZUKY, L. G. A. S.; SUZUKY, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 617-625, ago. 2007.
- AMARO FILHO, J. et al. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 415-422, jun. 2007.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. In: _____. **ASAE standards 1999: standards engineering practices data**. 46th ed. Saint Joseph, 1999. p. 834-835.
- ANDRADE, A. R. S. et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, mar./abr. 2005.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.
- ASSIS, R. L. et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, out./dez. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da indústria de café no Brasil**. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.abic.com.br>>. Acesso em: 6 nov. 2011.
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, n. 3, p. 341-358, 1990.
- BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer method for studying soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 25, p. 265-371, 1927.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 132 p.

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

CANARACHE, A. PENETR: a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 51-70, Apr. 1990.

CARVALHO, L. C. C. et al. Cobertura vegetal e compactação em LATOSSOLO VERMELHO distrófico cultivado com *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Brachiaria brizantha* cv. Piatã, sob irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: SBEA, 2010a. 1 CD-ROM.

_____. Influência da compactação do solo sobre a cobertura vegetal na superfície de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico cultivado com *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Brachiaria brizantha* cv. Vaquero, sob irrigação na região do Alto Paranaíba, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: SBEA, 2010b. 1 CD-ROM.

CARVALHO, L. G. et al. Modelo de regressão para previsão de produtividade de cafeeiros no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 204-211, 2004.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: UNIUBE, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

CASTELARI, L. H. L. et al. Cobertura do solo e resistência mecânica do solo à penetração quando cultivado com forrageiras das espécies *Brachiaria híbrida* cv. Mulato II e *Cynodon sp* cv. Tifton 85, sob irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: quarta estimativa da safra de 2011. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011. 19 p.

CORRÊA, J. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiros do Sul de Minas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1279-1286, nov./dez. 2001.

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

CRUZ, J. S. et al. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em ARGISSOLO VERMELHO AMARELO cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 32, p. 271-278, mar./abr. 2010.

CUNHA, R. L. et al. Efeito da época, altura de poda e adubação foliar na recuperação de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) depauperados. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, n. 1, p. 222-226, jan./mar. 1999.

DANIEL, L. A.; MARETTI, H. J. Avaliação de camada de solo compactado e análise de crescimento de plantas. In: CICLO DE ESTUDOS SOBRE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA, 4., 1990, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1990. p. 22-33.

DURIGON, R. et al. Correlações entre atributos químicos do solo e atributos da cultura e da produtividade de arroz irrigado determinado com técnicas de manejo localizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2629-2633, dez. 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C. Zonamento climático associado ao potencial produtivo da cultura de café no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 445-452, 2002.

FERRAZ, G. A. S. et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, 2011.

FERREIRA, A. J. et al. Bioecologia da broca-do-café *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera, Scolytydae), no agrossistema cafeeiro do cerrado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 2, p. 422-431, mar./abr. 2003.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: JONG-VAN-LIER, Q. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: UFV/SBCS, 2010. p. 1-28.

FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 117 p.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 627-636, maio/jun. 2007.

FROGBROOK, Z. L. et al. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, Oxon, v. 18, n. 1, p. 1-9, Feb. 2002.

FURLANI, C. E. A. et al. Resistência do solo à penetração em preparo convencional, escarificação e semeadura direta em diferentes manejos da cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 579-587, 2003.

GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 477-484, maio/jun. 2004.

GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 305 p.

GOMES, N. M.; LIMA, L. A.; CUSTÓDIO, A. A. P. Crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro irrigado no Sul do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 564-570, 2007.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um argissolo vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

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.

KERRY, R.; OLIVER, M. A. Sampling requirements for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. **Geoderma**, Amsterdam, v. 140, n. 4, p. 383-396, 2007.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

LANNA, G. B. M. **Viabilidade econômico-financeira da cafeicultura no Sul de Minas Gerais**. 2010. 95 p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

LEÃO, M. G. A. et al. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 121-131, jan./fev. 2010.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura de "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

MARQUES JÚNIOR, J.; CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p. 31-70.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 3, p. 617-639, June 1986.

NEVES, Y. P. et al. Produtividad y acumulación de materia seca, N, P Y K por cultivares de *Coffea arabica* L. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 156-167, jul./dez. 2006.

PAIS, P. S. M. et al. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 6, p. 1949-1958, nov./dez. 2011.

PARDO-IGÚZQUIZA, E. Inference of spatial indicator covariance parameters by maximum likelihood using MLREML. **Computers and Geosciences**, London, v. 24, n. 5, p. 453-464, Sept. 1998.

PEREIRA, S. P. et al. Crescimento, produtividade e bienalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 2, p. 152-160, fev. 2011.

QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; MANTOVANI, E. C. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 109-157.

RAMÍREZ-LOPEZ, L.; REINA-SÁNCHEZ, A.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Variabilidad espacial de atributos físicos de un typic Haplustox de los llanos orientales de Colômbia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 55-63, jan./mar. 2008.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em ARGISSOLO VERMELHO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, set./out. 2008.

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.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Teresina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Geoprocessamento. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFV, 1998. p. 1-30.

ROSA, A. O. et al. Resistência mecânica do solo à penetração em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO, sob preparo convencional, cultivado com soja irrigada e de sequeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBEA, 2011. 1 CD-ROM.

SANTOS, F. S. et al. Adubação orgânica, nutrição e progresso de cercosporiose e ferrugem-do-cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 7, p. 783-791, jul. 2008.

SEDIYAMA, G. C. et al. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.

SENE, M. et al. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 422-427, 1985.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MULLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 1-18.

SILVA, C. A.; TEODORO, R. E. F.; MELO, B. Produtividade e rendimento do cafeeiro submetido a lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 387-394, mar. 2008.

SILVA, F. M. et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-32, mai./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.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 795-801, set./out. 2000.

SOARES, A. R. et al. Produção e distribuição de raízes em cafeeiros irrigados por gotejamento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 15, n. 2, p. 130-140, abr./jun. 2007.

SOUZA, Z. M. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, jan./fev. 2006.

_____. Variabilidade espacial da textura de um LATOSSOLO VERMELHO eutroférico sob cultivo de cana de açúcar. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 309-319, maio/ago. 2004.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (Circular Técnica, 23).

VIEIRA, F. P. et al. Resistência mecânica do solo à penetração e cobertura vegetal em LATOSSOLO VERMELHO distrófico cultivado com *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Panicum maximum* cv. Tanzânia em regime rotacionado sob irrigação no Alto Paranaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

VIEIRA, L. B.; CERQUEIRA, E. S. A. **Propriedades da mecânica do solo agrícola**. Bambuí: Dinter, 2009. 83 p. Projeto de doutorado.

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. 1-53.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 51, n. 1, p. 1-75, 1983.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. London: J. Wiley, 2007. 271 p.

ZAMBOLIM, L. **Tecnologia de produção de café com qualidade**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 648 p.