



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LEVI FRAGA PAJEHÚ

**ATRIBUTOS DE SOLO E PLANTA E A DISTRIBUIÇÃO DE FERTILIZANTES EM
LAVOURA CAFEEIRA MICROTERRACEADA**

ALEGRE-ES

2022

LEVI FRAGA PAJEHÚ

**ATRIBUTOS DE SOLO E PLANTA E A DISTRIBUIÇÃO DE FERTILIZANTES EM
LAVOURA CAFEEIRA MICROTERRACEADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima

Coorientador: Prof. Dr. Samuel de Assis Silva

ALEGRE-ES

2022

**ATRIBUTOS DE SOLO E PLANTA E A DISTRIBUIÇÃO DE FERTILIZANTES
EM LAVOURA CAFEEIRA MICROTERRACEADA**

Levi Fraga Pajehú

Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Agronomia do Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias da Universidade Federal
do Espírito Santo, como parte das exigências
para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Aprovada em 25 de agosto de 2022



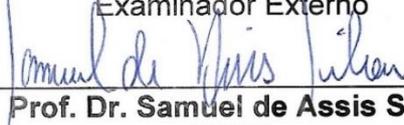
Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler
Instituição: UFES
Examinador externo



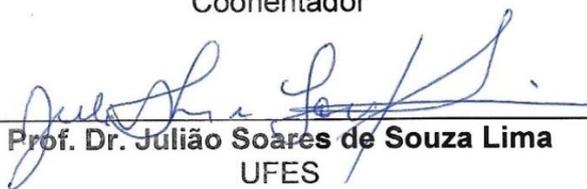
Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier
Instituição: UFES
Examinador



Prof. Dr. Abel Souza da Fonseca
Instituição: MEPES-EFA/Ibitirama-ES
Examinador Externo



Prof. Dr. Samuel de Assis Silva
UFES
Coorientador



Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima
UFES
Orientador

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P151a Pajehú, Levi Fraga, 1991-
Atributos de solo e planta e a distribuição de fertilizantes em lavoura cafeeira microterraceada / Levi Fraga Pajehú. - 2022.
74 f. : il.

Orientador: Julião Soares de Souza Lima.

Coorientador: Samuel de Assis Silva.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Café - Cultivo. 2. Mecanização agrícola. 3. Plantas - Nutrição. 4. Solos - Qualidade. I. Lima, Julião Soares de Souza. II. Silva, Samuel de Assis. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Otacílio Corrêa Pajehú e Delzina Maria Fraga Pajehú, por tudo que fizeram por mim e a minha esposa Ionara, meu porto seguro.

“Ao que lhe disse Jesus: Se podes! - tudo é possível ao que crê.”

(Marcos 9:23)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde, proteção e sabedoria nos momentos difíceis.

Aos meus pais Otacílio Corrêa Pajehú e Delzina Maria Fraga Pajehú, pelo apoio, dedicação, educação, ensinamentos e cuidados.

À minha esposa Ionara, pelo companheirismo, apoio, dedicação, pelos puxões de orelha, cobranças, pelo carinho e por me tornar uma pessoa melhor e feliz.

Aos meus irmãos Cristina e Cristiano que me apoiaram na jornada de estudos. E aos demais pelo companheirismo e apoio.

Ao meu orientador Julião Soares de Souza Lima, pelos conselhos, simplicidade, humildade, pelos ensinamentos transmitidos e pela amizade.

Ao meu coorientador Samuel de Assis Silva pela oportunidade de trabalhar em seu projeto, pelo apoio e ensinamentos, pela amizade e pela humildade. Um grande homem.

À equipe do LabMap, pelo excelente apoio nos trabalhos, em especial a Jussara Gervasio, João Mendes, Marco Henrique, Marcellin, Gabriela Valim, por estarem mais envolvidos neste projeto.

Aos proprietários da Fazenda Boa Esperança em Ibatiba (Murilo e Antônio) por cederem a lavoura e fornecerem apoio nas pesquisas desenvolvidas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES), pela oportunidade de realização do doutorado, pelo corpo docente excelente, pelo ambiente de aprendizagem e serviços prestados à sociedade.

À FAPES, CAPES e CNPq pelas bolsas de estudos, bolsas de pesquisas (alunos de IC) e financiamento das pesquisas desenvolvidas.

BIOGRAFIA

Levi Fraga Pajehú, indígena pertencente ao povo Tupinikim, filho de Otacílio Corrêa Pajehú e Delzina Maria Fraga Pajehú, nasceu no 26º dia do mês de março do ano de 1991, no município de Aracruz no Estado do Espírito Santo.

Realizou o ensino fundamental na Escola Família Agrícola de Rio Bananal e ensino médio/técnico na Escola Família Agrícola de Jaguaré, tornando-se Técnico e Agropecuária ao final do ano de 2009.

Ingressou na Universidade Federal de Minas Gerais em 2011, no curso de Agronomia no Instituto de Ciências Agrárias – UFMG na cidade de Montes Claros – MG, ao final do ano de 2015 conclui o curso, tornando-se Engenheiro Agrônomo.

Em março de 2016 na mesma instituição (ICA/UFMG), ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, realizando mestrado sob orientação do professor doutor Paulo Sergio Nascimento Lopes. Em fevereiro de 2018 tornou-se Mestre.

Em março de 2018 iniciou o doutorado no Programa de Pós Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), na área de concentração de Solo e Água e Interação com plantas, sob orientação do Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima e coorientação do Prof. Dr. Samuel de Assis Silva, no Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES), submetendo-se a defesa em agosto de 2022.

Em agosto de 2021 iniciou o trabalho com Analista de campo no Instituto de Socioeconomia Solidária (Mandu) e permanece até o momento de apresentação desta Tese.

RESUMO

O uso do microterraceamento das entrelinhas do cafeeiro em áreas declivosas, tem crescido nos últimos anos, visto que proporciona o uso de pequenos tratores agrícolas com implementos de levantamento hidráulico, para mais diversas atividades antes realizadas de forma manual ou semimecanizadas. Entretanto, ainda são escassas as informações da sustentabilidade do sistema de produção ao longo do tempo, sendo importante a execução de trabalhos que avaliem, de forma ampla: as condições de degradação física e química do solo, o comportamento temporal das plantas, os aspectos de manejo da fertilidade do solo, e o estado nutricional das plantas. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a qualidade química do solo, a qualidade da distribuição de fertilizante, a produtividade e a qualidade física do solo sob cultivo de cafeeiro microterraceado. O estudo foi realizado em uma lavoura de café arábica cultivada em curva de nível com as entrelinhas microterraceadas, variedade catuaí vermelho com 11 anos de idade, no município de Ibatiba-ES. Um grid amostral irregular foi montado, totalizando 100 pontos georreferenciados. As amostras de solo foram coletadas na projeção das copas das plantas, na profundidade de 0-0,20m, para avaliar a fertilidade solo. Uma adubação mecanizada foi realizada visando avaliar a uniformidade de distribuição do fertilizante. Obteve-se a produtividade da lavoura e mensurou-se a largura e inclinação dos microterraços, para avaliação da influência destes sobre a uniformidade de distribuição de fertilizantes. Para avaliar o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo foram determinadas a resistência do solo à penetração, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e a porosidade total. As avaliações foram realizadas nas linhas de cultivo e nas linhas de tráfego dos rodados pneumáticos dos tratores. Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas clássicas e geoestatística. Observou elevada variabilidade nos atributos químicos do solo, mostrando regiões de baixa disponibilidade de nutrientes. A massa de fertilizante distribuída por metro linear foi inferior à dose fixa recomendada, sendo afetada pela topografia irregular da lavoura e irregularidades na superfície dos microterraços e, principalmente, às variações de sua largura muitas vezes inferior a 2m. As estradas estreitas e grande oscilação na inclinação destas “ruas”, foram responsáveis pela desuniformidade na distribuição de fertilizantes pela adubadora tratorizada. Ainda assim, a produtividade média de café beneficiado foi muito superior à média nacional e à do estado do Espírito Santo, embora tenha se encontrado elevada variabilidade espacial da produtividade na lavoura. Com relação as análises físicas do solo, para

quase todas as variáveis mensuradas não se observou diferença estatística significativa, entretanto há uma tendência de comprometimento das condições físicas do solo após a passada do trator, em especial sob o rodado próximo a linha de baixo (à esquerda do operador). Os resultados indicam que, devido a inclinação do microterraço em direção à linha abaixo, no sentido do declive do terreno, a transferência de peso no sentido transversal da máquina pode aumentar a pressão dos rodados do trator no lado esquerdo do operador.

Palavras chave: *Coffea arabica*; Mecanização agrícola; Cafeicultura de montanha; Sustentabilidade da cafeeicultura.

ABSTRACT

The use of microterrace between the coffee tree rows in sloping areas has grown in recent years, as it provides the use of small agricultural tractors with hydraulic lifting implements, for more diverse activities that were previously carried out manually or semi-mechanized. However, information on the sustainability of the production system over time is still scarce, and it is important to carry out works that broadly assess: the conditions of physical and chemical degradation of the soil, the temporal behavior of plants, aspects of soil fertility management, and the nutritional status of plants. In this sense, the objective was to evaluate the chemical quality of the soil, the quality of fertilizer distribution, the productivity and the physical quality of the soil under microterrace coffee cultivation. The study was carried out in an arabica coffee crop cultivated in a contour line with microterrace between the lines, 11-year-old red catuaí variety, in the municipality of Ibatiba-ES. An irregular sampling grid was set up, totaling 100 georeferenced points. Soil samples were collected in the projection of the plant crowns, at a depth of 0-0.20m, to assess soil fertility. A mechanized fertilization was carried out in order to evaluate the uniformity of fertilizer distribution. The productivity of the crop was obtained and the width and slope of the micro terraces were measured, in order to evaluate their influence on the uniformity of fertilizer distribution. To evaluate the effect of machine traffic on the soil, the soil penetration resistance, soil density, macroporosity, microporosity and total porosity were determined. The evaluations were carried out in the cultivation lines and in the traffic lines of the pneumatic wheels of the tractors. The data obtained were submitted to classical statistical and geostatistical analyses. High variability in soil chemical attributes was observed, showing regions of low nutrient availability. The fertilizer mass distributed per linear meter was lower than the recommended fixed dose, being affected by the irregular topography of the crop and irregularities on the surface of the microterraces and, mainly, the variations in their width, often less than 2m. The narrow roads and great oscillation in the slope of these "streets" were responsible for the uneven distribution of fertilizers by the tractor-mounted fertilizer machine. Even so, the average productivity of processed coffee was much higher than the national average and that of the state of Espírito Santo, although a high spatial variability of productivity was found in the crop. Regarding the physical analysis of the soil, for almost all the variables measured, there was no statistically significant difference, however there is a tendency to compromise the physical conditions of the soil after the tractor passes, especially

under the wheels near the bottom line (at operator left). The results indicate that, due to the slope of the microterrace towards the line below, in the direction of the slope of the terrain, the transfer of weight in the transverse direction of the machine can increase the pressure of the tractor wheels on the left side of the operator.

Keywords: *Coffea arabica*; Agricultural mechanization; Mountain coffee growing; Coffee farming sustainability.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Mapas, do Brasil, estado do Espírito Santo e do município de Ibatiba contendo altimetria, local de realização do estudo.....	26
Figura 2. Abertura dos microterraços utilizando miniescavadora hidráulica.....	27
Figura 3. Mapa temático da altitude da lavoura com a indicação dos pontos amostrais marcados em grid irregular.....	28
Figura 4. Mapa temático da disponibilidade K (a) e P (b) da lavoura no ano de 2019.....	37
Figura 5. Mapas temáticos: a) massa de fertilizantes por metro linear distribuída pela adubadora tratorizada; b) massa de fertilizantes através da distribuição pontual.....	39
Figura 6. Mapas temáticos: a) desvios (CDR _i) do fertilizante distribuído de forma mecanizada em relação a dose média recomendada b) desvios (CDR _i) da distribuição pontual em relação a dose distribuída pela adubadora tratorizada.....	40
Figura 7. Mapa temático da produtividade da lavoura na safra 2019/2020.....	41
Figura 8. Box plot referente aos dados de largura (a) e inclinação dos microterraços da lavoura (b).....	42
Figura 9. Mapa temático do comprimento (a) e inclinação dos microterraços (b).....	42

CAPÍTULO II

Figura 1. Mapas, do Brasil, estado do Espírito Santo e do município de Ibatiba contendo altimetria, local de realização do estudo.....	51
Figura 2. Mapa temático da altitude da lavoura com a indicação dos pontos amostrais marcados em grid irregular.....	52
Figura 3. Valores médios dos atributos físicos de solo mensurados na linha de cultivo, no terraço e nas projeções dos rodados dos tratores (pré e pós-passada)	59
Figura 4. Médias e desvios para a pressão máxima à penetração do solo.....	62
Figura 5. Distribuição dos valores de pressão máxima e profundidade da pressão máxima mensurada na linha de cultivo (a) e na região do microterraço (b).....	63

Figura 6. Mapas temáticos da Pressão máxima (MPa) mensurada na região dos microterraços (a) e na linha de cultivo antes da distribuição de fertilizantes mecanizada.....	64
Figura 7. Distribuição dos valores de pressão máxima e profundidade da pressão máxima mensurada sob o rodado esquerdo do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c).....	65
Figura 8. Mapas temáticos da Pressão máxima (MPa) mensurada sob o rodado esquerdo do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c).....	66

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e físico-químicos e das frações granulométricas do solo.....	33
Tabela 2. Modelos e parâmetros do variograma médio escalonado para o potássio e fósforo disponíveis no ano de 2019.....	36
Tabela 3. Estatística descritiva da distribuição mecanizada e pontual de fertilizante, produtividade da safra 2019/20, largura e inclinação dos microterraços.....	37
Tabela 4. Modelos e parâmetros do variograma médio escalonado para a distribuição mecanizada e pontual de fertilizante, produtividade da safra 2019/20, largura e inclinação dos microterraços.....	38

CAPÍTULO II

Tabela 1. Pressão máxima (P. Máxima), profundidade da pressão máxima e do solo, porosidade total, volume de macro e microporos, e densidade de solo mensuradas nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais (linha, terraço, rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do terraço)	57
Tabela 2. Médias de porosidade total, volume de macro e microporos, e densidade de solo, mensuradas no período pós passada na região do rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do terraço.....	60
Tabela 3. Modelos e parâmetros do variograma médio escalonado para a pressão máxima mensurada nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais (linha, terraço, rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do terraço)	62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. REFERÊNCIAS	20
2. OBJETIVOS	21
2.1. Objetivo geral	21
2.2. Objetivos específicos	21
3. CAPÍTULO I - <i>Fertilidade do solo, qualidade da distribuição de fertilizante e produtividade em lavoura cafeeira microterraceada.</i>	22
3.1. Resumo	22
3.2. Abstract	23
3.3. INTRODUÇÃO	24
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.6. CONCLUSÕES	43
3.7. REFERÊNCIAS	43
4. CAPÍTULO II – <i>Efeito do tráfego de máquinas sobre características físicas do solo em lavoura de cafeeiro arábica microterraceada.</i>	47
4.1. Resumo	47
4.2. Abstract	48
4.3. INTRODUÇÃO	49
4.4. MATERIAL E MÉTODOS	51
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.6. CONCLUSÕES	68
4.7. REFERÊNCIAS	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73

1. INTRODUÇÃO

O estado do Espírito Santo é o terceiro maior produtor de *Coffea arabica* L do Brasil, sendo esta espécie importante para a positividade da balança comercial do agronegócio capixaba e brasileira. As lavouras de café arábica do estado, estão localizadas em regiões montanhosas, onde o clima ameno permite o cultivo. De acordo com dados do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), atualmente existem cerca de 143 mil hectares de café arábica em produção no estado, envolvendo 48 municípios e aproximadamente 53 mil famílias (INCAPER, 2022), que produziram no ano de 2021 cerca de 2,94 mi de sacas beneficiadas de café arábica, o que representou 9,4% da produção nacional (CONAB, 2022), e indica a importância socioeconômica dessa cultura.

Os cultivos de cafeeiros arábica no Estado do Espírito Santo são realizados, em quase a sua totalidade, em áreas declivosas, onde a adoção de sistemas mecanizados para a condução das lavouras é praticamente inexistente. Aliados a esse fato, pela maioria dos estabelecimentos rurais que produzem bebidas dessa espécie serem de agricultores familiares, os níveis tecnológicos empregados são ainda baixos (DIAS et al., 2021). Höfig e Araújo-Junior (2015) comentam que a declividade das áreas é o principal fator limitante para a utilização da mecanização na agricultura. No caso da cultura do café, a ausência de processos mecanizados em diversas etapas, tem comprometido a competitividade de regiões de montanha em relação a outras do Brasil onde a mecanização está presente em todo o processo produtivo, inclusive na época da colheita (ROYO; GONÇASLVES, 2011).

As condições topográficas adversas para o trânsito de máquinas nas lavouras de café arábica, nas regiões de montanhas ao redor do Parque Nacional do Caparaó, fazem com que os produtores realizem os tratos culturais nas lavouras utilizando diretamente mão-de-obra, com o(a) trabalhador(a) caminhando nas entre linhas da cultura, tais como: aplicação de corretivos, adubações, aplicação de produtos via pulverização e colheita. Este fato proporciona manejo sem a precisão devida, sem a racionalização de insumos e de mão-de-obra, levando a aumento no custo de produção e não conseguindo, em alguns casos, aumento de produtividade.

A utilização de grande quantidade de mão-de-obra em todos os sistemas de produção agrícola concorre para aumento significativo dos custos de produção. Em

cultivos de café em áreas montanhosas, esse fato pode elevar os custos de produção a ponto de inviabilizar economicamente a atividade (ALVES et al., 2017). Dentre as etapas de produção de café, a colheita é a que oferece mais entraves para os produtores rurais. Independente do sistema adotado, a colheita de café é uma etapa delicada onde se pode perder todo o investimento e esforço dispendido durante o ano agrícola (OLIVEIRA et al., 2007). Na tentativa de contornar os problemas na colheita, tem sido utilizada a colheita semimecanizada, com derrçadoras portáteis que, apesar de não dispensar totalmente a mão-de-obra, reduz drasticamente o número de pessoas envolvidas com o processo de colheita, minimizando custos (BARBOSA et al., 2005).

A utilização de sistemas semimecanizados para a colheita é uma alternativa interessante e viável para a cafeicultura de montanha (SALES et al., 2015). Entretanto, não resolve os problemas da impossibilidade de utilização de sistemas mais completos e eficientes. Nesse sentido, nos últimos anos tem crescido a utilização de microterraceamento em áreas declivosas, visando oferecer condições para o tráfego de máquinas e, conseqüentemente, mecanizar inúmeras etapas de manejo (TRISTÃO et al., 2019).

O microterraceamento consiste na movimentação de terra nas entrelinhas de cultivo, formando estradas planas que possibilita o deslocamento de pequenos tratores, tracionando ou não implementos agrícolas (SOUZA et al., 2018; TRISTÃO et al., 2019). Alves et al. (2017) comentam que a utilização de microterraços contribui para a melhoria dos sistemas produtivos, permitindo a entrada de máquinas onde era impossível e elevando a eficiência operacional em localidades onde os usos eram restritos.

Apesar da iminente potencialidade dos microterraços para a utilização de manejos mecanizados na cultura do café, ainda são escassas as informações acerca do efeito da grande movimentação de terra para abertura das estradas nas entrelinhas sobre o solo e a cultura. Essa lacuna deixa dúvidas acerca da sustentabilidade do sistema de produção ao longo do tempo, sendo importante a execução de trabalhos que avaliem, de forma ampla: as condições de degradação física e química do solo; o comportamento temporal das plantas; os aspectos de manejo da fertilidade do solo, e; o estado nutricional das plantas.

No momento, os estudos sobre a viabilidade dos microterraços não estão avaliando o desempenho das máquinas agrícolas utilizadas, assim como são escassos os trabalhos para avaliar a sustentabilidade dos sistemas de cultivo de café microterraceados, onde são inexistentes aqueles que avaliam aspectos relacionados às máquinas e implementos agrícolas nas mais distintas etapas de manejo da cultura. O desenvolvimento de pesquisas que abordem esses temas pode oferecer importantes informações para a indicação ou não das práticas de microterraceamento, bem como para determinar aspectos a serem melhorados e as condições de recomendação da prática.

1.1. REFERÊNCIAS

ALVES, E.L.; PEREIRA, F.A.C.; DALCHIAVON, F.C. Potencial econômico da utilização de microterraceamento em lavouras de café: um estudo de caso. **Revista iPecege**, v. 3, n. 1, p. 24-38, 2017.

BARBOSA, J.A.; SALVADOR, N.; SILVA, F.M. Desempenho operacional de derrçadores mecânicos portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 129-132, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento de safra brasileira – Safra Brasileira de Café: Segundo levantamento, maio 2022 – safra 2021/2022.: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>

DIAS, R.; DE MUNER, L. H.; FORNAZIER, M.; GUARÇONI, R.; ALIXANDRE, F.; KROHLING, C. Indicação geográfica: café das montanhas do Espírito Santo. **Incaper em Revista**, Vitória, v. 11 e 12, p. 06-24, 2021.

HÖFIG, P.; ARAUJO-JUNIOR, C.A. Classes de declividade do terreno e potencial para mecanização no estado do Paraná. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 195 - 203, 2015.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Cafeicultura. Governo do Estado do Espírito Santo - Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. Disponível em: <<<https://incaper.es.gov.br/cafeicultura>>> Acesso em 07/07/2022.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; SALVADOR, N.; SOUZA, Z.M.; CHALFOUN, S.M.; FIGUEIREDO, C.A.P. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.827-831, 2007.

ROYO, J.; GONÇALVES, F. Cafeicultura: a revista do agronegócio. Disponível em: <<http://www.revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=38732>>. Acesso em: 13 set 2017.

SALES, R. S.; SILVA, F. M. D.; SILVA, F. C. D. Doses de ruído a qual estão submetidos operadores de derrçadoras portáteis de café. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 169 - 175, 2015.

SOUZA, G. S.; SILVA, S. A.; LIMA, J. S.; VERDIN FILHO, A. C.; INFANTINO, M. B.; KROHLING, C. A. Avanços na mecanização do cafeeiro conilon. **Incaper em revista**, Vitória, v. 9, p. 31-41, 2018.

TRISTÃO, F. A.; KROHLING, C. A.; DE MUNER, L. H.; SOUZA, M. F.; FORNAZIER, M. J. Tendências para a sustentabilidade da cafeicultura de arábica em regiões de montanha. **Incaper em Revista**, Vitória, v. 10, p. 105-124, 2019.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar os atributos químicos e físicos do solo, a qualidade da distribuição mecanizada de fertilizantes e a produtividade em lavoura cafeeira microterraceada.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos, físico-químicos e químicos do solo.
- Avaliar a qualidade física e química dos solos em lavoura cafeeira microterraceada.
- Avaliar a produtividade da lavoura cafeeira microterraceada.
- Estudar o efeito do tráfego de máquinas sobre características físicas do solo das entrelinhas microterraceadas.

3. CAPÍTULO I - *Fertilidade do solo, qualidade da distribuição de fertilizante e produtividade em lavoura cafeeira microterraceada.*

3.1. Resumo

Nos últimos anos tem crescido a utilização de microterraceamento em áreas declivosas, visando oferecer condições para o tráfego de máquinas e, conseqüentemente, a mecanização de inúmeras etapas de manejo. Apesar da potencialidade dos microterraços, ainda são escassas as informações acerca da sustentabilidade do sistema de produção ao longo do tempo, sendo importante a execução de trabalhos que avaliem, de forma ampla: as condições de degradação química do solo, o comportamento temporal das plantas, os aspectos de manejo da fertilidade do solo, e o estado nutricional das plantas. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a qualidade química do solo, a qualidade da distribuição de fertilizante e produtividade do cultivo de cafeeiro microterraceado. O estudo foi realizado em uma lavoura de café arábica com as entrelinhas microterraceadas, variedade catuaí vermelho com 11 anos de idade, no município de Ibatiba-ES. Foi montado na área um grid amostral irregular contendo 100 pontos amostrais georreferenciados. As amostras de solo foram coletadas na projeção das copas das plantas, na profundidade de 0-0,20m, para avaliar a fertilidade do solo. Uma adubação mecanizada foi realizada visando avaliar a uniformidade de distribuição do fertilizante. Obteve-se a produtividade da lavoura e mensurou-se a largura e inclinação dos microterraços, para avaliação da influência destes sobre a uniformidade de distribuição de fertilizantes. Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas clássicas e geoestatística. Observou-se elevada variabilidade nos atributos químicos do solo, mostrando regiões de baixa disponibilidade de nutrientes. A massa de fertilizante distribuída por metro linear foi inferior à dose fixa recomendada, sendo afetada pela topografia irregular da lavoura e irregularidades da superfície dos microterraços e, principalmente, às variações de sua largura muitas vezes inferior a 2m. As, estradas estreitas e grande oscilação na inclinação destas “ruas”, foram responsáveis pela desuniformidade na distribuição de fertilizantes pela adubadora tratorizada. Ainda assim, a produtividade média de café beneficiado foi muito superior à média nacional e à do estado do Espírito Santo, embora tenha se encontrado elevada variabilidade espacial da produtividade na lavoura.

Palavras chave: Cafeicultura de montanha; Nutrição de plantas; *Coffea arabica*; mecanização agrícola.

3.2. Abstract

In recent years, the use of microterrace in sloping areas has grown, aiming to provide conditions for the traffic of machines and, consequently, the mechanization of numerous stages of management. Despite the potential of microterraces, there is still little information about the sustainability of the production system over time, and it is important to carry out works that broadly assess: the conditions of chemical soil degradation, the temporal behavior of plants, aspects of soil fertility management, and the nutritional status of plants. In this sense, the objective was to evaluate the chemical quality of the soil, the quality of fertilizer distribution and productivity of microterrace coffee cultivation. The study was carried out in an arabica coffee plantation with microterrace between the lines, red catuaí variety with 11 years of age, in the municipality of Ibatiba-ES. An irregular sampling grid was set up in the area containing 100 georeferenced sampling points. Soil samples were collected in the projection of the plant crowns, at a depth of 0-0.20m, to assess soil fertility. A mechanized fertilization was carried out in order to evaluate the uniformity of fertilizer distribution. The productivity of the crop was obtained and the width and slope of the micro terraces were measured, in order to evaluate their influence on the uniformity of fertilizer distribution. The data obtained were submitted to classical statistical and geostatistical analyses. High variability in soil chemical attributes was observed, showing regions of low nutrient availability. The fertilizer mass distributed per linear meter was lower than the recommended fixed dose, being affected by the irregular topography of the crop and irregularities in the surface of the micro terraces and, mainly, by the variations in their width, often less than 2 m. The narrow roads and great oscillation in the slope of these "streets" were responsible for the uneven distribution of fertilizers by the tractor fertilizer. Even so, the average productivity of processed coffee was much higher than the national average and that of the state of Espírito Santo, although a high spatial variability of productivity was found in the crop.

Keywords: Mountain coffee growing; Plant nutrition; *Coffea arabica*; agricultural mechanization.

3.3. INTRODUÇÃO

O parque cafeeiro do Espírito Santo ocupa em 2022 área superior a 440 mil hectares, dos quais 143 mil são cultivados pela espécie de *Coffea arábica* (CONAB, 2022). As plantações de café arábica estão localizadas principalmente nas regiões montanhosas do Sul-Caparaó e Centro-Serrana, que representam 92% da produção total (INCAPER, 2022). O café arábica é a principal fonte de renda em 80% das propriedades rurais capixabas localizadas em terras frias e montanhosas. Os municípios de Brejetuba, Iúna, Vargem Alta, Ibatiba, Muniz Freire, Irupi, Afonso Claudio, Domingos Martins, Ibitirama, Castelo, Mimoso do Sul e Santa Teresa se caracterizam como os principais produtores de café arábica (INCAPER, 2022).

A falta de mão de obra no campo se tornou um dos principais problemas enfrentados pela cafeicultura brasileira (SOUZA et al., 2018). Esse problema tem obrigado cafeicultores a buscarem trabalhadores em regiões distantes das regiões produtoras, o que eleva o custo de produção e o risco da atividade (ALVES et al., 2017). Assim, a mecanização agrícola é uma alternativa para garantir a viabilidade técnica e econômica do cultivo de café, sendo uma solução para a baixa disponibilidade de mão de obra em algumas regiões, baixo rendimento operacional, insegurança da colheita e pode contribuir de forma significativa na redução do custo de produção e melhoria da qualidade dos grãos (SOUZA et al., 2018).

Para a cafeicultura de montanha, a topografia do terreno tem sido o principal fator que intervém na adoção de sistemas mecanizados nas propriedades agrícolas, principalmente nas regiões produtoras de café arábica. A realização de certas atividades pode ser limitada em regiões de topografia acidentada, por não permitirem o tráfego das máquinas com estabilidade.

O microterraceamento pode proporcionar uma maior eficiência no trabalho em lavouras em áreas declivosas, principalmente por proporcionar o uso da mecanização (SOUZA et al., 2018). Os microterraços são espaços horizontais criados pelo homem, para permitir ou facilitar o cultivo em terrenos inclinados, como colinas e montanhas (WEI et al., 2016). Contribuem para a movimentação de microtratores, tratores de bitola estreita e outros veículos motorizados ajustados à largura do patamar.

O microterraceamento apresenta importante papel na conservação do solo, uma vez que os microterraços podem reduzir o processo erosivo e,

consequentemente, as perdas de solo, água e nutrientes e favorecem a infiltração de água no solo (MATIELLO et al., 2015; SOUZA et al., 2018).

O levantamento da fertilidade dos solos no Estado do Espírito Santo, mostrou que, cerca de 89% dos solos capixabas apresentavam de média a alta acidez potencial, baixa CTC efetiva e baixos valores de pH, indicando pequena reserva de nutrientes para as plantas (PIRES et al., 2003). Tais resultados, reforçam a importância do manejo de correção e adubação do solo, visando reduzir a toxidez de Al e aumentar a disponibilidade dos nutrientes para as plantas.

A baixa fertilidade do solo reflete em uma baixa produtividade das culturas (SANTI et al., 2012), o que não é diferente no cafeeiro, uma planta com elevada exigência nutricional (BRAGANÇA et al., 2017). A baixa disponibilidade de nutrientes e a compactação do solo limitam o desenvolvimento das raízes e o movimento da água e nutrientes no mesmo (SANTI et al., 2012; NAWAZ et al., 2013).

Vários fatores, sejam de origem natural ou antrópica, provocam a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo. Desta maneira, o estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é uma importante ferramenta na compreensão da distribuição espacial dos nutrientes no solo, fundamental no auxílio à tomada de decisão que vise atender as exigências nutricionais nas lavouras cafeeiras (FERRAZ et al., 2012; SANTOS et al., 2015).

Desta forma, objetivou-se avaliar a qualidade química do solo, a qualidade da distribuição de fertilizante e a produtividade do cultivo de cafeeiro microterraceado.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área cultivada com *Coffea arabica* L. com declividade acentuada (em média 28%). A lavoura está localizada no município de Ibatiba, região do Caparaó, no Estado do Espírito Santo, na Fazenda Boa Esperança, a 20°16'45.20" de latitude S e 41°29'15.35" de longitude W (Figura 1). O Clima da região é subtropical úmido classificado como Cwa de acordo com a classificação de Köppen e Geiger. Apresenta temperatura média anual de 20.0 °C, com pluviosidade média anual de 1116 mm (climate-data.org, 2022).

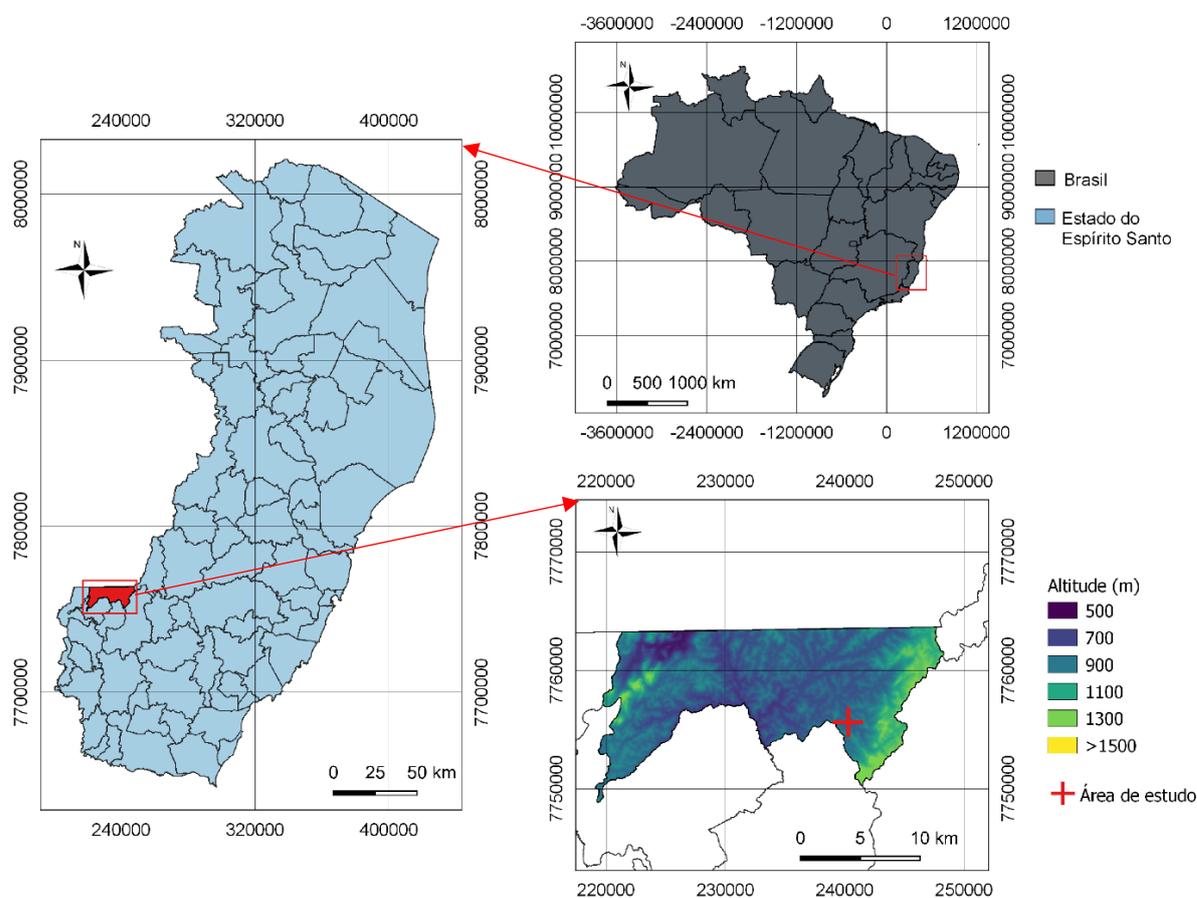


Figura 1. Mapas do Brasil, Espírito Santo e do município de Ibatiba contendo altimetria e o local de realização do estudo.

A lavoura de cafeeiro arábica variedade Catuaí vermelho, apresentava na época do estudo 11 anos de idade, espaçamento de 2,5m entrelinhas e 1m entre plantas. Os tratos culturais realizados periodicamente são a adubação, desbrota e manejo de pragas e doenças. Também é realizado o reparo dos microterraços (Figura 2), e de 4 em 4 anos é realizado o “esqueletamento” da lavoura, onde, a cada três

safras, a quarta é conhecida como safra zero, pois a lavoura é esqueletada após terceira colheita. A área encontra-se microterraceada, sendo realizado essa pratica foi realizada com a lavoura já implantada. O proprietário da lavoura utilizou uma miniescavadora hidráulica da marca Yanmar, modelo Vi055 com cabine fechada para o operador, montada com lâmina dianteira e se movimentando pra frente. Foi utilizada na escavação e revolvimento do solo conforme a declividade, na construção e manutenção dos microterraços (Figura 2). Estes, consistem em pequenas estradas construídas nas entrelinhas do cafeeiro, o que permite o deslocamento de máquinas agrícolas de bitolas estreitas ajustadas a largura da seção transversal da entre linha, permite também um melhor trânsito de pessoas, uma vez que se tem uma superfície menos inclinada, proporcionando melhorias na execução dos tratos culturais.



Figura 2. Abertura dos microterraços utilizando miniescavadora hidráulica.

Foi montado na área um grid amostral irregular contendo 100 pontos amostrais, sendo cada um composto por 3 plantas (uma central e duas vizinhas na linha de cultivo), conforme Figura 3. Os pontos foram marcados com etiquetas metálicas e as coordenadas geográficas determinadas por meio de sistema GNSS LAND-PAK SF-

3040 da NavCom-John Deere de dupla frequência, referenciado ao Sistema Geodésico Brasileiro através da técnica de Posicionamento por Ponto Preciso-PPP do Serviço online para pós-processamento de dados GNSS – IBGE, tendo como datum o SIRGAS 2000, referencial oficial a ser utilizado em todo o território brasileiro. (IBGE, 2017). Obteve-se as coordenadas de latitude e longitude e a sua altimetria.

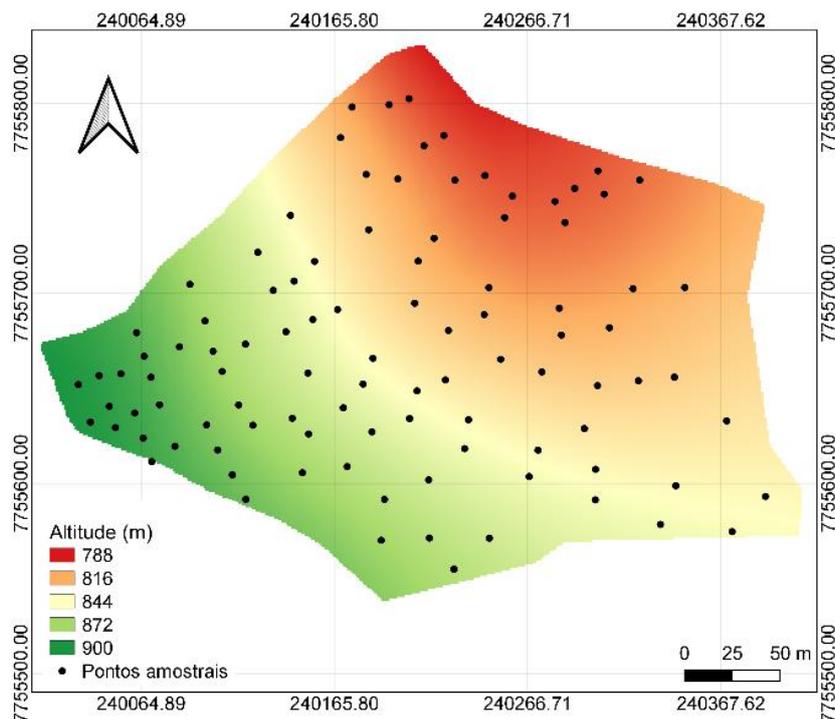


Figura 3. Mapa temático da altitude da lavoura com a indicação dos pontos amostrais marcados em grid irregular.

No mês de setembro de 2019 foram coletadas 100 amostras de solo com auxílio de uma sonda inoxidável, na camada de 0-0 a 0,20 m, na projeção da copa das plantas que compõem cada ponto amostral. As amostras foram encaminhadas para laboratório de solo para análise e determinação da disponibilidade de: fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), enxofre (S), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e boro (B). Foram determinados ainda: acidez ativa (pH em H_2O), acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), soma de bases trocáveis (SB), capacidade efetiva de troca de cátions (t), capacidade potencial de troca de cátions (T), índice de saturação por bases (V%), índice de saturação por alumínio (m%), teor de matéria orgânica (MO) e os níveis de fósforo remanescente (P-rem).

A composição granulométrica das amostras foi determinada pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 12 h, seguindo metodologia apresentada pela Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017). A fração argila foi separada por sedimentação, de acordo com a Lei de Stokes, sendo a fração silte determinada por diferença. A fração areia foi subdividida em areia grossa e areia fina.

Conforme o Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o cafeeiro arábica no estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007), utilizando o valor médio de K disponível no solo, foram distribuídos 1200 kg do adubo NPK formulado 20-00-20 por hectare (SAFRA 2019/20), em dois momentos, uma adubação em novembro de 2019 e outra em fevereiro de 2020, no qual foram distribuídos 0,15 kg do fertilizante NPK por planta⁻¹ em cada aplicação.

Uma adubação foi realizada de forma mecanizada, com a distribuição do fertilizante granulado (NPK 20-00-20) conforme o plano de adubações pré-estabelecido para a lavoura. A operação mecanizada de distribuição de fertilizantes granulados foi realizada em 11 linhas de cultivo de café microterraceadas. Para a adubação foi utilizada uma adubadora acionada pelo controle remoto do trator, montada no sistema hidráulico, modelo Komander 600HP (Kamaq Máquinas e Implementos Agrícolas), equipada com dosador volumétrico, distribuidor centrífugo de dois discos e defletores para aplicação direcionada à linha de plantio. O trator utilizado para tração foi um modelo BCS Invictus K600 RS de 65 CV com cabine para operador, e tração dianteira assistida. O trator foi operado a uma velocidade média de 4,5 km/h, próximo à rotação de potência máxima na terceira marcha reduzida.

Antes das aplicações foram realizadas as regulagens e testes para assegurar as condições de funcionamento do conjunto mecanizado para a distribuição da dose recomendada. A rotação de trabalho, relação de transmissão e velocidade de deslocamento do trator foram determinadas a partir das curvas características dos motores e dos testes realizados preliminarmente.

Para avaliação da uniformidade de distribuição dos fertilizantes foram distribuídos, na projeção da copa das plantas de cada ponto amostral, coletores plásticos de área conhecida. Foram utilizados tantos coletores quantos necessários para compreender uma largura de aproximadamente 1m. Após a aplicação

mecanizada, foram recolhidos os fertilizantes que caíram nos coletores, determinando-se a massa aplicada em cada ponto.

Em complementariedade, utilizando-se do mesmo critério para recomendação da adubação (PREZOTTI et al., 2007) calculou-se, com base nos teores de K, para cada ponto amostral uma adubação diferente (distribuição pontual de fertilizantes).

A produtividade em cada ponto foi mensurada na safra 2019/2020. A colheita foi realizada quando os grãos apresentaram maturação superior a 80%, por derrça manual em cada um dos 100 pontos amostrais. Para estimar a massa de café beneficiado de cada ponto amostral, foi retirada uma amostra de 1,0 kg do café úmido de cada ponto, para secagem em estufa a 40° C até atingir $\pm 12\%$ de umidade (SILVA et al., 2010). Após, as amostras foram beneficiadas e pesadas, obtendo-se a massa de café beneficiado. Usou-se os valores obtidos para o cálculo da produtividade.

Para caracterização dos microterraços e avaliação da influência destes sobre a uniformidade de distribuição de fertilizantes, foi determinada a sua inclinação e largura, em cada ponto amostral. Para a determinação da largura, utilizou-se uma trena graduada mensurando a distância entre a base cortada no lado superior e a extremidade inferior da entrelinha. Para avaliação da inclinação dos microterraços utilizou-se uma estrutura constituída por duas estacas metálicas e uma haste horizontal deslizante. As estacas foram posicionadas nas duas extremidades dos microterraços e a haste horizontal apoiada sobre estas e nivelada utilizando-se um nível de bolha. Com o auxílio de uma trena graduada determinou-se a altura da haste horizontal em relação ao solo na região próxima à cada uma das estacas (cotas). Calculando-se a diferença entre as duas cotas e relacionando-a com o comprimento do microterraço, determinou-se a sua inclinação percentual. Esse procedimento foi realizado para cada um dos 100 pontos da grade amostral.

Utilizando-se os dados dos desvios da distribuição mecanizada do adubo x dose de 0,15 kg NPK planta⁻¹, obteve-se três classes (pior desvio, médio e menor desvio) e nos mesmos pontos correspondentes a estas classes, utilizou-se cinco pontos e obteve-se o valor médio da largura e inclinação dos microterraços a fim de analisar possíveis fatores que afetaram a uniformidade de distribuição mecanizada dos fertilizantes.

Os dados da análise química, granulométrica, produtividade, uniformidade de distribuição e recomendação pontual de fertilizantes, além dos dados de largura e

inclinação dos microterraços foram submetidos a análise descritiva para determinação das medidas de posição, dispersão e forma da dispersão. A normalidade foi testada utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de probabilidade.

Para determinar a variabilidade espacial, os dados de produtividade, uniformidade de distribuição mecanizada de fertilizantes, recomendação pontual de fertilizantes, a largura e inclinação dos microterraços foram submetidas a análises geoestatísticas, a fim de verificar a existência e, neste caso, quantificar o grau de dependência espacial, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais.

A dependência espacial entre as observações pode ser expressa por meio do variograma, estimado pela equação:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \text{ com } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (1).$$

Em que $\gamma(h)$ é a semivariância, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pela distância h

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, foram determinados os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), variância estrutural (C_1) e alcance (a). Para análise do índice de dependência espacial (IDE), foi utilizada a relação $C_0/(C_0+C_1)$ e os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994), que consideraram a dependência espacial fraca ($IDE > 75 \%$), moderada ($25 \% \leq IDE \leq 75 \%$) e forte ($IDE < 25 \%$). Os variogramas foram escalonados pela variância dos dados para permitir a comparação das estruturas de dependência espacial das diferentes variáveis.

Comprovada a dependência espacial, utilizou-se o método de interpolação de krigagem ordinária para estimar valores em locais não medidos (VIEIRA, 2000) e confeccionar os mapas temáticos para descrever o comportamento dos atributos do solo analisados na lavoura. A krigagem ordinária se utiliza de uma combinação linear dos n valores observados para cada atributo, conforme equação 2:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \text{ com } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

Em que: $Z^*(x_0)$ é o valor estimado; λ_i são os pesos atribuídos a cada ponto utilizado na estimativa de $Z^*(x_0)$; $Z(x_i)$ é o valor observado utilizado para estimar os não medidos.

A krigagem ordinária não requer o prévio conhecimento da média m e minimiza a variância do erro na condição $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, os pesos λ_i são obtidos a partir do sistema de equações da krigagem ordinária (VIEIRA, 2000):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0) \text{ para } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Em que: $C(x_i, x_j)$ e $C(x_i, x_0)$ são, respectivamente, a semivariância entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 ; α é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

As análises estatísticas clássicas foram realizadas no software Excel. As análises geoestatísticas, as interpolações e a construção dos mapas temáticos foram realizadas no software QGIS, versão 3.16.10.

Obteve-se o Coeficiente de desvios relativos - CDRi em % (Equação 4), com intuito de se avaliar se houve irregularidade/heterogeneidade na distribuição mecanizada do adubo em relação à dose fixada. Além disso, obteve-se um novo CDRi para se avaliar o desvio entre a aplicação com dose única em relação a uma aplicação a taxa variável (recomendação pontual). E, então foram construídos mapas temáticos referentes a distribuição de fertilizantes com dose fixa e a taxa variável e seus respectivos CDRi's anteriormente mencionados.

$$CDRi = \left[\frac{(X1 - X2)}{X2} \right] * 100 \quad (4)$$

Em que $X1$ refere-se a quantidade de fertilizante aplicada mecanicamente e $X2$ a dose média recomendada.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva dos atributos químicos do solo para a safra 2019/2020 e os resultados da análise das frações granulométricas do solo.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e físico-químicos e das frações granulométricas do solo.

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV (%)	Cs	Ck	K-S
pH	4,88	4,90	4,30	5,50	5,29	0,09	-0,45	0,12 ^{ns}
K ⁺	74,82	67,50	35,00	170,00	37,01	1,03	1,26	0,12 ^{ns}
P	4,81	3,60	2,20	28,90	83,38	1,31	1,55	0,28*
P-Rem	22,46	22,50	16,70	28,20	10,14	0,15	-0,06	0,08 ^{ns}
Ca ²⁺	1,60	1,50	0,80	2,80	29,92	0,39	-0,52	0,09 ^{ns}
Mg ²⁺	0,52	0,50	0,30	0,90	30,78	0,49	-0,60	0,18*
Al ³⁺	0,65	0,60	0,10	1,70	54,81	0,67	0,00	0,12 ^{ns}
H+Al	5,88	5,80	3,30	8,70	14,48	-0,25	1,32	0,11 ^{ns}
S	24,14	23,00	10,00	49,00	28,43	0,69	1,12	0,10 ^{ns}
Mat Org	2,77	2,80	1,90	3,80	12,81	0,01	0,40	0,12 ^{ns}
Zn	1,35	1,30	0,50	4,50	45,77	0,09	0,52	0,19*
B	0,42	0,40	0,20	1,10	35,56	0,58	0,28	0,18*
Cu	0,35	0,30	0,10	1,10	56,64	0,45	-0,17	0,21*
Fe	131,59	120,50	48,00	375,00	38,56	0,45	-0,01	0,12 ^{ns}
Mn	12,11	10,60	2,00	60,30	76,58	-0,57	0,48	0,14*
SB	2,31	2,25	1,25	3,80	27,58	0,33	-0,70	0,08 ^{ns}
CTC	8,19	8,15	5,69	10,00	9,39	-0,17	0,19	0,05 ^{ns}
V	28,25	27,90	13,00	49,40	26,94	0,50	-0,09	0,07 ^{ns}
M	22,89	21,30	2,80	56,70	57,86	0,49	-0,56	0,09 ^{ns}
AG	227,31	226,00	174,00	284,00	10,26	0,11	-0,4	0,65*
AF	309,87	311,00	219,00	409,00	11,09	0,01	0,11	0,69*
SIL	104,37	105,00	82,00	135,00	11,70	0,26	-0,51	0,10 ^{ns}
ARG	358,44	358,44	312,00	408,00	6,58	0,20	-1,06	0,003 ^{ns}

AG (areia grossa), AF (areia fina), SIL (silte) e ARG (argila) em g.kg⁻¹; CV – coeficiente de variação; Cs e Ck – coeficiente de assimetria e curtose, respectivamente; K-S – teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com o Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007), quando observa-se os valores médios, dos atributos: fósforo, cobre, saturação por bases e saturação por alumínio são classificados como baixos; os valores de pH demonstram acidez elevada; enquanto o cálcio, magnésio, potássio, alumínio, ferro, zinco, boro, soma de bases, CTC e matéria orgânica são classificados como médio; por fim, o manganês, a acidez potencial, e o enxofre são classificados como alto.

Os valores baixos de pH na área, indicam acidez elevada, o que interfere na disponibilidade de nutrientes em solução. Nessas condições, conforme Ernani (2008) características desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas como o baixo teor de bases trocáveis (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}); baixa CTC efetiva; teores elevados de Al^{3+} e de Mn^{2+} , que podem provocar toxidez às plantas; aumento na adsorção específica do P à superfície de óxidos de ferro e alumínio, o que diminui sua disponibilidade e ocasiona a menor eficiência das adubações (ERNANI, 2008).

Há influência do pH do solo na disponibilidade de nutrientes (TAIZ et al., 2017). Então, em valores de pH em água abaixo de 5,5, ocorre menor disponibilidade de vários nutrientes, como N, P, K, Ca, Mg, S e Mo, e aumento nos teores de Al^{3+} . Com isso, a faixa de pH, em água, ideal para a maioria das culturas, varia de 5,5 a 6,5, o que corresponde a valores de pH em $CaCl_2$ de 5,0 a 6,0, valores esses em que grande parte dos nutrientes minerais estão em maior disponibilidade para as plantas (ERNANI, 2008; MOREIRA; FAGERIA, 2010; TAIZ et al., 2017).

Resultados semelhantes foram encontrados por Machado et al. (2014) em lavouras de café arábica em regiões montanhosas, no qual o pH demonstrou acidez elevada, com altos teores de acidez potencial e baixos de fósforo, potássio, cálcio, soma de base, CTC efetiva e saturação de bases. Foram encontrados teores médios de magnésio e acidez trocável, e saturação por alumínio.

Guimarães et al. (2013) ao avaliarem a fertilidade do solo em duas lavouras de cafeeiro arábica (nos sistemas de cultivo convencional e orgânico) constataram que pH apresentou acidez elevada na lavoura de cafeeiro orgânico e acidez média na lavoura convencional. Níveis baixos de cálcio e fósforo foram encontrados na lavoura orgânica e baixa CTC efetiva em ambas lavouras, enquanto na lavoura convencional foram observados maiores teores de cálcio e fósforo.

Esses resultados demonstraram de que é comum encontrar baixa disponibilidade de nutrientes no solo, principalmente após a colheita e ocorre não apenas na lavoura estudada. Outras propriedades produtoras de café arábica em regiões de montanhas apresentam este problema, a ser corrigido na adubação. Outra questão é a utilização de adubos formulados (NPK) não levando em consideração outros nutrientes e até mesmo o resultado da análise do solo (FIGUEIREDO et al., 2013).

Dos atributos, classificados como baixos, o P atua no crescimento do sistema radicular influenciando no desenvolvimento vegetativo das plantas, formação de ATP, na fotossíntese (SILVA et al., 2019), sendo um nutriente que afeta a produtividade dos cafeeiros. O N e K são os nutrientes mais exigidos pela cultura, atuam no crescimento vegetativo, assim como, no florescimento e enchimento dos grãos. De maneira geral, a ordem de preferência da cultura pelos nutrientes segue conforme a sequência: N > K > Ca > Mg > S > P > B > Zn > Cu (BRAGANÇA et al., 2017).

A saturação de bases indicada para produtividades próximas de 60 sc ha⁻¹ é de 60%. Para produtividades maiores, que podem alcançar 150 sc ha⁻¹, têm sido utilizadas saturações por bases de 70 a 75% (PREZOTTI et al., 2007). Assim, a V média na lavoura encontrada está muito abaixo do que se espera para grandes produtividades. Assim, necessita de uma calagem mais efetiva, uma vez que, a calagem por elevar o pH do solo, aumenta a atividade microbiana, favorecendo a mineralização da matéria orgânica (MO) e liberando os nutrientes anteriormente ligados às cadeias carbônicas. Esses nutrientes, agora disponíveis, são facilmente absorvidos pelas plantas, desde que a mineralização ocorra próximo às raízes das plantas (BRAGANÇA et al., 2017; TAIZ et al., 2017).

Em relação a variabilidade dos dados analisada pelo coeficiente de variação, os atributos Al³⁺, o P e Mn foram os que apresentaram a maior variação, justificada pela maior amplitude (diferença entre valores máximo e mínimo) considerados com elevado CV (CV > 60%) com base no critério de Warrick e Nielsen (1980). Por outro lado, os atributos pH, MO e CTC foram os que apresentaram a menor variação, classificado como baixo (CV < 12%). Em virtude da variação elevada para diversos atributos de solo oito atributos inúmeros não apresentaram distribuição normal, conforme teste de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de probabilidade.

Com base nos dados levantados pode-se classificar o solo em função de sua granulometria como de textura argilosa, conforme o triângulo textural adotado pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo da EMBRAPA (SANTOS et al., 2018), sendo pertencente à classe dos Latossolos Amarelo conforme Cunha et al. (2016). Solos desta classe são intemperizados, o que justifica a baixa fertilidade encontrada.

A relação textural do solo interfere na força de tração disponível na barra de tração do trator e também na requerida pela adubadora. Em solos com textura argilosa, o deslizamento das rodas motrizes é de até 16% dependendo da condição e

cobertura do solo (SANTOS FILHO, 2001; CHIODEROLI et al., 2010; COELHO et al., 2012). Outro dado importante a observar a partir da interpretação da estatística descritiva é que os coeficientes de variação estão classificados como baixo, demonstrando que a área estudada possui homogeneidade textural, o que sugere que esta não é responsável pela variabilidade da eficiência da fertilização mecanizada.

O K depois do N, é um dos nutrientes requeridos em maior quantidade pela cultura do café, e a quantidade para adubação varia conforme produtividade desejada (MARTINEZ; NEVES, 2015; BRAGANÇA et al., 2017). Como o manejo da fertilidade usou como base a disponibilidade do K, na Figura 4a é apresentado um mapa temático da sua distribuição, juntamente com mapa da distribuição espacial do P (Figura 4b). Os modelos e parâmetros do variograma médio escalonado encontram-se na Tabela 2. O modelo que melhor se ajustou ao K disponível foi o Gaussiano com forte dependência espacial, enquanto o P disponível melhor se ajustou ao Esférico, com moderada dependência espacial.

Tabela 2. Modelos e parâmetros do variograma médio escalonado para o potássio e fósforo disponíveis no solo no ano de 2019.

Variáveis	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a (m)	IDE (%)	R ² (%)	SE(VC)
Potássio	Gaussiano	0,001	0,871	28	01	74	25,8
Fósforo	Esférico	0,52	1,052	93	33	78	1,45

C₀ – efeito pepita; C₀+C – patamar; a – alcance; IDE – índice de dependência espacial; R² – coeficiente de determinação do modelo; SE (VC) – coeficiente de determinação da validação cruzada.

De maneira oposta ao encontrado, Santos et al. (2015) encontraram melhor ajuste no modelo Esférico para o K, Gaussiano para o P. Silva et al. (2010) encontraram ajuste no modelo esférico para o K em lavoura de café arábica no sistema convencional, nas profundidades de 0-0,10m e 0,10-0,20m, enquanto para o P, os modelos que melhor se ajustaram foram o Esférico e o Exponencial para as respectivas profundidades avaliadas. De maneira semelhante ao encontrado no presente trabalho, Silva et al. (2010) encontraram moderada dependência espacial para o P e forte dependência espacial para o K.

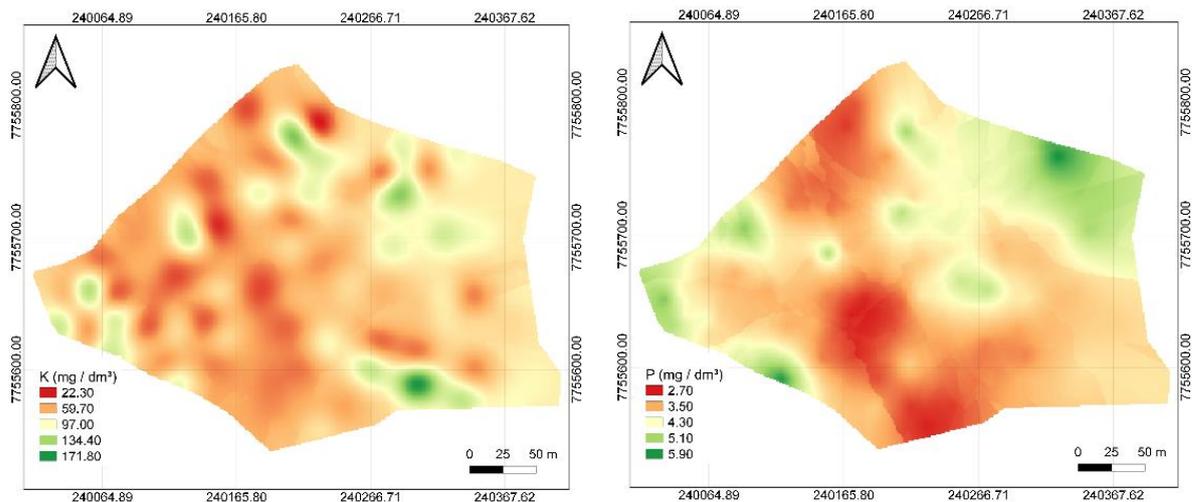


Figura 4. Mapa temático da disponibilidade K (a) e P (b) da lavoura no ano de 2019.

A elevada variabilidade na distribuição (disponibilidade) espacial do K e do P (Figura 4) demonstra haver necessidade de ajustes na adição dos nutrientes através de uma distribuição mais equilibrada para o bom desenvolvimento da cultura, uma vez que não apenas o K apresenta elevada variação na sua disponibilidade no solo. Uma alternativa é a aplicação do nutriente de forma diferenciada do que convencionalmente se tem feito, delimitando zonas homogêneas para o manejo (SILVA et al., 2010; SANTOS et al., 2015).

Na Tabela 3 encontram-se os dados referentes a análise estatística descritiva da distribuição de fertilizantes por meio da aplicação mecanizada (com base nos teores médios obtidos na análise de solos) e os dados do que seria uma recomendação pontual (aplicação a taxas variadas). Também se encontram resultados da produtividade na safra 2019/2020, do comprimento e inclinação dos microterraços.

Tabela 3. Estatística descritiva da distribuição mecanizada e pontual de fertilizante, produtividade da safra 2019/20, largura e inclinação dos microterraços.

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV (%)	Cs	Ck
Distribuição mecanizada (kg)	0,072	0,074	0,009	0,149	52,9	-0,07	-0,97
Distribuição pontual (kg)	0,198	0,218	0,131	0,250	16,1	-0,10	-0,94
Produtividade 2019/20 (sc)	109,66	112,21	15,00	188,54	27,4	-0,14	0,31
Largura microterraço (m)	1,98	2,00	1,68	2,31	7,20	0,00	-0,62
Inclinação microterraço (%)	4,24	3,98	-8,15	14,64	93,7	-0,26	0,12

CV – Coeficiente de variação; Cs – coeficiente de assimetria; Ck – coeficiente de curtose; kg – quilogramas; sc – sacas de 60kg de café beneficiado.

Os resultados referentes à análise geoestatística dos dados a partir da variabilidade das variáveis anteriormente citadas, encontram-se a seguir (Tabela 4). A massa de fertilizante distribuída por metro linear foi inferior à dose fixa recomendada (150 g.m^{-1}) em todos os pontos amostrais, oscilando de 9 a 149g por metro linear. Na figura 4a é possível visualizar esta variabilidade na distribuição realizada pela adubadora tratorizada.

Tabela 4. Modelos e parâmetros do variograma médio escalonado para a distribuição mecanizada e pontual de fertilizante, produtividade da safra 2019/20, largura e inclinação dos microterraços.

Variáveis	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a (m)	IDE (%)	R ² (%)	SE(VC)
Distribuição mecanizada	ESF	0,001	0,943	33	01	92	29,5
Distribuição pontual	ESF	0,060	0,913	26	07	72	29,45
Produtividade 2019/20	ESF	0,207	0,981	30	17	56	27,89
Largura microterraço	EXP	0,078	0,969	44	08	86	0,13
Inclinação microterraço	ESF	0,0007	0,941	30	01	65	3,71

C₀ – efeito pepita; C₀+C – patamar; a – alcance; IDE – índice de dependência espacial; R² – coeficiente de determinação do modelo; SE (VC) –SE predito validação cruzada; ESF - esférico; EXP – exponencial.

O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o esférico tanto para a distribuição mecanizada como a pontual, com alcances de 33m e 26m para as respectivas variedades, mostrando o mesmo padrão de distribuição espacial. Para o IDE, todas as variáveis analisadas conforme os critérios de Cambardella et al. (1994), são classificadas como forte índice de dependência espacial.

A heterogeneidade na distribuição mecanizada pode ser justificada pela topografia irregular da lavoura, que proporciona um desenvolvimento vegetativo distinto em diferentes altitudes, influenciando a uniformidade da operação. Outros fatores que concorreram para a desuniformidade de distribuição de fertilizantes estão associados às irregularidades da superfície dos microterraços e, principalmente, às variações de sua largura, muitas vezes igual e ou inferior à largura de trabalho da adubadora. Uma vez que a inclinação no terreno ou nos distribuidores altera a quantidade média de fertilizante distribuído e sua trajetória (FERREIRA et al., 2010; GARCIA et al., 2017).

Diante dos dados obtidos dos desvios na distribuição mecanizada em relação a dose fixa recomendada, realizou-se uma classificação com o coeficiente de desvios relativos em três classes (pior desvio, médio e menor desvio) e para os mesmos pontos amostrais, também se avaliou os dados de comprimento e inclinação dos microterraços. Observou-se que a classe de pior desvio (>92%) apresentou menor

largura média dos microterraços de 1,85 m e maior média de inclinação dos microterraços (4,9%), enquanto os da classe de desvio médio (53%) apresenta em média microterraços de 1,92 m de largura e 4,1% de inclinação e a classe de menor desvio (>9%) corresponde a microterraços mais largos, com média de 1,98 m de espessura e menor inclinação, em média de 1,9%.

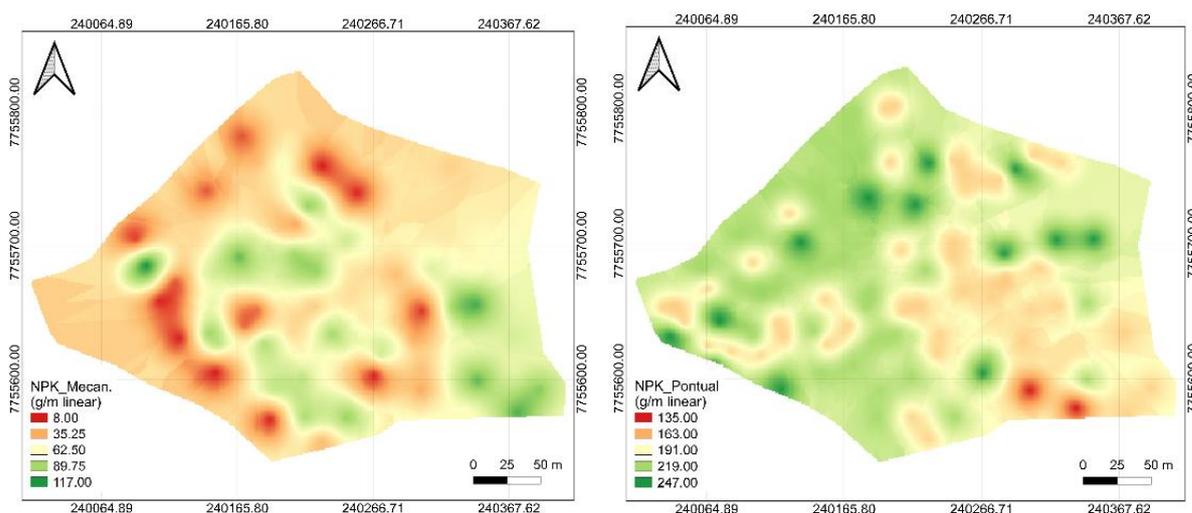


Figura 5. Mapas temáticos: a) massa de fertilizantes por metro linear distribuída pela adubadora tratorizada; b) massa de fertilizantes através da distribuição pontual.

Em decorrência desses fatos e nos locais onde estes problemas foram observados, o fertilizante não foi distribuído no local apropriado e provocou erros amostrais, dado que grande parte do fertilizante foi distribuído fora dos recipientes plásticos, principalmente, no microterraço abaixo do que estava sendo realizada a fertilização. Isso fica mais claro quando se observa o elevado CV de 52,9%. Somado a isso, o mapa dos desvios elaborado (Figura 6a) mostrou que as plantas receberam uma quantidade de fertilizante até 94 % inferior ao desejado, situação ruim quando se deseja alta produtividade, onde nenhum local na lavoura recebeu a quantidade adequada. O que está claro é que a distribuição do fertilizante nas condições realizadas não proporcionou resultados satisfatórios. Na Figura 5a encontra-se o mapa temático da massa de fertilizantes por metro linear distribuída pela adubadora tratorizada.

Com relação a distribuição pontual, a quantidade do fertilizante recomendada oscilou entre 0,13 e 0,25 kg por plantas. Quando se observa o mapa da distribuição pontual (Figura 5b), nota-se que o teor médio não atende consideravelmente a exigência nutricional de grande parte das plantas. Isso fica mais nítido ao observar o

mapa do desvio (Figura 6b) da quantidade recomendada pontualmente em relação a distribuição a dose fixa, observando-se uma pequena região vermelha no mapa, que representa o que se aplicaria a menos do que o “necessário”.

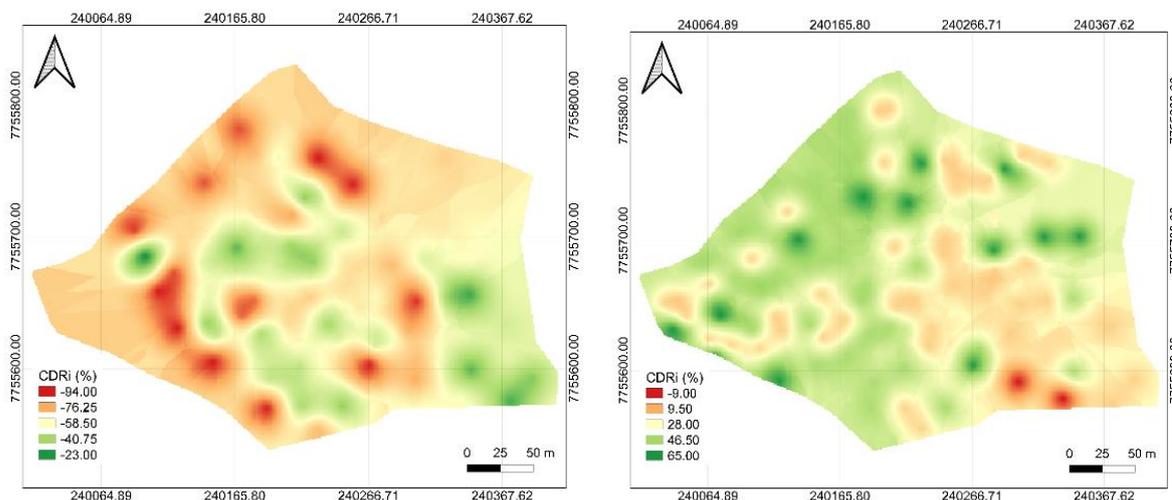


Figura 6. Mapas temáticos: a) desvios (CDRi) do fertilizante distribuído de forma mecanizada em relação a dose média recomendada b) desvios (CDRi) da distribuição pontual em relação a dose distribuída pela adubadora tratorizada.

Desta forma, a construção de uma fertilidade adequada do solo é um processo que precisa levar em consideração a variabilidade espacial dos atributos existente, o que comumente não acontece, fazendo importante o uso de ferramentas para uma agricultura com melhor precisão e uso racional dos recursos (FERRAZ et al., 2015). O uso da aplicação de fertilizantes a taxa variada possibilita uma homogeneização na disponibilidade de nutrientes no solo, uma vez que promove a redução da variabilidade dos mesmos ao longo das adubações (SANTI et al., 2012).

A produtividade média de café beneficiado foi muito superior à média nacional e à do estado do Espírito Santo. A mesma oscilou de 15 a 188 sacas ha^{-1} , com CV de 27,4% considerado como médio (WARRICK; NIELSEN, 1980). O sistema de condução da lavoura, com espaçamento estreito entre as plantas na linha, adota o modelo em safra zero, com esqueletamento das plantas após 3 safras. Considerando o sistema safra zero, a média anual de produtividade é de 66,7 sacas ha^{-1} o que é superior à média nacional e do estado. O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o Esférico, com alcance de 30m e forte IDE conforme os critérios de Cambardella et al. (1994).

Na Figura 7 é apresentado o mapa temático da produtividade mensurada na safra 2019/2020. Observa-se no mapa temático elevada variabilidade espacial da produtividade da área. Esta variabilidade da produtividade em sacas ha^{-1} pode ser explicada pelas diferenças topográficas do terreno. A área representada pela cor verde, correspondem às maiores produtividades da lavoura e está localizada nas porções mais elevadas da área. Outros fatores que influenciam a produtividade são as diferenças no tipo e na fertilidade do solo (ROSA et al., 2010), face de exposição à radiação solar (CUSTÓDIO et al., 2012), e outros fatores que não foram mensurados durante a condução deste trabalho.

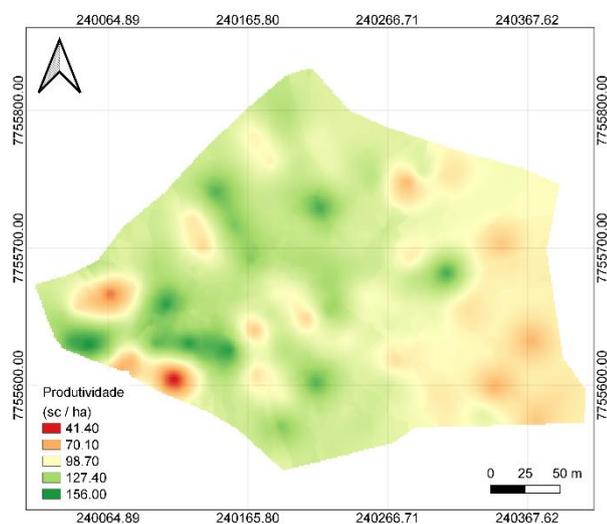


Figura 7. Mapa temático da produtividade da lavoura na safra 2019/2020.

Outro aspecto perceptível por meio da análise do mapa temático da produtividade é a superioridade produtiva da lavoura em questão quando comparada à média do estado do Espírito Santo. Ao passo que a média produtiva do estado é de 21,5 sacas ha^{-1} , na lavoura comercial estudada a menor produtividade média obtida foi de cerca de 70 sacas ha^{-1} . A produtividade é superior à média do estado e também da região sul do Caparaó (21,3 sacas ha^{-1}) onde está localizado o município de Ibatiba (CONAB, 2020).

Observa-se que a largura dos microterraços apresentou baixa variação (CV <12%) com em média 1,98 m, oscilando entre 1,68 e 2,31 m (Tabela 4). Enquanto a inclinação apresentou alta variação (CV > 60%), oscilando de -8,15 a 14,64% de inclinação das “ruas”. Em relação a análise geoestatística destes dados (Tabela 5), quando se observa a largura dos microterraços, o modelo que melhor ajustou foi o

exponencial, enquanto que para inclinação o modelo que melhor se ajustou foi o esférico. Foram encontrados alcance de 44 e 30m para largura e inclinação dos microterraços respectivamente. O IDE para ambas as variáveis são classificadas como forte (CAMBARDELLA et al., 1994). Em complementariedade, na sequência, na Figura 8a e 8b encontram-se os gráficos Box plot das variáveis largura e inclinação respectivamente.

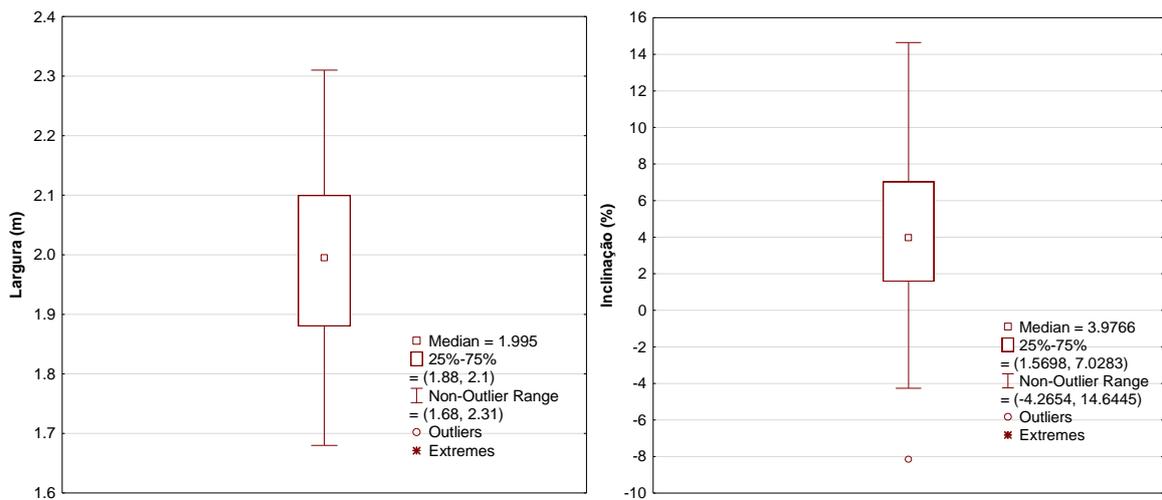


Figura 8. Box plot referente aos dados de largura (a) e inclinação dos microterraços da lavoura (b).

Com base na variabilidade espacial encontrada e modelos ajustados foram construídos também os mapas temáticos do comprimento e da inclinação dos microterraços da lavoura cafeeira estudada (Figura 8).

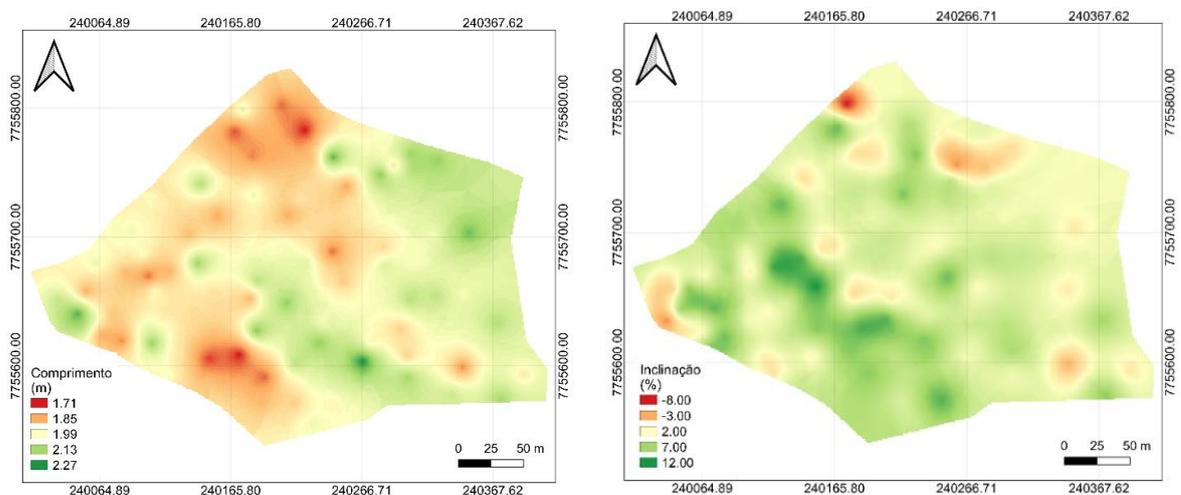


Figura 9. Mapa temático da largura (a) e inclinação dos microterraços (b).

Ao se analisar o mapa temático observa-se grande parte da lavoura com comprimento do terraço inferior a 2m, e grande oscilação na inclinação destas “ruas”, fatores interferem nas operações agrícolas, responsáveis pela desuniformidade na distribuição de fertilizantes mecanizada pela adubadora tratorizada. Como os microterraços foram realizados na lavoura já implantada, tem-se esta limitação com as estradas bastante estreitas. Somado a isso tem se as irregularidades na superfície dos mesmos, fato anteriormente citado, que interfere na qualidade de operações mecanizadas.

3.6. CONCLUSÕES

As frações granulométricas apresentam baixa variabilidade na área, com lavoura apresentando homogeneidade e textura argilosa, pertencente à classe dos Latossolos Amarelos.

O solo da lavoura apresenta desequilíbrio e variabilidade na fertilidade, com a maior parte dos atributos classificados como de baixa ou média disponibilidade.

Os mapas de desvios mostraram que adubação com o teor médio não atende consideravelmente a exigência nutricional em grande parte das plantas, e, em alguns momentos é superior ao que as plantas necessitam.

Existe variabilidade espacial na fertilização mecanizada, a distribuição mecanizada de fertilizantes teve baixa eficiência devido à variabilidade da largura e inclinação dos microterraços.

3.7. REFERÊNCIAS

BRAGANÇA, S. M.; PREZOTTI, L. C.; LANI, J. A. Nutrição do Cafeeiro Conilon. In: FERRÃO, R.G; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M. A.; DE MUNER, L. H. (2 ed.). **Café conilon**. Vitória, ES: Incaper, 2017. p. 327-345.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, M. J.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

CHIODEROLI, C. A.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; GITTI, D. C.; KANEKO, F.H.; ROMAN, R. A. A. Desempenho de semeadora-adubadora em função do preparo de solo e espaçamento da cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, p. 462-467, 2010.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima em Ibatiba (Brasil). <<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/espírito-santo/ibatiba-43565/>>> Acesso em 03/06/2022.

COELHO, H.; FERNANDES, H. C.; CAMPOS, D. S.; TEIXEIRA, M. M.; LEITE, D. M. Deslizamento de rodados de tratores de pneus em diferentes operações agrícolas. **Revista Ceres**, v. 59, p. 330-336, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira – Safra Brasileira de Café: Segundo levantamento, maio 2022 – safra 2021/2022.: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cafe>>

CUNHA, A. M.; FEITOZA, H. N.; FEITOZA, L. R.; OLIVEIRA, F. S.; LANI, J. L.; CARDOSO, J. K. F.; TRINDADE, F. S. Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo e implementação de interface no Geobases para uso de dados em SIG. **Geografares**, Vitória, v. 2, n. 22, p. 32-65, 2016.

CUSTÓDIO, A. A. P.; SILVA, R. P.; LEMOS, L. B.; TOLEDO, A.; MELO, L. P.; CUSTÓDIO, A. A. P. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cafeeiros irrigados. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 87, n. 3, p. 172 - 180, 2012.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: [s.n.], 2008. 230 p.

FERRAZ, G. A.; SILVA, F. M. D.; OLIVEIRA, M. S. D.; AVELAR, R. C.; SALES, R. S. Variabilidade espacial da dose de P₂O₅ e K₂O para adubação diferenciada e convencional em lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 346 - 356, 2015.

FERREIRA, M. F. P.; DIAS, V. O.; OLIVEIRA, A.; ALONÇO, A. S.; BAUMHARDT, U. B. Uniformidade de vazão de fertilizantes por dosadores helicoidais em função do nivelamento longitudinal. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 18, n. 4, p. 297-304, 2010.

FIGUEIREDO, V. C.; MANTOVANI, J. R.; LEAL, R. M.; MIRANDA, J. M. Levantamento da fertilidade do solo de lavouras cafeeiras em produção, no sul de minas gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 306-313, 2013.

FREDERICO, Samuel. Cafeicultura científica globalizada e as montanhas capixabas: a produção de caféarábica nas regiões do Caparaó e Serrana do Espírito Santo. **Sociedade & Natureza**, v. 25, p. 7-20, 2013.

GARCIA, L. C.; DINIZ, R. N.; ROCHA, C. H.; SOUZA, N. M.; WEIRICH, P. H. Performance of fertilizer metering mechanisms of planters as a function of longitudinal inclination. **Engenharia Agrícola**, v. 37, p.1155-1162, 2017.

GUIMARÃES, G. P.; MENDONÇA, E. D. S.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; MACHADO, R. V. Avaliação da qualidade do solo e de cafeeiros em propriedade familiar do Território do Caparaó-ES. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 3, p. 236-246, 2013.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Cafeicultura. Governo do Estado do Espírito Santo - Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. Disponível em: <<<https://incaper.es.gov.br/cafeicultura>>> Acesso em 07/07/2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do usuário aplicativo online IBGE-PPP. Rio de Janeiro: 2017. Brasil, 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2022.

MACHADO, L. V.; RANGEL, O. J. P.; MENDONÇA, E. D. S.; MACHADO, R. V.; FERRARI, J. L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014

MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, J. C. L. Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação. **Café Arábica do Plantio a Colheita**, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, p. 64-103, 2015.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N. K. Influência da calagem nas propriedades químicas do solo, estado nutricional e produção de alfafa em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1231-1239, 2010

PREZOTTI, L. C.; OLIVEIRA, J. A.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª aproximação**. Vitória, ES: SEEA; Incaper; CEDAGRO, 2007.

ROSA, V.G. C; MOREIRA, M. A; RUDORFF, B. F. T; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1478-1488, 2010.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, 1346-1357, 2012.

SANTI, A. L.; FIORIN, J. E.; COCCO, K. L. T.; CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; HAUSCHILD, F. E. G. Distribuição horizontal e vertical de fósforo e potássio em área manejada com ferramentas de agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, p. 18-24, 2012.

SANTOS FILHO, A. G, SANTOS, J. E. G. G. Apostila de máquinas agrícolas. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista, Bauru,

2001. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/2944746/apostila-de-maquinas-agricolas>>. Acesso em 4 de out. de 2020.

SANTOS, E. O. D. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B. D.; DRUMOND NETO, A. P. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, p. 469-476, 2015.

FERRAZ, G. A. S., SILVA, F. M. D., CARVALHO, L. C., ALVES, M. D. C., & FRANCO, B. C. (2012). Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 140-150.

SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B.; DRUMOND NETO, A. P. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 3, p. 469-476, 2015b.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A., LUMBREAS, J. F., COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, A. F. D.; LIMA, J. S. D. S.; SOUZA, G. S. D.; OLIVEIRA, R. B. D. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes manejos. **Coffee Science**, v. 5, n. 2, p. 173-182, 2010.

SILVA, I. M. D.; SCHIAVON, N. C.; FRANÇA, A. C.; FRANCO, M. H. R.; FARNEZI, M. M. D. M. Respostas de genótipos de *Coffea arabica* à aplicação de fósforo em substrato com ácido cítrico. **Rev. Cienc. Agrárias**, v. 62, p. 1-7, 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. – Porto Alegre: Artmed, 2017, 888p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 573p, 2017.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53, 2000.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, **Academic Press**, 1980. p.319-344.

4. CAPÍTULO II – Efeito do tráfego de máquinas sobre características físicas do solo em lavoura de cafeeiro arábica microterraceada.

4.1. Resumo

A mecanização agrícola é uma alternativa para garantir a viabilidade técnica e econômica da cafeicultura, tornando-se uma solução para a baixa disponibilidade de mão de obra. Em regiões montanhosas, produtoras de arábica, o microterraceamento das entrelinhas do cafeeiro tem proporcionado o uso de pequenas máquinas com implementos, para mais diversas atividades antes realizadas de forma manual. Entretanto, ainda são escassas as informações acerca do efeito da grande movimentação de terra para abertura das estradas nas entrelinhas do cafeeiro sobre o solo e a cultura. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tráfego de máquinas sobre características físicas do solo das entrelinhas microterraceadas. O estudo foi realizado em uma lavoura de café arábica variedade catuaí vermelho com 11 anos de idade, plantada em curva de nível com as entrelinhas microterraceadas. Um grid amostral irregular foi montado, totalizando 100 pontos georreferenciados. Uma adubação mecanizada foi realizada visando avaliar a uniformidade de distribuição do fertilizante. Para avaliar o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo foram determinadas: a resistência do solo à penetração; densidade do solo; macroporosidade; microporosidade; e porosidade total. As avaliações foram realizadas nas linhas de cultivo e nas entrelinhas. Foram realizadas duas avaliações, sendo uma para caracterização da área (pré-passada) e outra após a operação mecanizada (pós-passada). As avaliações foram realizadas nas linhas de cultivo e nas linhas de tráfego dos rodados pneumáticos dos tratores. Os dados foram submetidos a análises estatística clássica e geoestatística. Para quase todas as variáveis mensuradas não se observou diferença estatística significativa, entretanto há uma tendência de comprometimento das condições físicas do solo após a passada do trator, em especial sob o rodado voltado para a linha de baixo no sentido do declive do terreno. Os resultados indicam que, devido a uma leve inclinação do terraço em direção à linha abaixo no sentido do declive do terreno, a transferência de peso no sentido transversal da máquina pode aumentar a pressão dos rodados do trator na referida região.

Palavras chave: Adubadora tratorizada; Cafeicultura de montanha; Qualidade do solo; Sustentabilidade agrícola.

4.2. Abstract

Agricultural mechanization is an alternative to guarantee the technical and economic viability of coffee growing, becoming a solution to the low availability of labor. In mountainous regions, which produce Arabica, the micro-terracing between the coffee trees has provided the use of small machines with implements, for a variety of activities that were previously performed manually. However, there is still little information about the effect of the large movement of earth to open the roads between the lines of the coffee tree on the soil and culture. The present work aimed to evaluate the effect of machine traffic on the physical characteristics of the soil of the micro-terraced lines. The study was carried out in an 11-year-old Catuaí Vermelho Arabica coffee plantation, planted in a contour line with micro-terraced lines. An irregular sampling grid was set up, totaling 100 georeferenced points. A mechanized fertilization was carried out in order to evaluate the uniformity of fertilizer distribution. To evaluate the effect of machine traffic on the ground, the following were determined: soil penetration resistance; soil density; macroporosity; microporosity; and total porosity. The evaluations were carried out in the cultivation lines and between the lines. Two evaluations were carried out, one for characterization of the area (pre-passed) and another after the mechanized operation (post-passed). The evaluations were carried out in the cultivation lines and in the traffic lines of the pneumatic wheels of the tractors. The data were submitted to classical and geostatistical statistical analyses. For almost all the variables measured, there was no statistically significant difference, however there is a tendency to compromise the physical conditions of the soil after the tractor passes, especially under the wheels facing the bottom line in the direction of the slope of the terrain. The results indicate that, due to a slight slope of the terrace towards the line below in the direction of the slope of the terrain, the transfer of weight in the transverse direction of the machine can increase the pressure of the tractor wheels in that region.

Keywords: Tractor fertilizer; Mountain coffee growing; Soil quality; Agricultural sustainability.

4.3. INTRODUÇÃO

O estado do Espírito Santo foi responsável por cerca de 30% do total de sacas de café beneficiadas no país no ano de 2021, apresentando um parque cafeeiro superior a 440 mil hectares (CONAB, 2022). Predomina no estado a produção do Cafeeiro Conilon (*Coffea canephora*), fazendo do ES o maior produtor nacional. A espécie é comumente cultivada em regiões de baixa altitude, e temperaturas mais elevadas, enquanto as lavouras de café arábica (*Coffea arabica*) estão localizadas em regiões montanhosas, com altitudes superiores a 600m e temperaturas mais amenas (INCAPER, 2022). A cafeicultura tem se caracterizado como principal atividade econômica, correspondendo a mais de 37% do valor bruto da produção agrícola do estado (INCAPER, 2022).

A falta de mão de obra no campo é um dos problemas enfrentados pela cafeicultura brasileira (SOUZA et al., 2018). O que tem obrigado cafeicultores a buscarem trabalhadores em regiões distantes das regiões produtoras, o que eleva o custo de produção e o risco da atividade (ALVES et al., 2017). A mecanização agrícola é uma alternativa para garantir a viabilidade técnica e econômica do cultivo de café. Pode ser uma solução para a baixa disponibilidade de mão de obra em algumas regiões, além do baixo rendimento operacional, insegurança da colheita e pode também contribuir de forma significativa na redução do custo de produção e melhoria da qualidade dos grãos (SOUZA et al., 2018).

Entretanto, a topografia do terreno tem sido o principal fator que intervém na adoção de sistemas mecanizados nas propriedades agrícolas, principalmente nas regiões produtoras de café arábica nas regiões montanhosas. A realização de certas atividades pode ser limitada em regiões de topografia acidentada, por não permitirem o tráfego das máquinas com estabilidade. Uma alternativa potencial para a cafeicultura de montanha é o uso de microterraços (MATIELLO et al., 2015; SOUZA et al., 2018).

A prática consiste em fazer a movimentação de terra em curva de nível ou em contorno em áreas declivosas, criando uma estrada estreita e plana nas entrelinhas dos cafeeiros (SOUZA et al., 2018). O microterraceamento proporciona o uso de microtratores e tratores com bitola estreita que permite o tráfego nas entre linhas com implementos acoplados no sistema de levantamento hidráulico em atividades até então realizadas somente com trabalho manual. As principais atividades e tratos

culturais realizados por essas pequenas máquinas comumente são: pulverizações, adubações, controle de plantas daninhas e transporte da produção (SOUZA et al., 2018).

No entanto, existe uma preocupação a respeito do uso de máquinas sob a qualidade do solo. O uso intenso de máquinas agrícolas, principalmente de grande porte, tem provocando a redução da qualidade física do solo, uma vez que provoca o aumento na resistência do solo à penetração, aumento da densidade do solo, redução na porosidade do solo (principalmente no volume dos macroporos) diminuição na taxa de infiltração de água na permeabilidade ao ar do solo (ARAÚJO et al., 2007; AMPOORTER et., 2012; NAWAZ et al., 2013), dentre outros processos que são afetados indiretamente, como o transporte de nutrientes, a geoquímica do ferro, a concentração e fluxo de CO₂ e N₂O, e a fauna de microrganismos no solo (SILVEIRA et al., 2010; NAWAZ et al., 2013).

Desta forma, o acompanhamento da qualidade física do solo torna-se ferramenta essencial para monitorar o efeito do tráfego de máquinas no solo. Assim, esse estudo teve como objetivo foi avaliar o efeito do tráfego de máquinas sobre as características físicas do solo das entrelinhas sobre os microterraços e estabelecer critérios indicativos da qualidade do solo.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma lavoura de *Coffea arábica* L. localizada na Fazenda Boa Esperança, no município de Ibatiba, região do Caparaó no Estado do Espírito Santo, a 20°16'45,20" de latitude S e 41°29'15,35" de longitude W (Figura 1), com declividade média de 28%. O Clima da região é subtropical úmido classificado como Cwa de acordo com Köppen e Geiger. O município apresenta temperatura média anual de 20,0 °C, com pluviosidade média anual de 1116 mm (climate-data.org).

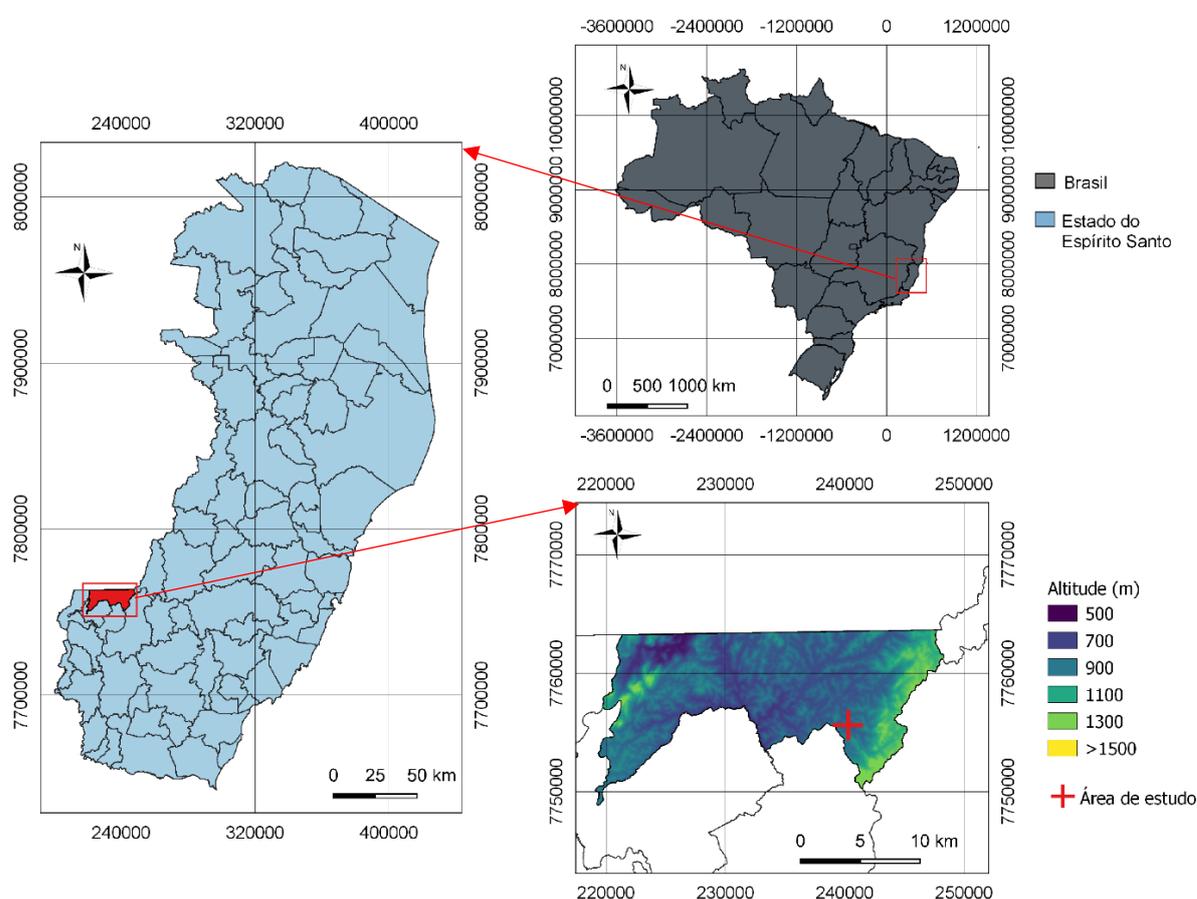


Figura 1. Mapas, do Brasil, estado do Espírito Santo e do município de Ibatiba contendo altimetria, local de realização do estudo.

A lavoura foi implantada no ano de 2011, no espaçamento de 2,5m entrelinhas e 1,0m entre plantas, com a variedade do cafeeiro Catuaí vermelho. O microterraceamento foi realizado com a lavoura já implantada, de tal modo que a largura dos microterraços é inferior a 2,5m. O proprietário da lavoura utilizou uma

miniescavadora hidráulica da marca Yanmar, modelo Vi055, com rodados de esteira e cabine para o operador, que operando com lâmina dianteira realizou a escavação do solo das entrelinhas dos cafeeiros, retirando o solo da parte superior e realizando aterro da região próxima a linha de cultivo na parte inferior do terreno, construindo assim os microterraços.

Para a coleta de dados, foi montado na área um grid amostral irregular contendo 100 pontos amostrais georreferenciados, sendo cada um composto por 3 plantas (uma central e duas vizinhas na linha de cultivo). Os pontos estão identificados na Figura 2. Os pontos foram marcados com etiquetas metálicas e as coordenadas geográficas determinadas por meio de sistema GNSS LAND-PAK SF-3040 da NavCom-John Deere de dupla frequência, referenciado ao Sistema Geodésico Brasileiro através da técnica de Posicionamento por Ponto Preciso-PPP do Serviço online para pós-processamento de dados GNSS – IBGE, tendo como datum o SIRGAS 2000, referencial oficial a ser utilizado em todo o território brasileiro (IBGE, 2017). No levantamento topográfico levantou-se as coordenadas de latitude e longitude e a sua altimetria.

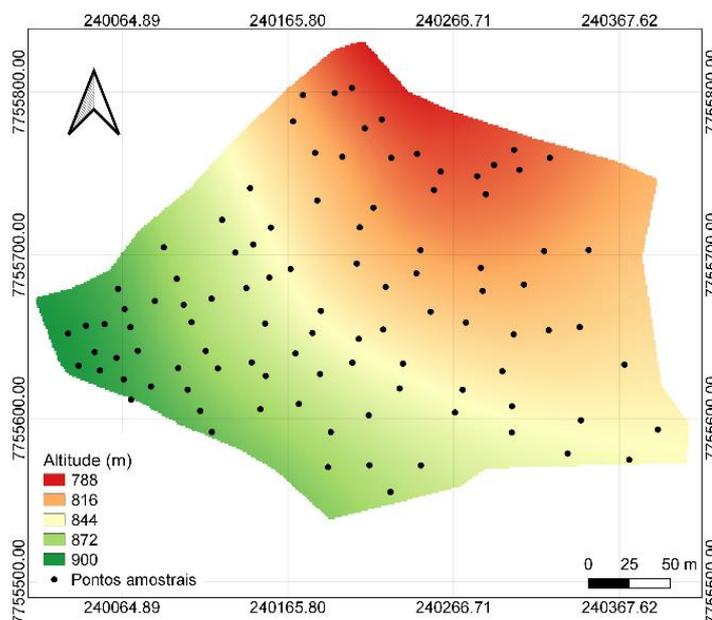


Figura 2. Mapa temático da altitude da lavoura com a indicação dos pontos amostrais marcados em grid irregular.

Os tratos culturais que são realizados na lavoura são a adubação, desbrota e manejo de pragas e doenças. Foram realizados o reparo e manutenção dos

microterraços. A lavoura passa por um processo de poda conhecido como “esqueletamento” de 4 em 4 anos o processo é realizado, colhendo-se em três safras, e a quarta é conhecida como safra zero, pois as plantas são podadas após a terceira colheita.

No mês de setembro de 2019 foram coletadas 100 amostras de solo com auxílio de uma sonda inoxidável, na camada de 0-0,20 m, na projeção da copa das plantas que compõem cada ponto amostral. As amostras foram encaminhadas para laboratório de solo para análise dos atributos físico-químicos do solo.

Diante dos resultados da análise do solo, foram distribuídos 1200 kg do adubo NPK por hectare para correção da fertilidade do solo (SAFRA 2019/20), em dois momentos, uma adubação em novembro de 2019 e outra em fevereiro de 2020. Uma adubação foi realizada de forma mecanizada, com a distribuição do fertilizante granulado (NPK 20-00-20) conforme o plano de adubações pré-estabelecido para a lavoura.

A operação mecanizada de distribuição de fertilizantes granulados foi realizada em 11 linhas de cultivo de café microterraceadas. Para a adubação foi utilizada uma adubadora montada modelo Komander 600HP e massa de 635kg (Kamaq Máquinas e Implementos Agrícolas), equipada com dosador volumétrico acionado pela TDP do trator, distribuidor centrífugo de dois discos e defletores para aplicação direcionada à linha de plantio. O trator utilizado para o tracionamento foi um modelo BCS Invictus K600 RS com 65 CV de potência com cabine para o operador e massa de 1690 kg. O trator foi operado a uma velocidade média de 4,5 km hora⁻¹, próximo à rotação de potência máxima na terceira marcha reduzida. O conjunto trator + adubadora passou em duas oportunidades sobre o microterraço, a entrada de ré e no momento da distribuição do fertilizante propriamente dita.

Para avaliar o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo foram determinadas variáveis indicadoras de qualidade do solo. Foram realizadas avaliações nas linhas de cultivo e nas entrelinhas (microterraços). As avaliações nas entrelinhas foram realizadas nas laterais (região de passagem dos pneus dos tratores) e no centro. Foram realizadas duas avaliações, sendo uma para caracterização da área (pré-passada) e outra após a operação mecanizada (pós-passada).

As coletas de dados foram: a) resistência do solo à penetração (RP) utilizando um penetrômetro digital; b) com amostras indeformadas, determinou-se a densidade

do solo (Ds), porosidade total (PT), macro e microporosidade conforme metodologia da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017).

As leituras da resistência do solo à penetração foram realizadas utilizando penetrômetro digital marca Falker, modelo penetroLOG, com profundidade máxima de penetração de 60 cm, leituras de cm em cm, resolução configurável e diâmetro do cone de 12,83 mm. Para isso, foram realizadas avaliações nas linhas de cultivo e nas entrelinhas (microterraços). As avaliações nas entrelinhas foram realizadas nas laterais (região de ação dos pneus dos tratores – esquerda e direita) e no centro. As leituras foram realizadas a cada cinco centímetros de profundidade, até uma profundidade máxima de 0,60m.

Para os atributos densidade, porosidade total, macro e microporosidade do solo foram coletadas amostras de solo com estrutura indeformada por meio de um anel de aço de bordas cortantes e volume interno de 100 cm³ (TEIXEIRA et al., 2017). Para a caracterização da área foram coletadas amostras na linha de cultivo e também no terraço, sendo coletadas 32 amostras em cada local. Essas amostras foram coletadas com o intuito de descrever a condição original do solo (linha de cultivo) e aquela após a movimentação do solo para abertura dos microterraços. Da mesma forma, foram utilizadas para avaliar o efeito do tráfego sobre o solo.

Foram coletadas, no mesmo período, amostras de solo para determinação do teor de água (TEIXEIRA et al., 2017), visando relacionar os períodos de medição.

As amostras foram coletadas: a) na linha de cultivo e no centro do microterraço na avaliação pré-passada, e; b) amostra composta proveniente de subamostras coletadas na projeção dos rodados (direito e esquerdo) e no centro do microterraço.

As medições realizadas nas linhas e em diferentes posições nas entrelinhas, permitiram avaliar a variação qualitativa do solo em função da movimentação de terra causada pelo processo de microterraceamento, bem como o impacto do tráfego de máquinas sobre a sua estrutura.

As avaliações foram realizadas em dois momentos, a saber: a) anteriormente à passada do conjunto trator/implemento, e; b) após a passada do conjunto trator/implemento.

A partir dos dados de resistência do solo à penetração, foram calculados os valores de resistência máxima, média e a profundidade onde essa acontece. Esses dados foram submetidos a análises estatísticas descritivas para calcular as medidas

de posição (média e mediana) e as medidas de dispersão. Para avaliar a distribuição da resistência à penetração no espaço e da profundidade de pressão máxima foram construídos gráficos para descrição do comportamento pontual.

Visando comparar a resistência máxima à penetração nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais [linha, microterraço, rodado à esquerda do operador, rodado à direita do operador, e centro do microterraço (pós-passada) – centro] foram construídos gráficos de médias, sendo essas comparadas a partir do desvio padrão.

Após a passada do trator foram realizadas novas amostragens na camada de 0-0,20m para descrever o efeito da pressão exercida pelo trator sobre o solo. Na ocasião foram coletadas amostras na projeção dos rodados do trator (direito – próximo à linha acima, e esquerdo – próximo à linha abaixo, no sentido do declive do terreno) e no centro do terraço. Igualmente ao experimento de caracterização do solo, foram coletadas, para cada situação, 32 amostras.

Para os dados de densidade, macro, micro e porosidade total do solo foram construídos gráficos de barras com os valores médios, sendo estas comparadas utilizando o Intervalo de Confiança ao nível de 95%.

Para avaliar existência e quantificar a variabilidade espacial presente, os dados de Pressão máxima foram submetidos a análises geoestatísticas, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais.

A dependência espacial entre as observações pode ser expressa através do variograma, estimado pela equação 1.

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

Em que $\gamma(h)$ é a semivariância, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pela distância h

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, foram determinados os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), variância estrutural (C_1) e alcance (a). Para análise do índice de dependência espacial (IDE), foi utilizada a relação $C_0/(C_0+C_1)$ e os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994), que consideraram a dependência espacial fraca ($IDE > 75 \%$), moderada ($25 \% \leq IDE \leq 75 \%$) e forte ($IDE < 25 \%$).

Os variogramas foram escalonados pela variância dos dados para permitir a comparação das estruturas de dependência espacial das diferentes variáveis.

Comprovada a dependência espacial, utilizou-se o método de interpolação de krigagem ordinária para estimar valores em locais não medidos (VIEIRA, 2000) e confeccionar os mapas temáticos para descrever o comportamento dos atributos do solo analisados na lavoura. A krigagem ordinária se utiliza de uma combinação linear dos n valores observados para cada atributo (VIEIRA, 2000), conforme equação 2.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \text{ com } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

Em que: $Z^*(x_0)$ é o valor estimado; λ_i são os pesos atribuídos a cada ponto utilizado na estimativa de $Z^*(x_0)$; $Z^*(x_i)$ é o valor observado utilizado para estimar os não medidos.

A krigagem ordinária não requer o prévio conhecimento da média m e minimiza a variância do erro na condição $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, os pesos λ_i são obtidos a partir do sistema de equações da krigagem ordinária (Equação 3):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0) \text{ para } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3).$$

Em que: $C(x_i, x_j)$ e $C(x_i, x_0)$ são, respectivamente, a semivariância entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 ; α é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

As análises estatísticas clássicas foram realizadas nos softwares Excel e R, médias de Porosidade total, macro e micro porosidade e densidade do solo foram comparadas pelo teste Tukey.

As análises geoestatísticas, as interpolações e a construção dos mapas temáticos foram realizadas no software QGIS, versão 3.16.10.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultado da estatística descritiva referente a pressão máxima, profundidade da pressão máxima (P. máxima), teor de água do solo, porosidade total (PT), volume de macro e microporos, e densidade do solo (Ds) mensurada nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais (linha, terraço, rodado esquerdo – esquerda, rodado direito – direita, e centro do terraço – centro), encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Pressão máxima (P. Máxima), profundidade da pressão máxima e teor de água do solo, porosidade total (PT), volume de macro e microporos, e densidade do solo (Ds) mensuradas nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais (linha, terraço, rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do terraço).

Variáveis	Localização	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV (%)
Pré-passada						
P. Máxima (MPa)	Linha	4,41	4,45	1,88	7,03	27,67
Profundidade (cm)	Linha	26,91	25,50	7,00	52,00	40,60
Teor de água (%)	Linha	20,86	20,50	16,13	28,63	15,41
P. Máxima (MPa)	Microterraço	3,48	3,40	1,81	6,03	26,02
Profundidade (cm)	Microterraço	37,96	43,50	7,00	60,00	39,55
Teor de água (%)	Microterraço	24,32	23,89	19,71	32,07	12,75
PT (cm ³ . cm ⁻³)	Linha	483,32	488,28	409,78	547,26	7,19
Micro (cm ³ . cm ⁻³)	Linha	483,82	382,27	239,9	431,00	12,15
Macro (cm ³ . cm ⁻³)	Linha	111,84	107,64	40,46	210,71	35,43
Ds (g.cm ³)	Linha	1,26	1,28	1,06	1,48	9,18
PT (cm ³ . cm ⁻³)	Microterraço	483,54	479,31	447,96	539,67	4,61
Micro (cm ³ . cm ⁻³)	Microterraço	379,12	384,46	319,33	430,63	7,68
Macro (cm ³ . cm ⁻³)	Microterraço	104,42	105,21	41,7	162,31	31,04
Ds (g.cm ³)	Microterraço	1,30	1,30	1,09	1,48	7,57
Pós-passada						
P. Máxima (MPa)	Esquerda	2,90	2,77	1,10	6,96	32,27
Profundidade (cm)	Esquerda	22,40	20,00	5,00	54,00	57,36
P. Máxima (MPa)	Centro	2,59	2,42	1,36	5,49	31,59
Profundidade (cm)	Centro	19,89	14,00	4,00	58,00	71,81
P. Máxima (MPa)	Direita	3,21	3,03	1,69	6,09	29,91
Profundidade (cm)	Direita	21,13	15,00	5,00	60,00	70,82
Teor de água (%)	Terraço	26,28	26,20	20,68	34,22	12,43
PT (cm ³ . cm ⁻³)	Esquerda	482,56	473,21	416,29	576,19	9,21
Micro (cm ³ . cm ⁻³)	Esquerda	392,70	395,60	344,16	460,54	8,91
Macro (cm ³ . cm ⁻³)	Esquerda	89,86	87,84	14,36	164,09	42,34
Ds (g.cm ³)	Esquerda	1,37	1,36	1,17	1,91	10,53
PT (cm ³ . cm ⁻³)	Centro	501,21	497,23	393,12	580,56	8,59
Micro (cm ³ . cm ⁻³)	Centro	368,7	363,05	320,23	434,10	8,65
Macro (cm ³ . cm ⁻³)	Centro	132,51	121,69	55,06	204,24	28,09

Ds (g.cm ⁻³)	Centro	1,26	1,24	1,11	1,45	8,41
PT (cm ³ . cm ⁻³)	Direita	523,26	510,13	433,34	613,00	10,77
Micro (cm ³ . cm ⁻³)	Direita	399,92	396,93	327,07	468,12	8,43
Macro (cm ³ . cm ⁻³)	Direita	123,34	118,61	15,32	199,43	37,89
Ds (g.cm ³)	Direita	1,25	1,22	1,08	1,48	9,19

PT: porosidade total; Micro: microporosidade; macro: macroporosidade; Ds: densidade do solo; CV: coeficiente de variação; MPa – Megapascal.

De acordo com os resultados da estatística clássica, observa-se maiores valores de pressão máxima na linha de cultivo. Carducci et al. (2013) descrevem que as raízes do cafeeiro podem atingir até 1,5 m de profundidade e suas raízes laterais podem ser encontradas em maior concentração na camada de 0,20 – 0,34m. Portanto, devido a presença do sistema radicular na linha de cultivo, pode ter ocorrido choque entre o penetrômetro e o sistema radicular, assim, resultando maiores índices de pressão máxima na linha de cultivo (MORINIGO et al., 2018).

O teor de água no solo é um fator que se deve levar em consideração ao estudar possíveis modificações na estrutura do solo utilizando como método de análise a resistência do solo à penetração (RP), pois há correlação entre a intensidade de compactação e o conteúdo de água no solo (PALMA et al., 2013; FERRARI et al., 2018). No terraço, durante a pré-passada, o teor de água atingiu o valor mínimo de 19,7% e o valor máximo de 32,1%. Com baixa alteração, o momento Pós-passada atingiu valores entre 20,7 e 34,2%, o que se observa pelo coeficiente de variação (CV). Nota-se que o solo da linha de cultivo apresentou menores valores do teor de água e maiores valor de pressão máxima, quando comparado com o microterraço. Evidencia-se a forte influência do teor de água no solo nos índices de RP (CAMPOS et al., 2013), além da desestruturação da camada superficial do solo para a formação do microterraço.

A macroporosidade do solo apresentou maior variação em ambas as avaliações e regiões, atingindo CV mínimo de 28% (classificado como médio), enquanto as demais variáveis, PT, micro e densidade do solo ficaram com CV inferiores a 13% o que mostra que ocorreu uma pequena variação nos dados, classificados como baixo conforme critérios de Warrick e Nielsen (1980). Os menores valores de macroporosidade foram encontrados após a passagem do conjunto trator + adubadora, principalmente na região sob os rodados. Observa-se tendência na elevação da microporosidade pós passada, no qual nota-se elevação nos valores

máximos. Comportamento semelhante ocorreu com a densidade do solo na região onde passou o rodado esquerdo do conjunto mecanizado.

Os resultados para a análise física do solo antes e após o tráfego do trator na operação de adubação mecanizada são apresentados na Figura 3. Para quase todas as variáveis mensuradas não se observou diferença estatística significativa, entretanto há uma tendência de mudança da condição original do solo tanto após a movimentação de terra para o microterraceamento quanto para o efeito do tráfego de máquinas na área.

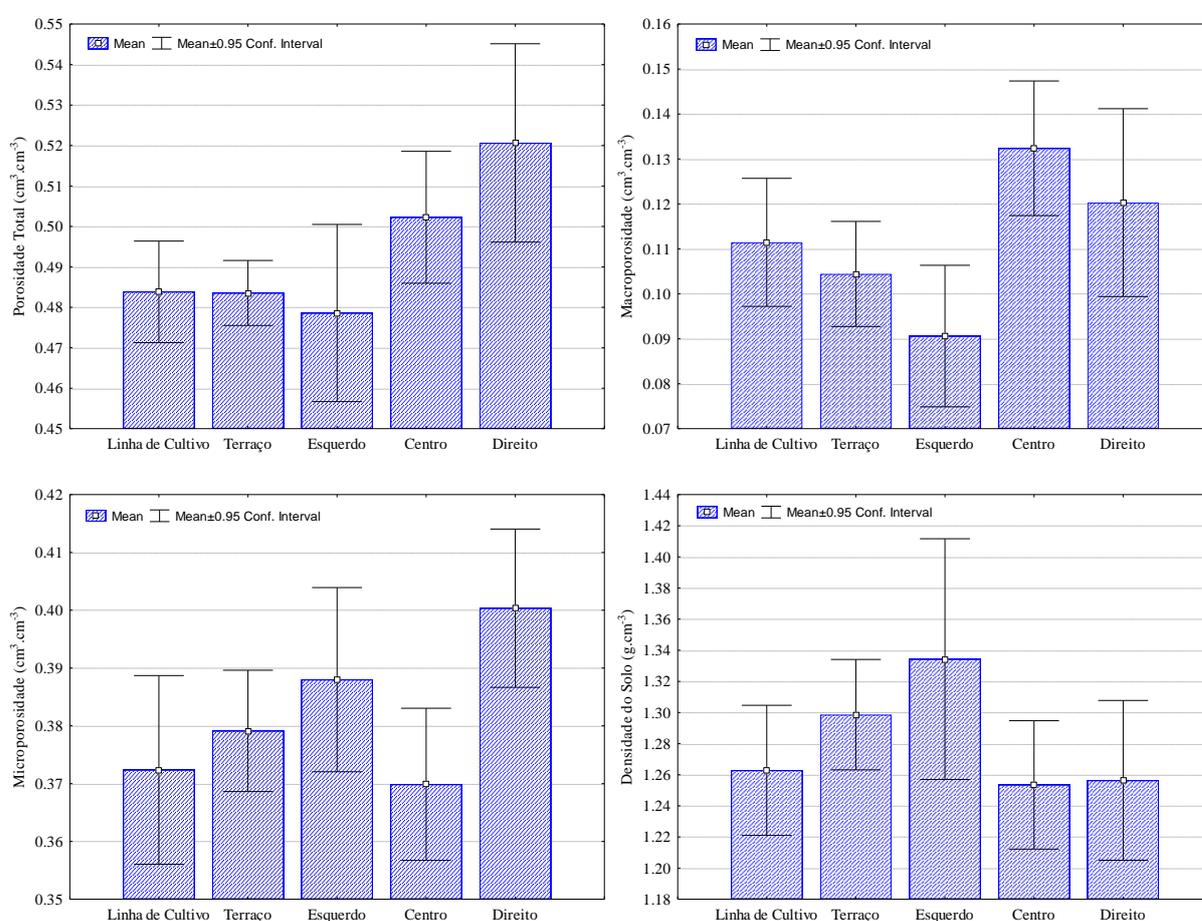


Figura 3. Valores médios dos atributos físicos de solo mensurados na linha de cultivo, no terraço e nas projeções dos rodados dos tratores (pré e pós-passada).

Em linhas gerais, há uma tendência de comprometimento das condições físicas do solo após a passada do trator, em especial sob o rodado voltado para a linha de baixo (esquerdo). Para essa condição, os valores de porosidade total e macroporosidade foram inferiores à condição pré-passada e, também, aos demais

locais de avaliação pós-passada. Para as variáveis microporosidade e densidade do solo os valores para o rodado esquerdo foram superiores à condição pré-passada.

Estes resultados indicam que, devido a uma leve inclinação do terraço em direção à linha abaixo, a transferência de peso no sentido transversal da máquina aumenta a pressão dos rodados do trator sobre o rodado à esquerda do operador. Isso fica mais claro quando se observa as médias de forma isolada no período pós passada do conjunto trator e adubadora (Tabela 2). A densidade do solo apresentou-se maior na posição do rodado esquerdo, enquanto o volume total de poros e a macroporosidade foram as variáveis que apresentaram menores valores nesta mesma região (Tabela 2).

Tabela 2. Médias de porosidade total, volume de macro e microporos, e densidade de solo, mensuradas no período pós passada na região do rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do terraço.

Variáveis	Posição no terraço		
	Esquerda	Centro	Direita
Porosidade total (cm ³ . cm ⁻³)	480,69 b	499,19 ab	517,49 a
Microporosidade (cm ³ . cm ⁻³)	388,48 a	367,55 b	395,15 a
Macroporosidade (cm ³ . cm ⁻³)	92,21 b	131,65 a	122,33 ab
Densidade (kg.dm ⁻³)	1,37 a	1,27 b	1,25 b

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Em lavoura cafeeira submetida a mecanização, Carmo et al. (2011) encontraram menores valores de macroporosidade na posição de linha de tráfego de máquinas na camada superficial do solo. Constataram que a causa dessa menor macroporosidade possivelmente se deve à pressão exercida pelo tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas utilizado nesse sistema de manejo. Os autores também observaram maior valor de microporosidade na camada superficial do solo, refletindo a transformação dos macroporos em microporos.

Inicialmente, os danos à estrutura do solo ocasionam uma diminuição na proporção dos poros de transmissão (PAGLIAI et al., 2004). Os referidos macroporos condutores da água no solo, são mais afetados pelo processo de compactação, ocasionando alteração no volume e na distribuição (BLANCO-CANQUI et al., 2010).

Pagliai et al (2004) constataram diminuição na macroporosidade total do solo nas camadas 0-0,10 m e de 0,10-0,20 m em solo sob sistema de cultivo convencional, enquanto em sistema de cultivo mínimo este efeito não foi observado. Indicando a formação de uma camada compactada oriunda do uso de máquinas nas operações agrícolas. Além disso, o tráfego de máquinas afeta a configuração dos poros do solo,

produzindo mudança na orientação dos poros (SORACCO et al., 2015) e na distribuição dos poros (BLANCO-CANQUI et al., 2010). A conectividade vertical preferencial foi modificada e desapareceu devido ao tráfego. O tráfego de máquinas provavelmente destruiu ou bloqueou bioporos verticais, que eram abundantes no tratamento sem tráfego, mas escassos quando comparados aos sistemas de cultivo com tráfego de máquinas (SORACCO et al., 2015). Blanco-Canqui et al., (2010) observaram que o tráfego de máquinas provoca uma redução no volume dos poros em cerca de três vezes, afetando a distribuição do tamanho dos poros.

Szymczak et al. (2014) observaram elevação da densidade do solo (média de 14,6%) e redução na macroporosidade, em média de 55% nas camadas superficiais do solo, após operações de corte de pinus com um trator florestal harvester marca Caterpillar e modelo C9 ACERT, com massa operacional de 28 toneladas, com rodados de esteiras. Na extração das madeiras utilizou-se um trator florestal forwarder, marca Caterpillar e Modelo CAT 3056E DITAAC, com 23 toneladas, seu próprio peso somado à carga de madeira de cinco toneladas e rodados de pneus recobertos com semiesteiras na parte traseira. Os resultados obtidos pelos autores após as operações de colheita indicam a ocorrência de compactação após tráfego de máquinas pesadas.

A ocorrência de compactação do solo nas camadas superficiais do solo (0,15m) resultante do tráfego das máquinas também foi constatado por Palma et al. (2013) em uma lavoura de cafeeiro mecanizada, realizando-se as operações de controle do mato com roçadoras mecânicas tratorizadas (3-4 roçadas por ano) e pulverizações com micronutrientes e defensivos agrícolas (2 aplicações por ano). Estes implementos utilizados foram acoplados a um trator Massey Ferguson 265 (Potência de 47,8 kW), com rodados pneumáticos. Ainda, na colheita utilizou-se uma colhedora Jacto K3 Millennium®.

A mecanização agrícola apresenta diversas vantagens, sobretudo econômicas, entretanto a probabilidade da ocorrência da compactação do solo é alta, principalmente quando se intensifica o tráfego de máquinas, sendo indispensável também o uso de estratégias para minimizar este problema.

Na Figura 4, são apresentados os valores de média e desvio para a pressão máxima à penetração do solo nas diferentes posições de avaliação. Nota-se que a média dos valores de P. Máxima se limitaram de 2,6 a 4,4 MPa. Apesar

da variação entre os valores de pressão máxima não houve diferença estatística entre as medições, em virtude dos altos desvios.

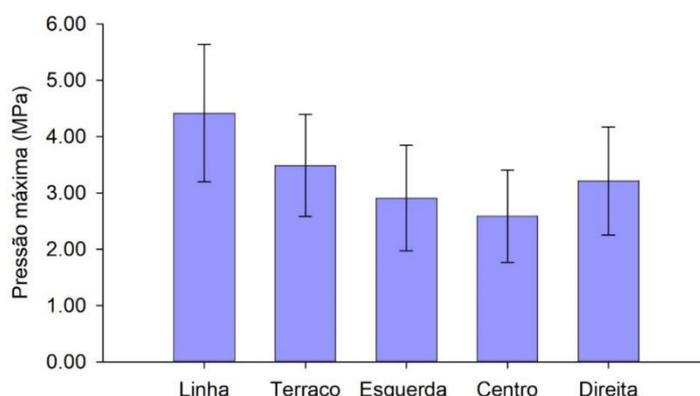


Figura 4. Médias e desvios para a pressão máxima à penetração do solo.

A P. Máxima se manteve similar em ambos os lados do rodado e no centro do tráfego, o que pode ser explicado pela dissipação da força exercida pelo tráfego e, principalmente, pela incapacidade de alteração com um número reduzido de passadas dos conjuntos mecanizados. A relação entre o resultado da pressão máxima no rodado e no centro se dá, também, pelo tráfego de pessoas na entrelinha de plantio durante a colheita semi-mecanizada, como mostra Palma et al. (2013) ao estudar o adensamento do solo em lavoura cafeeira com diferentes sistemas de cultivo.

Os modelos e parâmetros dos variogramas para a pressão máxima mensurada nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais (linha, microterraço, rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do microterraço) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos e parâmetros do variograma médio escalonado para a pressão máxima mensurada nos diferentes períodos (pré e pós passada) e locais (linha, microterraço, rodado esquerdo, rodado direito, e no centro do terraço).

Variáveis	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a (m)	IDE (%)	R ² (%)	SE(VC)
Pré-passada							
P. Máxima Linha	EXP	0,280	1,013	205	28	91	0,911
P. Máxima Terraço	EXP	0,574	1,150	209	50	90	0,736
Pós-passada							
P. Máxima Esquerda	EXP	0,377	1,178	219	32	93	0,594
P. Máxima Centro	EXP	0,056	1,034	31	06	83	0,559
P. Máxima Direita	EXP	0,082	1,024	60	08	77	0,748

P. Máxima: pressão máxima; C₀ – efeito pepita; C₀+C – patamar; a – alcance; IDE – índice de dependência espacial; R² – coeficiente de determinação do modelo; SE (VC) –SE predito validação cruzada; EXP – exponencial.

O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o exponencial, apresentando médio índice de dependência espacial ($25\% < IDE < 75\%$), conforme critérios de Cambardella et al. (1994), para linha e microterraço, com respectivos alcances de dependência espacial de 205 e 209m, apresentado padrão de distribuição espacial. No período pós-passada, na região do rodado da esquerda também se obteve médio IDE, conforme mesmos critérios, com alcance de 219m, enquanto nas regiões de centro do microterraço e no rodado da direita se observou forte índice de dependência espacial ($IDE < 25\%$), já o alcance da dependência espacial observados foram menores, de 31 e 60m, com menor continuidade espacial, para as regiões do centro do terraço e do rodado da direita respectivamente.

Na Figura 5 são apresentadas a distribuição dos valores de pressão máxima e profundidade da pressão máxima mensurada na linha de cultivo (a) e na região do microterraço (b).

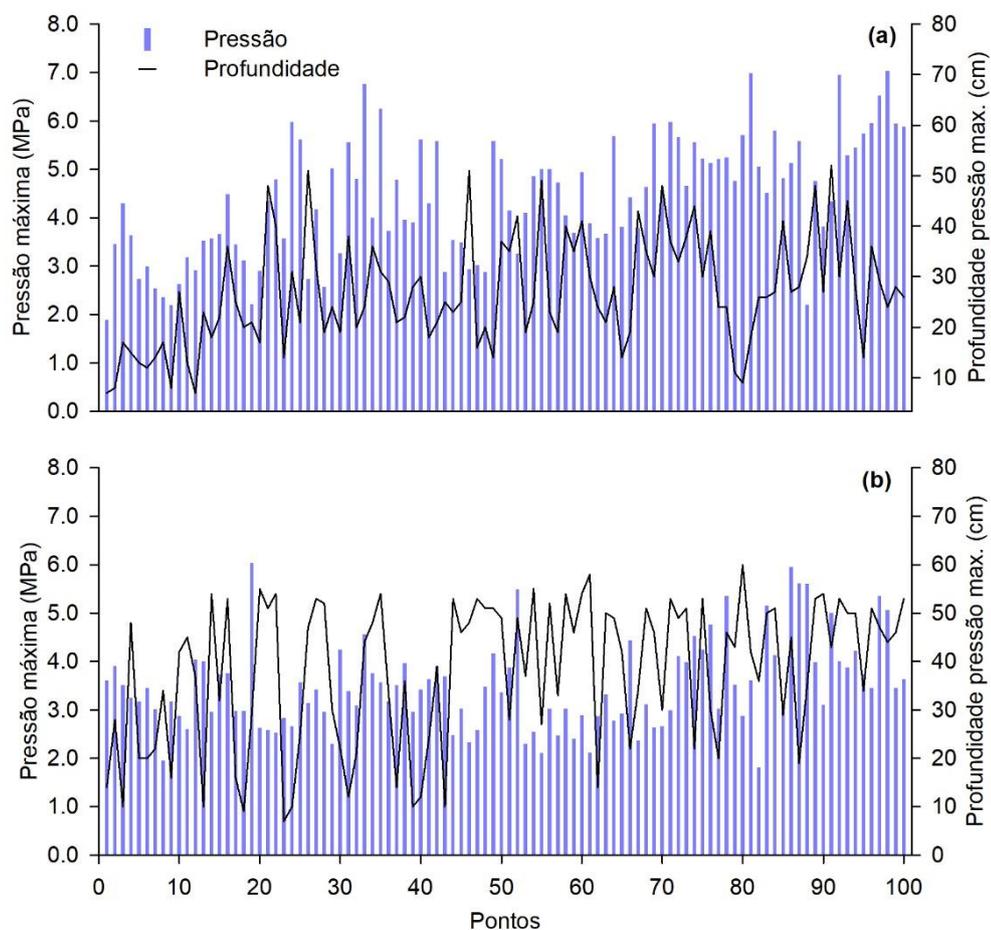


Figura 5. Distribuição dos valores de pressão máxima e profundidade da pressão máxima mensurada na linha de cultivo (a) e na região do microterraço (b).

Na Figura 6, encontram-se os mapas temáticos elaborados através da krigagem para Pressão máxima (MPa) mensurada na região dos microterraços e na linha de cultivo antes da distribuição de fertilizantes mecanizada.

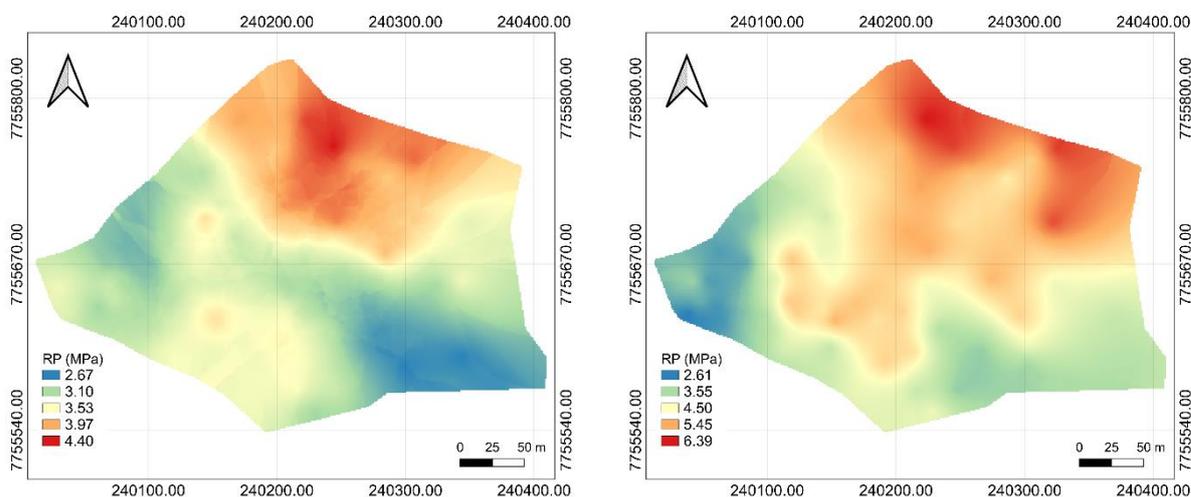


Figura 6. Mapas temáticos da Pressão máxima (MPa) mensurada na região dos microterraços (a) e na linha de cultivo (b) antes da distribuição de fertilizantes mecanizada.

Observa-se na linha de cultivo que há uma concentração de valores de pressão máxima superiores a 4,0 MPa, com valores extremos equivalentes a 7,0 MPa. Ainda, nas linhas de cultivo dos cafeeiros, a maior parte das profundidades da pressão máxima não foram superiores a 40 cm, apresentando baixa variação em relação ao valor médio (26,91 cm). Na região do microterraço, nota-se que há uma concentração de valores de pressão máxima superiores a 2,0 MPa, apresentando valores extremos equivalentes a 6,0 MPa. Neste local de amostragem, na maior parte a profundidade da pressão máxima foram superiores a 45 cm, apresentando baixa variação em relação ao valor médio (37,96 cm).

A distribuição dos valores de pressão máxima e profundidade da pressão máxima mensurada sob o rodado esquerdo do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c), são apresentadas na Figura 7.

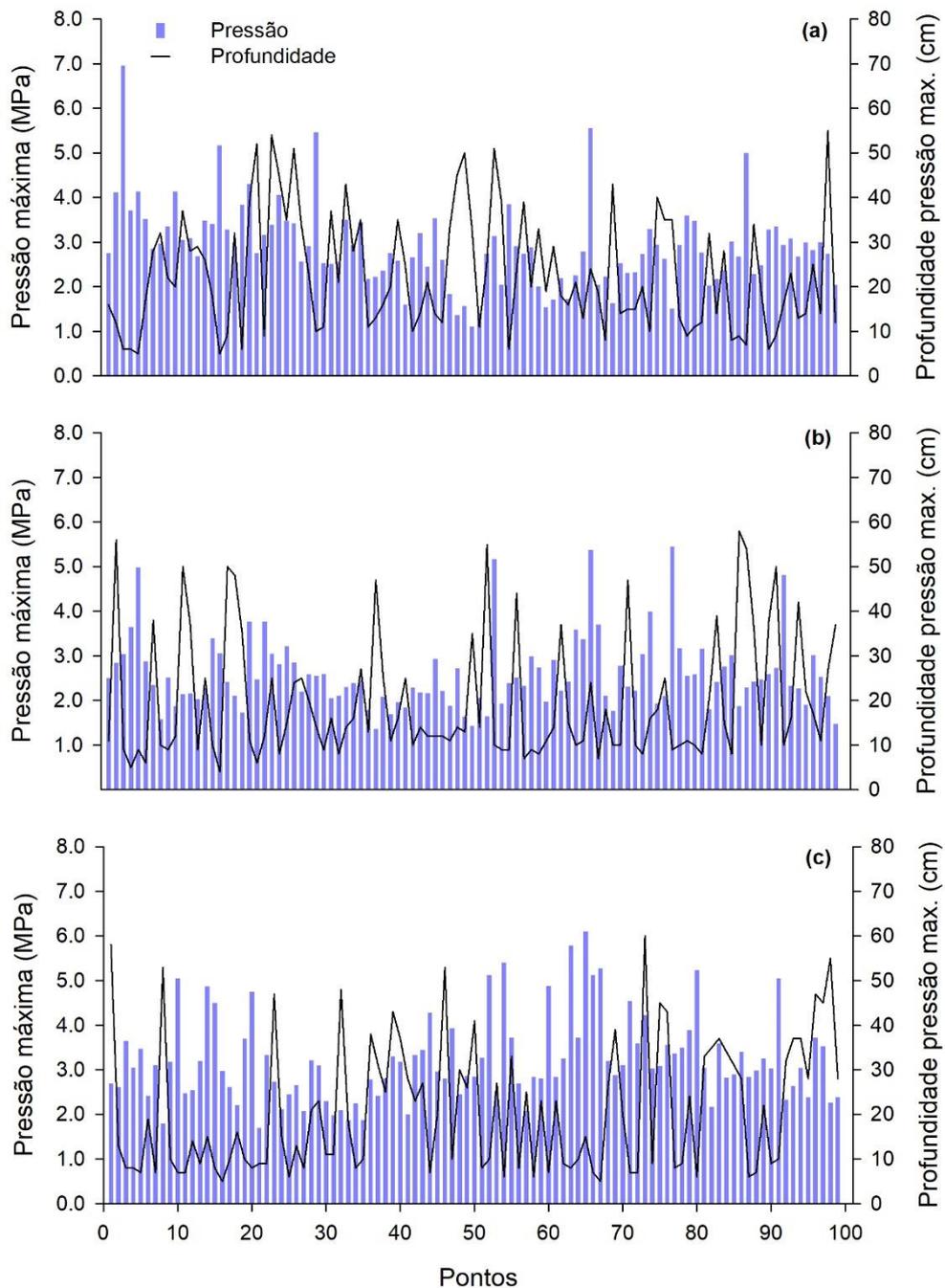


Figura 7. Distribuição dos valores de pressão máxima e profundidade da pressão máxima mensurada sob o rodado esquerdo do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c).

O tráfego agrícola não causou compactação nas camadas superficiais do solo no microterraço, o que pode estar associado a movimentação da terra realizada para o nivelamento das entrelinhas e o baixo número de passadas (uma única operação agrícola mecanizada). Devido a esta movimentação da camada superficial do solo, foi

possível que o penetrômetro identificasse maiores índices de RP nas camadas mais profundas do solo.

Os mapas temáticos da pressão máxima mensurada sob o rodado à esquerda do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c), são apresentadas na Figura 7.

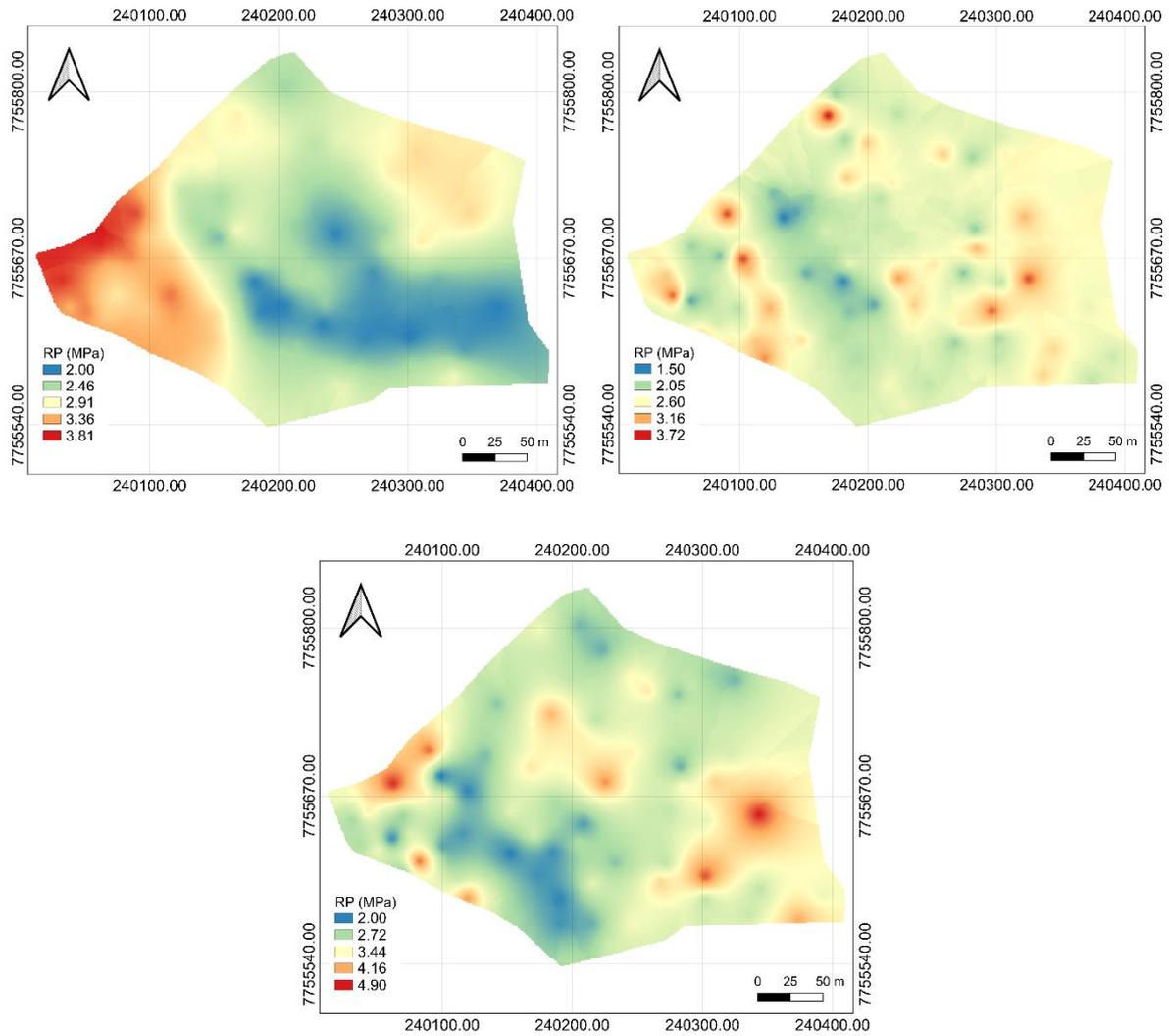


Figura 8. Mapas temáticos da Pressão máxima (MPa) mensurada sob o rodado esquerdo do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c).

Por meio dos mapas temáticos construídos da pressão máxima obtida na região do rodado esquerdo do trator (a), projeção central do microterraço (b) e sob o rodado direito do trator (c), é possível observar o comportamento e a variabilidade da pressão máxima.

Diferente do que foi observado com apenas uma passagem do conjunto mecanizado, Sivarajan et al. (2018) observaram alterações nas propriedades físicas do solo na camada superficial, em torno de 0,10–0,16 m profundidade para milho e 0,08–0,12 m para soja nas linhas. Ocorreu um aumento na resistência do solo à penetração nas camadas citadas, após operações sucessivas em 2 anos de avaliação, demonstrando que o tráfego de máquinas promoveu um aumento de 20 e 35% na resistência do solo a penetração nos cultivos de milho e soja respectivamente (SIVARAJAN et al., 2018).

Verifica-se semelhança na distribuição dos índices de pressão máxima para o rodado direito e projeção central do microterraceo, em que houve uma concentração a partir de 2,0 MPa, atingindo extremos próximos a 5,6 MPa e 6,0 MPa, na projeção central do microterraceo e no rodado direito, respectivamente. Já no rodado esquerdo, houve uma concentração da pressão máxima com valores de 4,0 MPa, atingindo o valor extremo de 7,0 MPa.

De acordo com Moraes et al. (2013) o aumento da compactação do solo ocorre de acordo com o aumento do tráfego, ou seja, ao longo das operações agrícolas será reduzido a profundidade da Pressão Máxima e ocorrerá maiores índices de RP. Corroborando com Lima et al. (2013), que afirmam que o uso de máquinas provoca redução na porosidade e maior adensamento do solo, resultando em maior compactação e conseqüentemente à maior resistência mecânica do solo à penetração nas camadas superficiais. Assim como Carmo et al. (2011), no qual os autores encontraram maior resistência do solo à penetração na posição de linha de tráfego de máquinas em lavoura cafeeira nas camadas superficiais.

A resistência do solo à penetração é um bom indicador da qualidade física do solo (EFFGEN et al., 2012; NAWAZ et al., 2013). Um solo com valores elevados pode restringir a percolação da água e prejudicar o crescimento das raízes, com reflexos na produtividade das culturas. Embora não exista um consenso de um valor na qual ocorram restrições, valores maiores que 2 MPa têm sido considerados restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (COSTA et al., 2006). É importante destacar que mudanças no conteúdo de água do solo, induzem mudanças na resistência do solo e, subseqüentemente, resistência à penetração do solo. Assim, o grau de compactação após o tráfego da máquina depende em grande medida do teor de água do solo (AMPOORTER et al., 2012).

A diminuição da porosidade do solo nas áreas compactadas, após a passagem de máquinas agrícolas, foi fortemente correlacionada com o aumento da resistência do solo à penetração e diminuição da condutividade hidráulica (PAGLIAI et al., 2003, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2010). A formação de uma estrutura adensada, denominada “pé de arado/grade” é uma característica comum de se encontrar em solos submetidos a sucessivas operações mecanizadas de preparo do solo sempre à mesma profundidade (LANI et al., 2017). O tráfego de máquinas aumenta a densidade na camada superficial e subsuperficial do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2010; REICHERT et al., 2016).

Sandoval (2018) ao estudar a sustentabilidade do solo em área com cultivo de café, afirma que o processo de compactação do solo diminui naturalmente ao longo do tempo apesar de continuar acima dos limites críticos, assim, influenciando no desenvolvimento radicular das plantas.

Problemas relacionados a redução da qualidade do solo, oriundos do tráfego de máquinas podem permanecer por bastante tempo. Soracco et al., (2015) observaram que a compactação do solo afeta negativamente o fluxo de água através dos meso e macroporos, e que esse efeito ainda persistia após dois anos de suspensão do tráfego de máquinas. Enquanto, Etana et al. (2013) observaram efeito da compactação na macroporosidade e na condutividade hidráulica saturada 14 anos após a ocorrência do tráfego. Berisso et al. (2012), encontraram efeitos persistentes do tráfego na configuração dos poros do solo mesmo 14 anos após o evento de compactação, no subsolo em um solo franco-argiloso. Vale ressaltar que este efeito depende da intensidade do tráfego e manejo da mecanização (SORACCO et al., 2015).

4.6. CONCLUSÕES

O solo da linha apresentou maior pressão máxima quando comparada à região do microterraço. A profundidade da pressão máxima foi inferior para a linha de cultivo quando comparada à profundidade na região do microterraço. A variável pressão máxima apresentou dependência espacial.

A resistência do solo à penetração, mensurada não apresentou diferença estatística significativa, entretanto apresenta tendência de comprometimento das

condições físicas do solo após a passada do trator, em especial sob o rodado voltado para a linha de baixo no sentido do declive do terreno.

A densidade do solo apresentou tendência de aumento enquanto a macroporosidade de redução após o tráfego de máquinas na região do rodado voltado para a linha de baixo no sentido do declive do terreno.

Os resultados indicam que, devido a uma leve inclinação do terraço em direção à linha abaixo, a transferência de peso no sentido transversal da máquina aumenta a pressão dos rodados do trator sobre o rodado esquerdo.

4.7. REFERÊNCIAS

ALVES, E. L.; PEREIRA, F. A. C.; DALCHIAVON, F. C. Potencial econômico da utilização de micro-terraceamento em lavouras de café: um estudo de caso. **Revista iPecege**, v. 3, n. 1, p. 24-38, 2017.

AMPOORTER, E.; DE SCHRIJVER, A.; VAN NEVEL, L.; HERMY, M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 5, p. 533-542, 2012.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, 2007.

BERISSO, F. E.; SCHJØNNING, P.; KELLER, T.; LAMANDE, M.; ETANA, A.; DE JONGE, L. W.; IVERSEN, B. V.; ARVIDSSON, J.; FORKMAN, J. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 122, p. 42-51, 2012.

CAMPOS, M. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIM, A. C.; OLIVEIRA, I. A. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá. Amazonas. Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 305- 310, 2013.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. D.; LIMA, J. M.; ROSSONI, D. F.; COSTA, A. L. D.; OLIVEIRA, L. M. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 270-278, 2014.

CARMO, D. L. D.; NANNETTI, D. C.; DIAS JÚNIOR, M. D. S.; SANTO, D. J. D. E., NANNETTI, A. N.; LACERDA, T. M. Propriedades físicas de um latossolo vermelho amarelo cultivado com cafeeiro em três sistemas de manejo no sul de minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 991-998, 2011.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima em Ibatiba (Brasil). <<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/espírito-santo/ibatiba-43565/>>> Acesso em 03/06/2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira – Safra Brasileira de Café: Segundo levantamento, maio 2022 – safra 2021/2022.: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1185-1191, 2006.

EFFGEN, T. A. M.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; LIMA, J. S. D. S.; REIS, E. F. D.; BORGES, E. N. Propriedades físicas do solo em função de manejos em lavouras de cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 414-421, 2012.

ETANA, A.; LARSBO, M.; KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; SCHJØNNING, P.; FORKMAN, J.; JARVIS, N. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. **Geoderma**, v. 192, p. 430-436, 2013.

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C.; SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; TANAKA, E. M. Análise da Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração do Solo em Diferentes Profundidades. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**. v. 12. n. 2. p. 164-175. 2018.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; CECATO, U.; LUGÃO, S.M.B.; BARBERO, L.M.; COSTA, M.A.T. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43. n. 11, p. 1583-1590, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do usuário aplicativo online IBGE-PPP. Rio de Janeiro: 2017. Brasil. 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2022.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL - INCAPER. Cafeicultura. Governo do Estado do Espírito Santo - Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. Disponível em: <<<https://incaper.es.gov.br/cafeicultura>>> Acesso em 07/07/2022.

LANI, J. A.; BRAGANÇA, S. M.; PAYE, H. S.; SALES, E. F.; PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. Preparo, Manejo e Conservação do Solo em Lavouras de Café Conilon. In: FERRÃO, R.G; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.; DE MUNER, L.H. (ed.). **Café conilon**. Vitória, ES: Incaper, 2017. p. 509-530.

LIMA, I. M. A.; ARAÚJO, M. C.; BARBOSA, R. S. Avaliação das propriedades físicas do solo em sistemas silvipastoris, região centro-norte, estado do Piauí. **Agropecuária Científica do Semiárido**, Campina Grande-PB, v. 9, n. 1, p. 117-124, 2013.

MATIELLO, J. B.; CARVALHO, M. L.; SIQUEIRA, H.; KROHLING, C. A. Modos de fazer microterraços em cafezais de montanha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, Anais [338] CBPC: Poços de Caldas, MG, p. 1, 2015b.

MORAES, M. T. D.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. D. Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v.33, n.4, p.748-757, 2013.

MORINIGO, K. P. G.; GUIMARÃES, N. D. F.; STOLF, R., SAIS, A. C.; SOUZA, M. D. B. D.; GALLO, A. D. S.; FONTANETTI, A. Efeitos da distribuição de árvores sobre atributos do solo em cafeeiro sombreado. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 517 - 525, 2017.

NAWAZ, M. F.; BOURRIE, G.; TROLARD, Fabienne. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 33, n. 2, p. 291-309, 2013.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 131-143, 2004.

PALMA, M. A. Z.; VOLPATO, C. E. S.; SILVA, F. C. D.; SOUZA, P. D.; SILVA, J. A. Resistência do solo à penetração em cafezais cultivados com sistema mecanizado e manual. **Coffee Science**, Lavras, v. 8. n. 3, p. 364-370, 2013.

REICHERT, J. M.; DA ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; DA ROSA, D. P.; HORN, R.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

SANDOVAL, F. B. Modelagem da sustentabilidade de solo em área sob cultivo de cafeeiro (2018). Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. f. 45 -46.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S. G.; NOWATZKI, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 234-243, 2018.

SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; PALANCAR, T. C.; COLLAZO, D. J.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R. R. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 408-415, 2015.

SOUZA, G. S.; SILVA, S. A.; LIMA, J. S.; VERDIN FILHO, A. C.; INFANTINO, M. B.; KROHLING, C. A. Avanços na mecanização do cafeeiro conilon. **Incaper em revista**, Vitória, v. 9, p. 31-41, 2018.

SILVEIRA, M.; COMERFORD, N.; REDDY, K; PRENGER, J; DEBUSK, W. Influence of military land uses on soil carbon dynamics in forest ecosystems of Georgia, USA. **Ecological Indicators**, v. 10, n. 4, p. 905-909, 2010.

SZYMCZAK, D. A.; BRUN, E. J.; REINERT, D. J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C. C.; DAL'COL LÚCIO, A.; MARAFIGA, J. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v. 38, p. 641-648, 2014.

TEIXEIRA. P. C.; DONAGEMMA. G. K.; FONTANA. A.; TEIXEIRA. W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: EMBRAPA, 573p. 2017.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53, 2000.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, **Academic Press**, 1980. p.319-344.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo da lavoura de cafeeiro microterraceado apresentou desequilíbrio na fertilidade, com alta variabilidade e baixa disponibilidade de atributos em algumas regiões. O que não foi suficiente para ocasionar uma baixa produtividade, embora tenha afetado, uma vez que a lavoura apresentou produtividade média de 109 sacas ha^{-1} , obtendo-se em alguns pontos produtividade superior a 150 sacas ha^{-1} de café beneficiado. Por outro lado, obteve-se regiões com produtividade inferior a 40 sacas ha^{-1} de café beneficiado.

Os mapas dos desvios da adubação pontual mostraram que o teor médio não atende consideravelmente a exigência nutricional de grande parte das plantas e em alguns momentos é superior ao que as plantas necessitam. Desta forma, a construção da fertilidade adequada do solo é um processo que precisa levar em consideração a variabilidade espacial dos atributos existentes, realizando a adubação de forma pontual ou delimitar as zonas com características homogêneas (textura, produtividade, relevo, dentre outras) para o manejo, uma vez que contribuem para melhor nutrição dos cafeeiros, e que podem gerar economia de insumos, mão-de-obra, tempo e recursos financeiros.

Com relação a elevada variabilidade espacial na fertilização mecanizada, nota-se que a distribuição mecanizada de fertilizantes apresentou baixa eficiência devido à variabilidade da largura e inclinação dos microterraços. Para melhor aproveitamento dos microterraços estes devem ser construídos com largura superior a 2,5m e com inclinação no sentido da linha superior de cultivo. É importante construir áreas de manobra ao final das linhas de cultivo, para facilitar a manobra dos microtratores.

O solo da linha apresentou maior pressão máxima quando comparada à região do microterraço devido a maior presença do sistema radicular do cafeeiro, ocasionando o choque entre a ponta do penetrômetro com a raiz. Isso acarretou na profundidade da pressão máxima ser inferior para a linha de cultivo quando comparada à profundidade na região do microterraço.

Observou-se que há uma tendência de comprometimento das condições físicas do solo após a passada do trator em especial sob o rodado voltado para a linha de baixo em função da inclinação dos microterraços e transferência de peso no sentido transversal da máquina, uma vez que a mesma operou inclinada. Assim, devem se pensar estratégias para redução dos impactos do trafego de máquinas sob o solo, se

atentar ao teor de água no solo no momento da operação, além de construir os microterraços mais largos, de preferência antes do plantio dos cafeeiros, com a inclinação voltada para linha superior e com área de manobra para as máquinas.

Em terrenos que apresentam declividade acentuada que não permita o tráfego de máquina é preferível a implantação de microterraços para adubação mecanizada ao manejo manual da lavoura de café.

Em linhas gerais, os resultados da pesquisa possibilitaram compreender melhor a interação entre as variáveis mensuradas para o sistema solo/planta e a produtividade dos cafeeiros. Além disso, observou-se o efeito dos microterraços sobre a características do solo e também sobre a qualidade das operações mecanizadas. Este é apenas o início do estudo, e para melhor compreensão da sustentabilidade do sistema, mais estudos são necessários.