



SAMARA MARTINS BARBOSA

**MANEJO DE CAMBISSOLOS E ARGISSOLOS NA
IMPLANTAÇÃO DE CAFEEIROS**

**LAVRAS - MG
2018**

SAMARA MARTINS BARBOSA

**MANEJO DE CAMBISSOLOS E ARGISSOLOS NA IMPLANTAÇÃO DE
CAFEEIROS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Barbosa, Samara Martins.

Manejo de Cambissolos e Argissolos na implantação de
cafeeiros / Samara Martins Barbosa. - 2018.

90 p. : il.

Orientador(a): Geraldo César de Oliveira.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Cafeicultura. 2. Déficit Hídrico. 3. Práticas de manejo do
solo. I. Oliveira, Geraldo César de. II. Silva, Bruno Montoani. III.
Título.

SAMARA MARTINS BARBOSA

**MANEJO DE CAMBISSOLOS E ARGISSOLOS NA IMPLANTAÇÃO DE
CAFEIROS**

**MANAGEMENT OF INCEPTISOLS AND ULTISOLS IN THE IMPLEMENTATION
OF COFFEE CROP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

APPROVADA em 18 de Junho de 2018.

Dr. Geraldo César de Oliveira	UFLA
Dr. Nilton Curi	UFLA
Dr. Rubens José Guimarães	UFLA
Dr. Marcelo Silva de Oliveira	UFLA
Dr. José Eduardo Corá	UNESP

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2018**

*Aos meus pais e à minha irmã pela dedicação, pelas palavras que sempre me deram força
para seguir e imensurável amor*

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado. Ao CNPq, FAPEMIG e Embrapa Café por demais financiamentos.

À Fazenda Frade, especialmente na pessoa de Vinícius Moribe Pereira e Veber Pereira por fornecerem toda infraestrutura e apoio logístico na condução do experimento de campo.

A Deus que está no comando de todas as coisas, por me permitir mais este passo e pela confortável ciência de que o Senhor sempre está ao meu lado em todos os momentos.

Ao professor Geraldo César pela orientação, apoio, paciência, confiança e pelos desafios propostos que tomaram corpo e hoje compõe este caderno escrito. Ao professor, amigo e grande conselheiro Bruno Montoani pela orientação e crédito em minhas capacidades de cientista do solo.

A todos os professores do DCS que contribuíram com ensinamentos, sábias atitudes e exemplo de dedicação.

Aos meus pais, meus maiores amores, exemplo de simplicidade, honestidade, responsabilidade e fé.

À minha irmã pelo carinho e incentivo em tudo o que faço, obrigada por acreditar. A responsabilidade de irmã mais velha é grande em ser o orgulho desta pessoa que tanto admiro.

Ao Gui pelo companheirismo, apoio, suporte, idéias, paciência, por me contagiar com sua boa energia e forma positiva de viver a vida. Sobretudo por ter escolhido estar ao meu lado e fazer parte de todas as minhas conquistas.

Ao Benevenute, meu colega, orientado de IC e um grande amigo. Toda sua atenção, confiança e responsabilidade com tudo que perfazia os nossos trabalhos foram essenciais para a conclusão desta etapa tão importante. Muitos desafios só foram vencidos porque você acreditou e se propôs a executar tudo como se fosse seu. Por isso formamos esta dupla dinâmica.

À minha família linda pelo carinho em todos os reencontros que foram a força motriz para cada retorno a Lavras. À família Soares onde desde o primeiro dia me senti em casa.

Aos colegas de trabalho meus sinceros sentimentos de gratidão. A realização de tudo o que me foi proposto só foi possível pelo esforço conjunto dos alunos de iniciação científica que fizeram um árduo trabalho de campo (Petrus, Alexandre, Izabela, André, Pedro, Vinícius,

Luis Felipe, Lucas Ademir, Lucas Andrade, Diego Roque). Obrigada pela amizade, confiança, companheirismo e pelas brincadeiras de trincheira.

Ao Rodrigo, um excelente parceiro nos trabalhos, obrigada pela dedicação e ajuda em campo, laboratório e estatística.

Ao Zélio, que sempre esteve presente de forma efetiva durante estes anos de pós-graduação me amparando e salvando quando as formas viáveis de resolução não davam certo. A você, meu grande amigo, toda gratidão e meu reconhecimento do seu grande coração.

A Carlinha, minha amiga e mentora, por todo carinho, cuidado, ajuda e todos os conselhos e conversas sobre o passado, presente e futuro.

A todos os colegas de departamento, pelos casos, cafezinhos, abraços e risadas que regaram sabiamente nossa doce convivência.

A Dulce e Doroteo pelo apoio, ajuda e logística nos trabalhos de laboratório.

A todos funcionários do DCS/UFLA, em especial ao Pezão pelo carinho, pela força de trabalho no campo e pela sincera torcida de dias melhores. À Dirce pelo comprometimento, por estar sempre apta a resolver nossos anseios e por receber com tanto carinho a cada um que adentra à sua sala.

“Tudo o que fizerem, façam de todo o coração.”

(Colossenses 3:23)

RESUMO GERAL

Técnicas agronômicas que possibilitam aumentar a eficiência dos sistemas produtivos frente às variações climáticas são cada vez mais necessárias na busca por uma agricultura mais sustentável. A restrição hídrica e o aumento da temperatura média anual já prejudicam significativamente a produtividade e a qualidade do café nas principais regiões de cultivo. A escassez de água para produção cafeeira, muitas vezes é ocasionada pela redução da capacidade de recarga de água dos solos devido manejo inadequado. Neste sentido, o presente estudo propõe utilização de técnicas de manejo do solo que possibilitem o uso eficiente da água armazenada no solo a exemplo dos condicionadores de solo e abertura de sulcos profundos para um melhor aproveitamento do recurso água por um maior volume de solo explorado. Foram instalados dois experimentos, um deles no município de Bom Sucesso localizado na Mesorregião fisiográfica Oeste de Minas, e outro no município de Nazareno localizado na Mesorregião fisiográfica Campos das Vertentes, em Minas Gerais. Para o primeiro, o preparo de um Argissolo Vermelho Amarelo, consistiu na abertura dos sulcos de plantio com dimensões de 0,40 m de largura e 0,60 m de profundidade, sendo feito o destorroamento do solo até os 0,60 m. Os tratamentos consistiram na aplicação de fertilizantes e cobertura plástica na linha de cultivo, sendo: **M**: adubação mineral; **O**: adubação organomineral; **MM**: adubação mineral + cobertura plástica; **OM**: adubação organomineral + cobertura plástica; **MZ**: adubação mineral + mineral zeólita. Neste experimento foi avaliada a influência dos manejos na variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo, assim como na sua disponibilidade às plantas, na distribuição radicular e sistema de poros. O segundo experimento foi conduzido em Cambissolo, cuja implantação de cafeeiros objetivou investigar a ação do preparo de sulco profundo associado a um adicional de corretivo agrícola nos índices de qualidade e na função normalizada de distribuição de poros por volume [$S^*(h)$] no perfil do solo. Os tratamentos consistiram de: *40* (preparo convencional com sulcador a 0,40m); *60* (abertura de sulco com preparador de solo a 0,60m com correção convencional (*60S*) e calcário complementar (*60C*)); *80* (abertura de sulco com preparador de solo a 0,80m com correção convencional (*80S*) e calcário complementar (*80C*)) além de uma área preservada e, portanto não revolvida, *Natural*. Ambas as tecnologias estudadas comprovaram sua eficácia para o cultivo de cafeeiros em áreas de solos rasos que possuem limitações ao desenvolvimento radicular, por contornar problemas advindos do déficit hídrico na fase inicial de desenvolvimento de cafeeiros. Como houve melhorias no sistema poroso dos solos ao longo dos perfis estudados, a implementação de manejos promoveu aumento de conteúdo de água disponível no perfil do solo e favoreceu o crescimento do sistema radicular das plantas.

Palavras-chave: Déficit hídrico. Preparo profundo de solo. Condicionadores de solo. Cobertura plástica. Café arábica.

ABSTRACT

Agronomic techniques that increase the efficiency of production systems in the face of climatic variations are increasingly necessary in the search for a more sustainable agriculture. The water restriction and the annual average temperature increase already significantly affect coffee productivity and quality in the main growing regions. The scarcity of water for coffee production is often caused by the reduction of the water recharge capacity of the soils due to inadequate management. In this sense, the present study proposes the use of soil management techniques that allow the efficient use of water stored in the soil, such as soil conditioners and deep furrows, to better utilize the water resource for a greater volume of soil explored. Two experiments were installed, one in the Bom Sucesso municipality located in the western physiographic mesoregion of Minas, and the other in the municipality of Nazareno located in the physiographic mesoregion Campo das Verentes, Minas Gerais. For the first one, the preparation of a Red Yellow Argisol, consisted in the opening of the grooves of planting with dimensions of 0,40 m of width and 0,60 m of depth, being made the disintegration of the ground until the 0,60 m. The treatments consisted in the application of fertilizers and plastic cover in the cultivation line, being: **M**: mineral fertilization; **O**: organomineral fertilization; **MM**: mineral fertilization + plastic cover; **OM**: organomineral fertilization + plastic cover; **MZ**: mineral fertilization + mineral zeolite. In this experiment the influence of managements on the spatial-temporal variability of soil water content, as well as its plant availability, root distribution and pore system were evaluated. The second experiment was conducted in Cambissolo, whose implantation of coffee trees was aimed at investigating the deep groove preparation associated to an additional agricultural corrective in the quality indexes and in the normalized volume pore distribution function $[S * (h)]$ in the soil profile. The treatments consisted of: 40 (conventional trowel with 0,40m furrow); 60 (groove opening with 0.60 m soil preparation with conventional correction (60S) and complementary limestone (60C)); 80 (groove opening with 0.80 m soil preparation with conventional correction (80S) and complementary limestone (80C)) in addition to a preserved area and therefore not stirred, Natural. Both technologies have proved their efficacy for the cultivation of coffee trees in areas of shallow soils that have limitations to root development, to overcome problems caused by the water deficit in the initial phase of coffee development. As there were improvements in the porous system of the soils along the studied profiles, the implementation of managements promoted increase of available water content in the soil profile and favored the growth of the root system of the plants.

Key words: Water deficit. Deep soil preparation. Soil conditioners. Plastic cover. Arabica coffee.

SUMMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO GERAL..... 11

REFERÊNCIAS..... 15

SEGUNDA PARTE: ARTIGOS

ARTIGO I - Cobertura do solo associada a diferentes fontes de adubação no desenvolvimento do sistema radicular e disponibilidade de água para plantas de cafeeiro 19

ARTIGO II - Deep furrow and additional liming for coffee cultivation in a naturally dense Inceptisol 54

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A produção mundial de café em 2017 foi de 159,663 milhões de sacas, e destas, 51 milhões são provenientes do Brasil (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION- ICO, 2018a). Assim, o Brasil é mundialmente conhecido como líder do mercado de café, desde 1850 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 1990; MARTINS; JOHNSTON, 1992), sendo esta a segunda maior commodity de exportação do mundo, ficando atrás apenas do petróleo (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO, 2011).

Segundo ICO (2018b), o volume de produção referente ao ano safra de 2017 (157,69 milhões de sacas) foi 0,7% superior ao volume de 2016, indicando também aumento médio do consumo mundial de café de 1,6%, com destaque para o aumento expressivo deste consumo na Ásia e Oceania de 3,1%. Ao que tudo indica, este mercado encontra-se em expansão no mundo, alimentando aumento na oferta e demanda de café. Em função disso, há possibilidade de aumentar as áreas cultivadas com esta cultura no Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB 2018), assim como a demanda por implantação de manejos do solo e das lavouras que assegurem a sustentabilidade e garantam o aumento de produtividade no setor.

Nacionalmente, o estado de Minas Gerais se destaca com mais de 70% de todo o café arábica (*Coffea arabica* L.) produzido no país, constituindo-se em um importante produtor mundial (CONAB, 2017). Contudo, a atividade cafeicultura é exercida predominantemente em pequenas propriedades de agricultura familiar (IBGE, 2006), sendo parte considerável em ambientes marginais, a exemplo de áreas localizadas em declividade superior a 20%, e ou em solos rasos, com destaque para os Argissolos e os Cambissolos, que recobrem respectivamente 20% e 10% das áreas cafeeiras de Minas Gerais (BERNARDES et al., 2012), e necessitando, portanto, de manejo diferenciado.

Outro fator preponderante é que a maioria dos plantios se dá em condições de sequeiro (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2013), sujeitos, portanto, aos prejuízos advindos das variações climáticas. Assim, frente às oscilações que se caracterizam por períodos de estiagem, má distribuição de chuvas e aumento de temperaturas em anos consecutivos que vem afetando a produção em diversas regiões do país (CONAB, 2014, 2015, 2016, 2017; INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2018), além do

contraste do nível tecnológico dos produtores envolvidos na cafeicultura brasileira, faz-se necessário o desenvolvimento constante de novos sistemas de manejo do solo e da cultura (PETEK; PATRÍCIO, 2007).

A produção de café está intimamente associada a fatores fisiológicos e ambientais favoráveis ao desenvolvimento da cultura, sendo sua produtividade comprometida em grande parte pelo clima, particularmente durante certos estádios fenológicos, afetados diretamente pela temperatura e disponibilidade hídrica (ASSAD et al., 2004; PICINI et al., 1999). Segundo DaMata e Ramalho (2006), não apenas no Brasil, mas também em outros países produtores de café, a seca é considerada o principal estresse ambiental capaz de afetar o desenvolvimento e a produtividade do cafeeiro, destacando que deficiências hídricas anuais superiores a 150 mm afetam a longevidade da cultura (MATIELLO, 1999).

Visto que a água é o veículo para absorção de nutrientes pela planta, considera-se que a umidade do solo influencia diversos processos fisiológicos, com efeito direto sobre a sanidade e crescimento (LIU et al., 2018). Assim como as demais culturas, o cafeeiro necessita de água facilmente disponível no solo para se desenvolver e produzir satisfatoriamente (FIALHO et al., 2010; SILVA; REIS, 2007). Neste sentido, o suprimento de água tem garantido altas produtividades (SAKAI et al., 2015), no entanto, há carência de alternativas para regiões onde a disponibilidade deste recurso é limitada, uma vez que as fontes de água para irrigação são escassas (ANA, 2018).

Condições físicas do solo consideradas ótimas para o crescimento radicular das plantas resultam de complexas interações entre resistência do solo à penetração, aeração e suprimento de água (REYNOLS et al., 2009). Desta forma, estudos vêm sendo realizados visando alterar positivamente a porosidade do solo pelo sistema de preparo (BAMBERG et al., 2011; DALMAGO et al., 2009; LEÃO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2004). Assim a abertura de sulcos profundos para o plantio do cafeeiro em lavouras não irrigadas, objetivando crescimento do sistema radicular em maiores profundidades, e consequente aumento na absorção de água e nutrientes é um exemplo de iniciativa (SERAFIM et al., 2011). A prática de abertura de sulcos profundos associada a um conjunto de manejos adequados do solo vem permitindo a exploração racional de Latossolos e Cambissolos da Mesorregião Oeste de Minas onde os problemas de déficit hídrico tem se agravado (SANTOS et al., 2014; SERAFIM et al., 2013; SILVA et al., 2015).

Desta forma as novas práticas de manejo adotadas por muitos produtores desta região cafeeira tem propiciado o condicionamento químico e físico-hídrico dos solos, potencializando o crescimento e distribuição radicular permitindo condições necessárias para

a planta buscar água em camadas mais profundas do perfil do solo, que sofrem menos efeito da evaporação (CARLESSO, 1995; MCCULLEY et al., 2004; RAIJ, 2008).

A economia de água promovida por sua preservação no perfil e o aumento de sua disponibilidade às plantas são preconizados pela utilização de condicionadores do solo, como a fertilização com organominerais e zeólitas, assim como a cobertura do solo na linha de cultivo com filmes plásticos (ZHANG et al., 2015). O uso destes aditivos visa aumentar o uso eficiente da água pelo sistema radicular das culturas, com registros de incrementos em produtividade (ABD EL-MAGEED; ZHANG et al., 2015; BABALOLA; OSHUNSANYA; ARE, 2007; LEGGO, 2015; SEMIDA, 2015). Desta forma, a adoção das mais diferentes técnicas é sugerida para agricultura de sequeiro, havendo, entretanto, carência de estudos da sua utilização no âmbito da cafeicultura, principalmente no que diz respeito à minimização dos efeitos do déficit hídrico no desenvolvimento inicial das lavouras implantadas sobre solos jovens com limitações físicas destacadas.

Dada a relevância da atividade cafeeira no estado de Minas Gerais e sua importância nos cenários nacional e mundial, esta pesquisa foi desenvolvida, e neste documento são sugeridos sistemas de manejo que promovem aumento da eficiência de utilização da água frente às variações climáticas, em dois solos considerados marginais para a cafeicultura.

Desta forma, a tese foi dividida em duas partes: a primeira parte, consta da introdução geral apresentada sobre a temática em estudo e a segunda parte é composta por dois artigos. O primeiro artigo trata da adoção de práticas de manejo potenciais para a melhoria na eficiência de uso de água pelas plantas cafeeiras em Argissolo da mesorregião Oeste de Minas Gerais. A proposta foi estudar o efeito de fertilizantes organominerais, zeólitas e cobertura plástica na variabilidade espacial do conteúdo de água do solo e do desenvolvimento radicular de cafeeiros, assim como o sistema poroso deste Argissolo. Sabendo-se das limitações físicas desta classe de solo o manejo com os condicionadores de solo citados tem potencial para promover o melhor desenvolvimento das raízes e aproveitamento de água no perfil do solo, possibilitando assim que as plantas resistam aos períodos de seca e veranicos.

O segundo artigo aborda técnicas de manejo envolvendo a abertura profunda de sulco de plantios e uso de calagem complementar na implantação de cafeeiros na mesorregião Campos das Vertentes. Com este estudo, salienta-se a importância de conhecermos o efeito da ação física do revolvimento do solo em maiores profundidades para cultivos perenes associado à prática de correção química com potencial para condicionar o maior desenvolvimento do sistema radicular em profundidade por meio da melhoria da qualidade físico-estrutural do solo influenciando assim no desenvolvimento e vigor de plantas.

Ambos estudos se fazem de suma importância, principalmente por terem foco nos primeiros anos de desenvolvimento da cultura cafeeira. Nesta fase, o desenvolvimento insciciente das plantas associado às condições climáticas com estação seca pronunciada, as torna mais sujeitas ao déficit hídrico. Desta forma a implantação de manejos que preconizam o uso eficiente dos recursos hídricos, com melhor aproveitamento da água armazenada no solo é primordial.

REFERÊNCIAS

- ABD EL-MAGEED, T.A.; SEMIDA, W.M. Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 159, p. 1–10, May. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Brasília, DF, 2013, 432 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA - Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr_nacional.htm. Acesso em: 20 fev. 2018.
- ASSAD, E.D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, nov. 2004.
- BABALOLA, O.; OSHUNSANY, S.O.; ARE, K. Effects of vetiver grass (*Vetiveria nigriflora*) strips, vetiver grass mulch and an organomineral fertilizer on soil, water and nutrient losses and maize (*Zea mays* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 6–18, Feb. 2007.
- BERNARDES, T. et al. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no estado de Minas Gerais – Brasil. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 139-15, abr. 2012.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p.183-188, nov. 1995.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2014, v.1, n. 3 - quarto levantamento, dez. 2014.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2015, v.2, n. 4 - quarto levantamento, dez. 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2016, v.3, n. 4 - quarto levantamento, dez. 2016.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2017, v.4, n. 4 - quarto levantamento, dez. 2017.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2018, v.4, n. 2 - segundo levantamento, mai. 2018.
- DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 18, n. 1, p. 55-81, Mar. 2006.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO, 2011. FAOSTAT. Agriculture Data. <http://faostat.fao.org/>
- FIALHO, G.S. et al. Behavior of *Coffea arabica* L. plants exposed to water deficits in different phases of their initial development. **Idesia**, Arica, v.28, n.3, p. 35-39, dez. 2010.
- INSTITUTO NACIONAL DE MATEOROLOGIA - INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em 01 jan. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Agricultura Familiar.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estatísticas históricas do Brasil**: séries econômicas, demográficas e sociais de 1550 a 1988 / Fundação de Geografia e Estatística. – 2 ed. revisada e atualizada, v. 3 de séries estatísticas retrospectivas. Rio de Janeiro, 1990.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO. Disponível em: http://www.ico.org/trade_statistics.asp. Acesso em 14 jan. 2018.

I INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO. Total production by all exporting countries. Disponível em: <http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>. Acesso 05 jan. 2018.

LEGGO, P. J. 2015. The efficacy of the organo-zeolitic bio-fertilizer. **Agrotechnology**, v. 4, n. 1, p. 1-4, Oct. 2015.

LIU, X. et al. Impacts of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of Arabica coffee under different shading levels in dry and hot regions of southwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 204, p. 292–300, May 2018.

MARTINS, M.; JOHNSTON, E. **150 anos de café**. Rio de Janeiro: Ed. Salamandra, 1992.

MATIELLO, J.B. **Quentes como o café: indicações de uso de equipamentos, produtos e serviços para a cafeicultura**. Rio de Janeiro: Ed. Maa/Procafé, 1999.

MCCULLEY, R.L. et al. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. **Oecologia**, Berlin, v.141, n.4, p. 620-628, Aug. 2004.

PETEK, M. R.; PATRÍCIO, F. R. A. Cultivares resistentes ou tolerantes a fatores bióticos e abióticos desfavoráveis: ponto-chave para a cafeicultura sustentável. **O Agrônomo**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 39-40, jul. 2007. Disponível em: http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/agronomico/pdf/v59_artigo7.pdf. Acesso em 07 abr. 2017.

RAIJ, B. VAN. Gesso na agricultura. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. Disponível em: [https://www.ipni.net/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d20fb44d85259bf7032572530062870e/\\$FILE/Page26-27-122.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d20fb44d85259bf7032572530062870e/$FILE/Page26-27-122.pdf). Acesso em 16 mai. 2017.

REYNOLDS, W.D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, p. 252–263, July 2009.

SAKAI, E. et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 148, p. 16–23, Jan. 2015.

SANTOS, W. J. R. et al. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, Amsterdam, v. 221, p. 562-566, June 2014.

SERAFIM, M.E. et al. Intensive coffee cultivation management in the physiographic region of the upper San Francisco river, Mg: a case study. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964–977, dez. 2011.

SERAFIM, M.E. et al. Qualidade física e Intervalo Hídrico Ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.37, n.3, p.733–742, 2013.

SILVA, B.M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.154, p.103–113, Dec. 2015.

SILVA, J. G. F.; REIS, E. F. Irrigação do cafeeiro conilon. In: FERRÃO, R. G. et al. **Café conilon**. Vitória: Ed. DCM/Incaper, 2007.

ZHANG, G.S. et al. Effects of plastic mulch and crop rotation on soil physical properties in rain-fed vegetable production in the mid-Yunnan plateau, China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 111–11, Jan. 2015.

ZHANG, G., ZHANG, X., HU, X. Runoff and soil erosion as affected by plastic mulch patterns in vegetable field at Dianchi Lake's catchment, China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 122, p. 20–27, May 2013.

SEGUNDA PARTE: ARTIGOS

Artigo I

Cobertura do solo associada a diferentes fontes de adubação no desenvolvimento do sistema radicular e disponibilidade de água para plantas de cafeeiro¹

(Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003))

RESUMO: A implantação de cafeeiros em solos com restrições físicas associada às condições de seca edafológica requerem estudo de manejos que por ventura otimizem o uso da água no perfil do solo pelas plantas pela melhoria de sua estrutura e do desenvolvimento radicular. Assim, objetivou-se verificar alterações físico-hídricas do solo em resposta à aplicação de zeólitas, fertilizante mineral e organomineral associados ao uso da cobertura plástica para a cultura do cafeeiro nos primeiros anos de desenvolvimento. Para tanto foram estudadas a variabilidade espacial do conteúdo de água do solo e da distribuição do sistema radicular e a porosidade do solo. O experimento foi instalado no município de Bom Sucesso, Minas Gerais, localizado na Mesorregião Oeste de Minas, em área de Argissolo Vermelho Amarelo. Simulando ação de um maquinário de preparo, foi realizada a abertura dos sulcos de plantio com dimensões de 0,40 m de largura e 0,60 m de profundidade, sendo feito o destorroamento do solo até os 0,60 m, revolvimento dos horizontes A e B, preservando a posição do horizonte C. Os tratamentos se distinguem quanto à aplicação de fertilizantes e cobertura plástica na linha de cultivo: **M**: adubação mineral; **O**: adubação organomineral; **MM**: adubação mineral + cobertura plástica; **OM**: adubação organomineral + cobertura plástica; **MZ**: adubação mineral + mineral zeólita. Para o monitoramento da umidade foram instalados 45 sensores TDR, distribuídos em três repetições de cada tratamento, instalados em três profundidades (0,20, 0,40 e 0,60 m). Para análise de dependência espaço-temporal utilizou-se a média diária da umidade do solo, assim como o volume, diâmetro médio e número de raízes em cada quadrícula (0,05 x 0,05m) para a construção de semivariogramas. A utilização de (**OM**) foi capaz de aumentar o conteúdo de água do solo para o desenvolvimento inicial de cafeeiros, bem como sua disponibilidade e manutenção por tempo prolongado, principalmente nos períodos de estiagem, o que não ocorreu para **MZ** e **O** em relação a **M**. Esses resultados foram condizentes com o aumento de volume assim como o aumento de raízes finas absorventes no perfil do solo, e com o aumento do diâmetro de poros mais frequente (d_{mode}) considerado grande. A utilização de mulching plástico (**OM** e **MM**) altera substancialmente a distribuição de poros, principalmente no que diz respeito aos poros de drenagem e aeração.

Palavras chave: Conteúdo de água do solo. Raízes. Distribuição de poros. Fertilizantes organominerais. Mulching.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso primordial para agricultura, sendo sua escassez o fator mais limitante para a produção sustentável de culturas (QIN et al., 2014). Assim, reduzir a perda de água por evaporação e preconizar o uso eficiente da água da chuva e do subsolo são fatores-chaves para melhorar a produtividade em agricultura de sequeiro, que representa 18% da área agrícola colhida no mundo (FAO, 2017) e 89,5% da área plantada no Brasil, o que corresponde a 49,6 milhões de hectares (ANA, 2013).

Especificamente na região sudeste do Brasil onde tem ocorrido a intensificação de anos secos, técnicas inovadoras de manejo adaptáveis à agricultura de sequeiro tem sido preconizadas, devido à escassez dos recursos hídricos para a irrigação (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012; MOSLEH et al., 2017). Neste aspecto, tem sido proposto a utilização de materiais, sintéticos ou orgânicos, para funcionar como mulching (KADER et al. 2017), e mesmo fertilizantes organominerais (ABD EL-MAGEED; SEMIDA, 2015) e zeólitas (NAKHLI et al., 2017) com o objetivo de agir como condicionadores de solo reduzindo o stress hídrico provocado às plantas nas condições de cultivo.

O uso de cobertura plástica (mulching plástico) sobre o solo na linha de plantio é uma tecnologia que tem sido utilizada para economizar água em regiões com estação seca pronunciada devido a sua função de controle de temperatura (GURNAH; MUTEA, 1982), preservando a umidade do solo (CHAKRABORTY et al., 2008) e aumentando o rendimento de culturas. Este processo promove o uso mais eficiente da água (GU; LI; DU, 2016; LI et al., 2018a; WANG et al. 2009), retarda perdas por escoamento superficial e erosão (ZHANG; ZHANG; HU, 2013). Esta proteção mecânica conferida ao solo, preserva a estrutura do solo, principalmente em superfície (ZHANG et al., 2015) e juntamente com o desenvolvimento radicular aprimorado, a produção de mucilagem e a atividade da fauna do solo, promovem a estabilização dos agregados do solo (SIX et al., 2004).

Em contraste com o cultivo convencional a cobertura plástica altera a refletância da superfície do solo e a resistência à transferência de vapor de água, alterando assim o balanço hídrico superficial, o balanço de energia e os processos de crescimento das plantas (LIAKATAS; CLARK; MONTEITH, 1986; WILSON et al., 2002; JAFARI; HAGHIGHI; ZARE, 2012). Desta forma este manejo tem sido considerado efetivo por trazer melhorias na disponibilidade de água para as plantas cultivadas durante o período de crescimento (GAO et al., 2014), aumentando o rendimento das culturas e melhorando a qualidade do produto (GU; LI; DU, 2016; LI et al., 2018a; DONG et al. 2018). Existem inúmeros estudos a respeito de

metodologias de aplicação: plástico contínuo ao longo do sulco ou com intervalos de solo descoberto e outras combinações (ZHOU et al., 2012; GAO et al., 2014; GU; LI; DU, 2016; KADER et al., 2018); assim como a coloração: preto, transparente ou branco (GURNAH; MUTEA, 1982; STEINMETZ et al., 2016; LI et al. 2018a). Como tal, a cobertura plástica tem sido amplamente utilizada na produção agrícola, como trigo, milho, algodão, soja, hortícolas em geral e outras culturas no mundo.

A aplicação de fertilizantes organominerais e de zeólitas ao sulco de plantio pode resultar em aumentos significativos na capacidade de retenção de água do solo e na condutividade hidráulica (ABD EL-MAGEED; SEMIDA, 2015; ENAMORADO-HORRUTINER et al., 2016). Tem sido relatado que os fertilizantes organominerais influenciam na agregação do solo e na distribuição do espaço poroso em função do aumento de material orgânico (HUDSON, 1994), reduzindo assim os efeitos prejudiciais do stress hídrico às culturas com registros de aumento em produtividade (BABALOLA; OSHUNSANYA; ARE, 2007; ABD EL-MAGEED; SEMIDA, 2015). Os fertilizantes organominerais variam em conteúdo mineral e orgânico, com potencial em fornecer nutrientes pela solubilização gradual, aumentando assim sua eficiência agronômica (CARVALHO et al 2014). Melhorias das características do solo foram observadas pela utilização de adubo organomineral em cultivo de cafeeiro, promovendo aumento da saturação e soma de bases, pH, Ca e P (FERNANDES et al., 2007).

O mineral zeólita por sua vez, possui elevada área superficial com capacidade de troca de cátions maior que dos solos ($>100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), além de grande quantidade de poros que propiciam água livre no interior de seus canais estruturais com elevada capacidade de adsorção (INGLEZAKIS et al. 2015; NAKHLI et al., 2017). Estas características lhe conferem o potencial para melhorias no solo como taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada (GHOLIZADEH-SARABI; SEPASKHAH, 2013), capacidade de retenção de água e capacidade de troca de cátions (IPPOLITO; TARKALSON; LEHRSCHE, 2011; INGLEZAKIS et al. 2012; BERNARDI et al., 2013). Assim, o uso de zeólitas tem se propagado com grande potencial para utilização na agricultura proporcionando melhor eficiência do uso da água e de nutrientes (SARKAR; NAIDU, 2015; GHOLAMHOSEINI et al, 2015).

Desta forma ambos aditivos tem grande potencial em reduzir os efeitos prejudiciais do stress hídrico às culturas, com registros de aumento em produtividade (BABALOLA; OSHUNSANYA; ARE, 2007; ABD EL-MAGEED; SEMIDA, 2015; LEGGO, 2015). Entretanto, existem poucas comprovações científicas a respeito da utilização do mulching

plástico (GURNAH; MUTEA, 1982), organominerais (FERNANDES et al., 2007) e zeólitas no cultivo de cafeeiros, principalmente no que diz respeito aos seus efeitos no uso eficiente da água; na estrutura do solo, e no desenvolvimento radicular das plantas.

Destaca-se que o Brasil é mundialmente conhecido como maior produtor de café, sendo esta a maior commodity de exportação agrícola do mundo (FAO, 2017). A produção no estado de Minas Gerais representa mais de 54% de todo o café produzido no país, constituindo-se um destaque mundial, principalmente com café arábica (*Coffea arábica* L.) (CONAB, 2017). No entanto, a maior parte dos plantios é realizado em elevadas altitudes com recursos limitados de fornecimento de água (CONAB, 2017), e desta forma o rendimento das culturas é altamente dependente das interações entre as fases fenológicas e as variações climáticas, provocado principalmente pela irregularidade na distribuição de chuvas (SILVA et al., 2002).

Assim, o uso de condicionadores de solo poderia reduzir os efeitos negativos do cultivo de sequeiro particularmente nos primeiros anos de desenvolvimento da cultura, salientando que para o cafeeiro o déficit hídrico no solo é o principal fator que afeta o desenvolvimento vegetativo e a produtividade (DAMATTA; RAMALHO, 2006; PEASLEY; ROLFE, 2003), uma vez que o abastecimento adequado de água aumenta a fotossíntese e a disponibilidade de assimilados para o enchimento de grãos (BARROS et al., 1997).

Neste contexto, objetivou-se verificar alterações físico-hídricas do solo em resposta à aplicação de zeólitas, fertilizante mineral e organomineral associados ao uso da cobertura plástica para a cultura do cafeeiro nos primeiros anos de desenvolvimento. Para tanto, foram estudadas a variabilidade espacial e temporal do conteúdo de água do solo, bem como da distribuição do sistema radicular e a porosidade do solo. As hipóteses são: (1) o mulching plástico, organominerais e zeólitas aumentam o conteúdo e disponibilidade de água no solo para cafeeiros em fase de implantação e (2) o enraizamento do cafeeiro, bem como a frequência de poros variam de acordo com o manejo adotado no solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área e preparo do solo

O experimento foi instalado no município de Bom Sucesso, localizado na Mesorregião Oeste de Minas Gerais (IBGE, 2017), nas coordenadas 21°06'50"E e 44°49'22,35"O, com altitude de 850 m. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Cwb, com invernos

frios e secos e verões quentes e chuvosos, sendo a precipitação média anual de aproximadamente 1500 mm (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

A área de estudo ocupa 240 m² (24 x 10m). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico tb (SANTOS et al., 2013), a topografia do terreno é ondulada, com declividade máxima de 12%, com face de exposição nordeste. Para análise da fertilidade em laboratório (TABELA 1) foi realizada coleta de solo com auxílio de um trado amostrador do tipo holandês. Todo o material de solo coletado em um total de 20 pontos fez uma amostra composta da qual foram consideradas três repetições para análise textural do solo, realizada pelo método da pipeta, sendo o solo classificado como arenoso/textura média (TABELA 1).

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo da área experimental antes da instalação dos tratamentos.

	Profundidade (m)		
	0 - 0,20	0,20 - 0,40	0,40 - 0,60
pH	5,40	5,50	5,70
MO (dag.Kg ⁻¹)	3,65	1,29	1,40
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,60	1,50	1,40
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,60	0,30	0,20
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,20	0,20	0,10
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4,70	3,00	2,50
SB (cmol _c dm ⁻³)	3,32	1,79	1,85
t (cmol _c dm ⁻³)	3,52	2,00	1,90
T (cmol _c dm ⁻³)	8,22	4,79	4,35
P (mgdm ⁻³)	1,61	0,56	0,09
K (mgdm ⁻³)	60,70	16,00	19,30
Zn (mgdm ⁻³)	3,66	0,79	0,54
B (mgdm ⁻³)	0,15	0,18	0,18
m (%)	6,54	10,10	5,13
V (%)	41,48	37,32	42,56
P-rem (mg l ⁻¹)	24,27	17,07	10,45
Argila (g kg ⁻¹)	97	175	168
Silte (g kg ⁻¹)	368	402	446
Areia (g kg ⁻¹)	535	423	386
Densidade	1,30	1,25	1,27

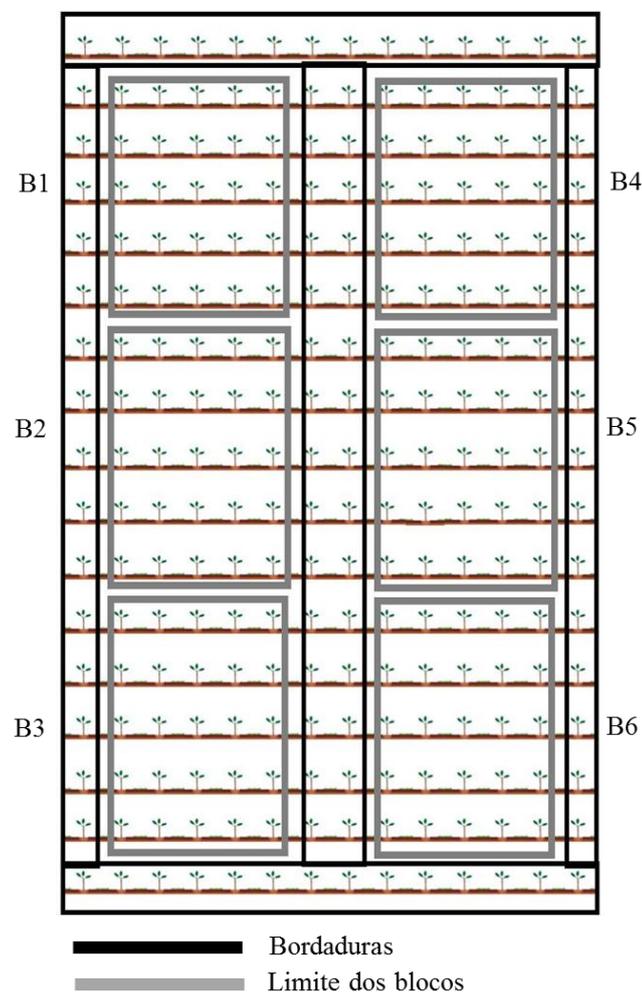
pH: potencial hidroeônico; MO: Matéria Orgânica; K: Potássio; P: Fósforo; Mg: Magnésio; Al: Alumínio; Ca: Cálcio; H: Hidrogênio; Zn: Zinco; B: Boro; SB: Soma de bases; t: capacidade de troca de cátions efetiva; T: capacidade de troca de cátions potencial V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; P-rem: fósforo remanescente.

Foi realizada abertura dos sulcos de plantio com dimensões de 0,40 m de largura e 0,60 m de profundidade (SERAFIM et al., 2011), afim de minimizar o efeito de um possível

adensamento típico dos solos jovens ocorrentes na região de estudo. A abertura do sulco foi feita no sentido transversal ao declive, e para o enchimento dos mesmos, materiais provenientes dos horizontes A e B foram misturados e retornados ao sulco acima do material do horizonte C que foi preservado.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com seis repetições e cinco tratamentos, sendo a parcela útil de cada tratamento constituída de uma linha de plantio (3,25 x 0,40 m) com cinco plantas (FIGURA 1).

Figura 1 - Delineamento da área experiemntal. Adaptado de Barbosa (2015).



As práticas de manejo consideradas para cada um dos 5 tratamentos foram: **M**: Adubação mineral seguindo recomendações de Guimarães et al. (1999) para o cafeeiro e **O**: Adubação organomineral, que seguiu a mesma recomendação para adubação mineral, considerando no entanto a composição e capacidade de liberação de nutrientes do produto orgânico; **MM**: Adubação mineral + cobertura plástica; **OM**: Adubação organomineral +

cobertura plástica; **MZ**: Adubação mineral + mineral zeólita a 0,40m. A zeólita utilizada foi um Alumínio Silicato do tipo Clinoptilolita [(Na,K,Ca)₂₋₃Al₃(Al,Si)₂Si₁₃O₃₆.12H₂O], com pH 7, densidade 0,98 g cm⁻³, com partículas de tamanho inferior a #325 MESH e 157 cmol_c kg⁻¹ de capacidade de troca catiônica (CTC) (Indústria Celta Brasil LTDA). A quantidade foi calculada objetivando cobrir 1,5 cm de altura no sulco (2000 g por metro) na profundidade 0,40 m, o que correspondeu a um aumento de aproximadamente 785 cmol_c na CTC do solo. O material orgânico utilizado para confecção do fertilizante organomineral foi originado de “cama de frango” cuja descrição se encontra na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise do material orgânico utilizado para confecção do fertilizante organomineral com origem de cama de frango.

pH	C:N	U	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MO	Ca	Mg	S	Zn	Fe	Cu	Mn	B
			----- % -----				----- g Kg ⁻¹ -----				----- mg Kg ⁻¹ -----			
7,81	7,66	21,7	1,6	2,5	1,5	28,9	72,6	26,8	12,9	201,9	16311,5	60,5	430,4	24,9

pH: potencial hidrogênio; C: carbono; N: nitrogênio; U: umidade; P₂O₅: pentóxido de fósforo; K₂O: óxido de potássio; MO: Matéria Orgânica; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S: Enxofre; Zn: Zinco; Fe: Ferro; Cu: Cobre; Mn: Manganês; B: Boro. P₂O₅ foi extraído em ácido cítrico (2%), o K₂O em água, enquanto Ca, Mg, S, Zn, Fe, Cu e Mn foram extraídos em nitroperclórico e o boro em ácido clorídrico.

Tanto o fertilizante mineral quanto o fertilizante organomineral foram distribuídos ao longo do sulco de plantio, cujas fontes e quantidades estão descritas na Tabela 3. Assim que preenchidos os sulcos e homogeneizados até 0,40m, o filme plástico (mulching) foi esticado e preso sobre a superfície com o objetivo de cobrir o solo em todo o comprimento do sulco.

O plantio foi realizado em 19 de novembro de 2013. A cultivar de café (*Coffea arabica* L.) implantada foi a Catuaí Vermelho IAC 99, que tem como característica principal o porte baixo, sendo indicada também para plantios adensados. O espaçamento adotado foi de 2,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas. As adubações de cobertura pós-plantio com nitrogênio e potássio foram realizadas em dezembro/2013, janeiro/2014, fevereiro/2014, e a adubação de primeiro e segundo anos em setembro, outubro e novembro (TABELA 3).

A variação de quantidades das diferentes fontes utilizadas se deu em função de manter o equilíbrio entre a quantidade de cada nutriente requerida.

Tabela 3 - Fontes e quantidades de fertilizantes utilizados no plantio e em cobertura.

Fonte	O, OM ^(*)	M, MM e MZ
	----- g m ⁻¹ sulco -----	
Super fosfato Simples	335,50	941,20
Esterco de Galinha	6000	103,40
Ulexita	12,50	12,50
Sulfato de Zinco	7,50	7,50
Alga Marinha	179,20	-
Sulfato de Magnésio	-	154
Cobertura		
Fonte	Plantio	1º e 2º ano
	----- g m ⁻¹ sulco -----	
Cloreto de Potássio	34,50	33,30
Sulfato de Amônio	52,56	105,26

^(*) Do produto final Organomineral decomposto, foram colocados 3,3 kg por metro de sulco. O: Organomineral, OM: Organomineral + cobertura plástica, Q: Químico, QM: Químico + cobertura plástica.

2.2 Monitoramento da umidade

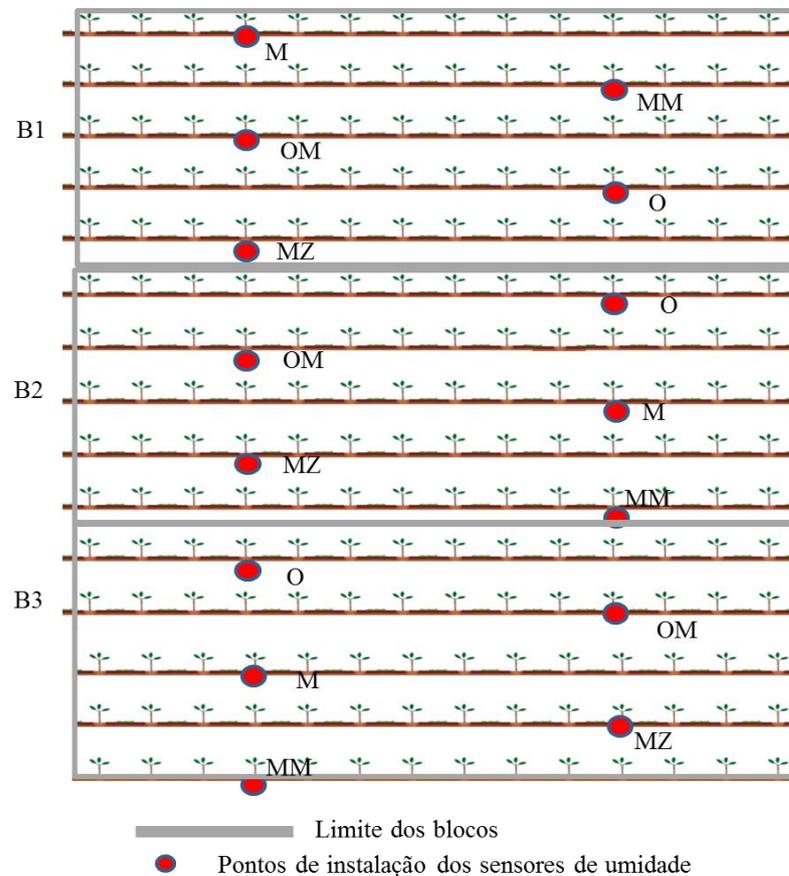
Para o monitoramento de umidade foram instalados sensores TDR marca Decagon Devices modelo EC-5 ECH₂O. Em cada tratamento foram instalados sensores ao entorno da 4ª planta da parcela experimental, na linha de cultivo, mantendo uma distância de 10 cm do caule, nas profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m, em três parcelas distintas (repetições), considerando o terço superior, médio e inferior da área experimental. Assim, foi formada uma malha totalizando 45 pontos de monitoramento (FIGURA 2). Cada sensor foi alocado nas determinadas profundidades presos a um tubo PVC de forma orientada (BARBOSA, 2015).

A coleta dos dados de umidade provenientes das leituras dos sensores deu-se durante 724 dias (06 de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2015), sendo a umidade do solo registrada e armazenada nas caixas data loggers (Decagon Devices) ao longo do dia em intervalos de uma hora. A verificação da exatidão e calibração dos sensores de umidade seguiu metodologia adotada por Silva et al. (2012), realizando um ensaio de calibração por tratamento e por profundidade. O melhor ajuste foi dado pela função linear em função do menor RMSE alcançado após calibração (BARBOSA, 2015).

Os dados de precipitação foram coletados em estação pluviométrica instalada na área experimental e os dados de temperatura foram obtidos a partir da estação pluviométrica

monitorada por INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, 2016) mais próxima do experimento, situada na cidade de Lavras, a 40 km de distância. Ressalta-se que os dados de pluviosidade para os anos de 2014 e 2015 registraram déficit de 425 mm (1086 mm) e 269 mm (1242 mm), respectivamente, em relação a média de precipitação registrada na série histórica entre os anos de 1961-1990 que é de 1511 mm para a região.

Figura 2 - Delineamento do experimento de umidade do solo com a posição em que foram alocados os sensores TDR. Mineral (**M**), Mineral com mulching (**MM**), Mineral com zeólita (**MZ**), Organomineral (**O**) e Organomineral com mulching (**OM**).

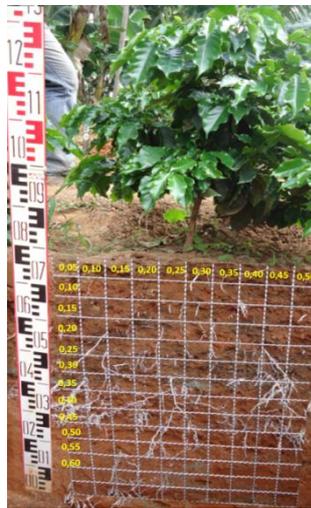


2.3 Análise do sistema radicular e medição de plantas

Foram abertas trincheiras, em dezembro de 2014 e dezembro de 2015, para avaliação do sistema radicular em cada um dos tratamentos. Para abertura das trincheiras foi considerada a primeira planta anterior e a posterior àquela onde foi instalado o sensor de umidade para o primeiro e segundo ano de avaliação, respectivamente para cada tratamento (FIGURA 2). Para tanto, foi mantida uma parede a 0,20 m de distância do caule da planta onde a partir da qual se iniciou a escarificação do solo para exposição das raízes. As mesmas

receberam uma fina camada de tinta spray branca a fim de se obter um contraste em relação ao solo (CARDUCCI et al., 2015). Um gride com quadrículas de 0,05 x 0,05 m foi colocado com exatidão paralelamente à parede da trincheira à frente das raízes com dimensão de 0,5 x 0,6 m, constituindo 120 unidades (quadrículas) amostrais (FIGURA 3). Em seguida, foram obtidas imagens digitais 2D por meio de uma câmera fotográfica com resolução de 14 megapixels.

Figura 3 - Esquema da montagem do gride na trincheira para análise do sistema radicular.



As imagens foram alinhadas e processadas, a fim de se obter um melhor contraste entre raízes e solo, no programa Adobe Photoshop CS5 12.0.4. Posteriormente, cada unidade amostral foi submetida ao programa Safira (JORGE; SILVA, 2010), onde a partir da imagem pretratada foram geradas as variáveis de área superficial (mm^2), volume (mm^3) e número de raízes para diferentes diâmetros (mm).

2.4 Curvas de retenção de água

Foram coletadas amostras indeformadas de solo, em anéis volumétricos (0,064 m de diâmetro e 0,025 m de altura) com auxílio de um amostrador do tipo Uhland, em quatro profundidades: 0-0,05; 0,15-0,20; 0,35-0,40; 0,55-0,60 m, em cada tratamento, respeitando as seis repetições dispostas ao acaso na área experimental (FIGURA 1). As amostras indeformadas foram saturadas lentamente com água destilada e após este processo cada uma

delas foi submetida sucessivamente aos potenciais matriciais (h) de -2, -4, -6, -8 e -10 kPa, na unidade de sucção composta por funis de placa porosa e h de -33, -100, -500; -1000; -1500 kPa no extrator de Richards (KLUTE, 1986). Após atingirem o equilíbrio, as amostras foram pesadas e colocadas em estufa de circulação forçada à temperatura de 105 - 110°C por 24 horas, para obtenção do conteúdo de água (θ) nos potenciais a que foram submetidas.

As curvas de retenção de água (CRA) foram ajustadas ao modelo de van Genuchten (1980) (Equação 1), cujos parâmetros empíricos n e α foram obtidos com o auxílio do software SWRC (Dourado Neto et al. 2000), considerando a restrição de Mualem, (1976), onde $m = 1 - 1/n$.

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r \quad (1)$$

em que: h é o potencial matricial da água no solo (kPa); θ o conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s o conteúdo de água na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r o conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). A capacidade de campo (CC) foi obtida pelo equilíbrio de amostras indeformadas em unidade de sucção ao potencial de -6 kPa (OLIVEIRA et al., 2004), o ponto de murcha permanente (PMP) considerado como a umidade residual em -1500 kPa, e a capacidade de armazenamento de água disponível determinada pela diferença entre CC e PMP (TEIXEIRA et al., 2017).

2.5 Função Normalizada de Distribuição de Poros

Assumindo a metodologia descrita em Reynolds et al., (2009), a função de distribuição do volume de poros, $S_v(h)$ (adimensional), foi definida como a inclinação da CRA expressa em um gráfico com conteúdo volumétrico de água, θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) versus $\ln(h)$:

$$S_v(h) = m(\alpha h)^n \left[1 + \frac{I}{m} \right]^{(m+1)} \quad (2)$$

Esta função é plotada contra o diâmetro de poro equivalente, d_e (μm) (REYNOLDS et al., 2009). O parâmetro d_e pode ser determinado usando a equação de ascensão capilar (WARRICK, 2002):

$$d_e = \frac{4\gamma \cos\omega}{\rho_w g h} \approx \frac{2980}{h} ; h > 0(\text{cm}); d_e(\mu\text{m}); \text{temperatura da água} = 20^\circ\text{C} \quad (3)$$

onde $\gamma = 72,80 \text{ N m}^{-2}$ é a tensão superficial da água; $\rho_w = 0,99 \text{ g cm}^{-3}$ é a densidade da água; $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ é a aceleração gravitacional, e $\omega \approx 0$ é o ângulo de contato da molécula de água com a parede do poro.

A função de distribuição de volume de poros "normalizada", $S^*(h)$, é definida dividindo $S_v(h)$ por S_{v_i} resultando em:

$$S^*(h) = \frac{S_v(h)}{S_{v_i}} = \frac{m(ah)^n [1+m^{-1}]^{m+1}}{[1+(ah)^n]^{(m+1)}}; 0 \leq S^*(h) \leq 1 \quad (4)$$

Em que S_{v_i} é o pico da distribuição do volume dos poros, correspondente à inclinação do ponto de inflexão da CRA, e que ocorre no valor do diâmetro mais frequente (d_{mode}).

As funções de distribuição de volume de poros normalizadas foram comparadas segundo Reynolds et al. (2009), utilizando-se parâmetros de localização, que são os valores de diâmetro de poro médio (d_{mean}), mais frequente ou modal (d_{mode}) e mediano (d_{median}). Estes parâmetros fazem uso do d_e em função de θ , escrito na forma:

$$d_\theta = \frac{2980\alpha}{(\theta^{-1/m} - 1)^{1/n}}; 0 \leq \theta \leq 1 \quad (5)$$

Os valores, mediano, modal e médio de d_e são dados respectivamente por:

$$d_{mean} = \exp\left(\frac{\ln d_{0,16} + \ln d_{0,50} + \ln d_{0,84}}{3}\right) \quad (6)$$

$$d_{median} = \frac{2980\alpha}{(0,5^{-1/m} - 1)^{1/n}}; \theta = 0,5 \quad (7)$$

$$d_{mode} = \frac{2980\alpha}{(\theta_i^{-1/m} - 1)^{1/n}} = \frac{2980\alpha}{m^{1/n}} \quad (8)$$

Os valores para os diferentes diâmetros ($d_{0,16}$, $d_{0,84}$, d_{θ_i}) são obtidos substituindo θ na equação 5.

2.6 Análise estatística

Para o conteúdo de água no solo utilizou-se a média diária de leituras, com a finalidade de facilitar o processamento dos dados. Para os dados de raiz foram utilizadas a soma para volume e área, assim como a média dos diâmetros e número total de raízes para cada unidade amostral analisada.

A dependência espaço-temporal do conteúdo volumétrico de água no solo, volume, área, diâmetro e número de raízes foi avaliada por meio da construção de semivariograma

pelo pacote geoR no programa R (R CORE TEAM, 2016), que é realizada pelos cálculos das semivariâncias segundo a equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{x_i, x_j} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad \text{tal que, } |x_i - x_j| = h \quad (9)$$

Onde: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_j)$ são os valores da variável Z nos respectivos pontos i e j , e n é o número total de dados.

O semivariograma é representado pelo gráfico $\gamma(h)$ versus h . Os dados passaram por retirada de tendência e teste de anisotropia anteriormente ao ajuste do modelo teórico. Assim, foram determinados os parâmetros de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e o alcance (a). Para análise da dependência espacial foi utilizada a relação $C/(C_0 + C)$ e os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994) que consideram: dependência espacial fraca ($< 25\%$); moderada ($25\% \leq < 75\%$) e forte ($\geq 75\%$). De posse dos parâmetros, os mapas foram gerados com auxílio dos pacotes geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001) e ggplot2 (WICKHAM, 2009) segundo a krigagem ordinária.

Para gerar o mapa categorizado de disponibilidade de água para a planta, o conteúdo de água foi classificado de acordo com Silva et al. (2015) onde valores acima da CC foram considerados como água facilmente drenável (AFD) e abaixo do PMP como sendo água fortemente retida (AFR). O mapa categorizado de diâmetro de raiz seguiu classificação de Rena e Guimarães (2000) e Motta et al. (2006): raízes finas ou absorventes (< 1 mm), raízes médias ($1 < d < 3$ mm) e raízes grossas ou permanentes (> 3 mm).

Para a comparação entre sistemas de manejo, foi realizada análise de variância e quando significativo, aplicou-se o teste de médias de Tukey ($p < 0,05$) para medidas dos parâmetros de localização, utilizando-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros geoestatísticos

Os parâmetros do modelo de semivariograma ajustado estão apresentados na Tabela 4. O modelo esférico, foi o que melhor se ajustou, considerando uma distância máxima de 50% dos dados. O valor pepita para a variabilidade espacial no perfil do solo foi acima de zero para conteúdo de água, diâmetro e volume de raíz, o que pode ser associado a erros causados pelos instrumentos de medição e pelos fenômenos de ocorrência natural. Segundo Fang et al.

(2016) a variação espacial pode ser determinada pelos fatores estruturais do solo, bem como o fator de cultura e meteorológico.

No geral, os valores C/C_0+C apresentam-se abaixo de 25%, estes são considerados baixos, configurando uma forte correlação espacial da umidade do solo e das variáveis de raiz para as condições de campo testadas (CAMBARDELLA et al., 1994).

Tabela 4 - Valores do efeito pepita (C_0); patamar (C_0+C); alcance (a); e dependência espacial (C/ C_0+C) para estudo do conteúdo de água no solo e variáveis de raiz em função do tratamento adotado para manejo do solo.

Conteúdo de água (2014 e 2015)				
	C_0	C_0+C	a	C/ C_0+C
M	9,99	35,45	189,35	0,28
MM	7,03	29,48	194,02	0,24
MZ	5,78	12,91	131,45	0,45
O	17,47	49,47	177,38	0,35
OM	10,09	52,86	199,37	0,19

Diâmetro de raiz								
	----- 2014 -----				----- 2015 -----			
	C_0	C_0+C	a	C/ C_0+C	C_0	C_0+C	a	C/ C_0+C
M	0,01	0,06	0,07	0,18	0,01	0,04	0,08	0,19
MM	0,01	0,07	0,07	0,13	0,00	0,02	0,05	0,23
MZ	0,01	0,05	0,06	0,12	0,01	0,03	0,09	0,16
O	0,01	0,04	0,06	0,13	0,01	0,03	0,07	0,20
OM	0,00	0,05	0,06	0,04	0,01	0,03	0,08	0,19

Número de raiz								
M	0,00	5,27	0,07	0,00	1,21	8,14	0,08	0,15
MM	4,47	8,44	0,21	0,53	2,48	14,28	0,11	0,17
MZ	4,40	3,62	0,18	0,12	0	15,94	0,09	0,00
O	3,12	5,10	0,24	0,61	4,18	12,26	0,11	0,34
OM	4,99	11,17	0,17	0,45	3,04	12,75	0,16	0,24

Volume de raiz								
M	1108,50	7973,56	0,07	0,14	17572,44	144443,75	0,09	0,12
MM	4994,46	40360,29	0,07	0,12	8881,75	78530,38	0,09	0,11
MZ	936,03	8537,04	0,06	0,11	2289,31	33994,86	0,15	0,07
O	7242,78	54186,00	0,14	0,13	10135,31	87591,16	0,09	0,12
OM	2684,60	42953,56	0,09	0,06	53746,08	445250,54	0,15	0,12

3.2 Umidade do solo e disponibilidade de água para planta

Os mapas de superfície gerados a partir da krigagem, confrontando valores de conteúdo de água por profundidade de solo *versus* período de observação, são apresentados na

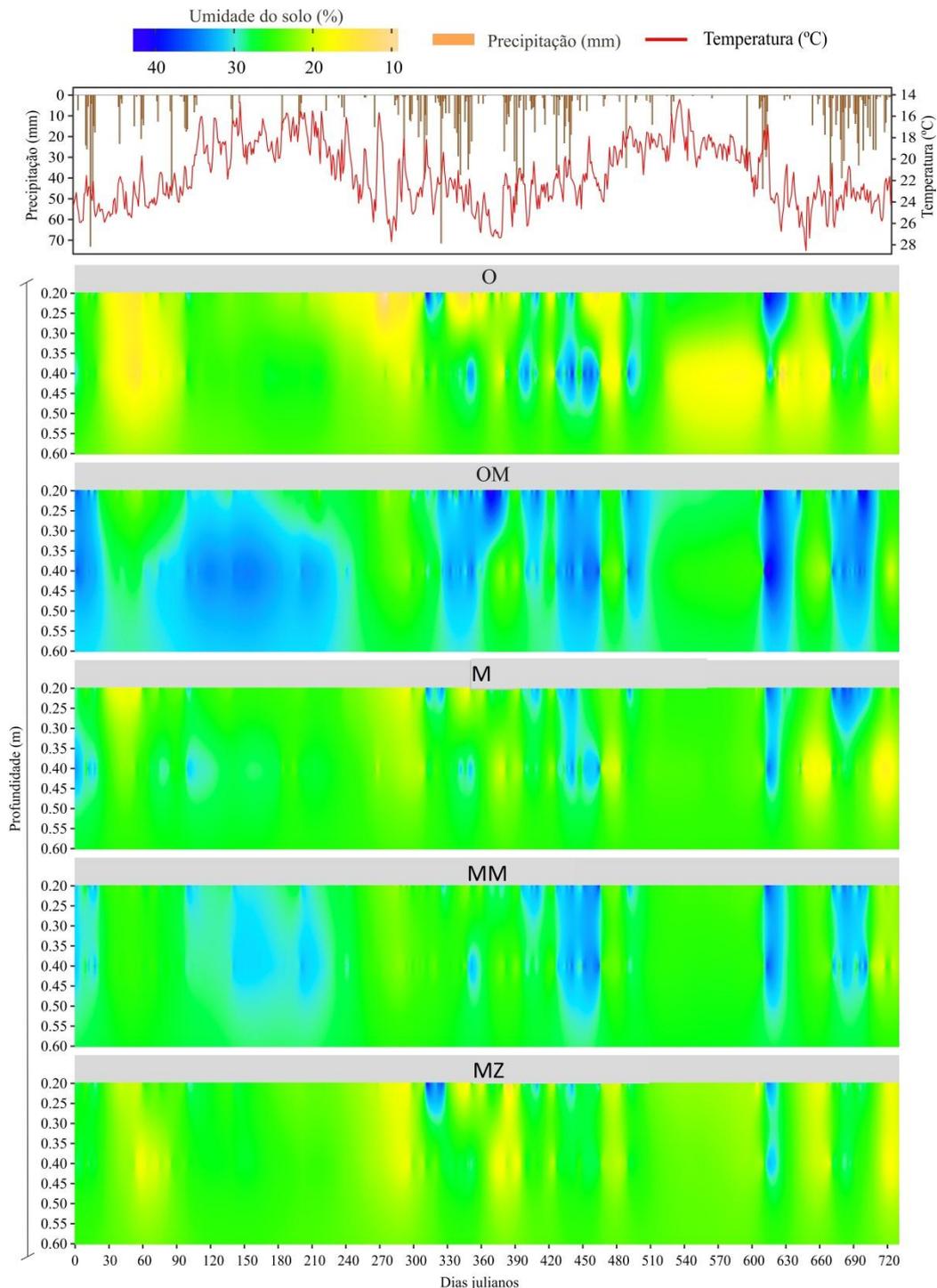
Figura 4. A ação dos diferentes manejos altera o padrão de distribuição de umidade do solo, que varia de acordo com os condicionadores testados e também por influência da sazonalidade de precipitação ao longo dos 724 dias de monitoramento. Períodos de maior precipitação elevaram o conteúdo de água do solo, enquanto a falta de chuvas nos períodos de seca, aliada a ocorrência das maiores temperaturas, refletem na redução da umidade do solo, como causa do aumento da evapotranspiração (JIA et al., 2006; GAO et al., 2004).

Assim têm-se maiores porcentagens de umidade no solo em dois períodos do ano, entre janeiro e abril e entre outubro e dezembro, coincidindo com as maiores precipitações, sendo estes padrões válidos tanto para o ano de 2014 quanto para 2015. Observa-se que entre maio e setembro as precipitações são mais escassas (FIGURA 4), salvo o período entre agosto e setembro de 2015 quando precipitações entre 30 e 45 mm recarregaram o conteúdo de água no perfil do solo para ambos os manejos. Observa-se que **OM** e **MM** apresentam uma menor variabilidade no conteúdo de água do solo ao longo do perfil, com aumento de seu conteúdo, de forma mais expressiva para **OM**. Este efeito deve-se ao uso da cobertura plástica protegendo o solo das interações com os fatores externos que intensificam a perda de água por evapotranspiração (GAO et al., 2004).

As camadas mais superficiais do solo (acima de 0,40m) apresentam valores de conteúdo de água menores se comparados àqueles das camadas mais profundas no período de outubro a dezembro de 2014, quando foram registradas as maiores temperaturas do ano 2014 e 2015 (26 a 28° C). No entanto, observa-se uma maior variabilidade espacial do conteúdo de água para os tratamentos **O**, **M** e **MZ** (FIGURA 4), uma vez que o solo descoberto é submetido a maior exposição à radiação solar, o que potencializa a evaporação em sua superfície (ZRIB et al., 2015).

Desta forma, períodos de estiagem prolongada na fase inicial de desenvolvimento do cafeeiro geram grande preocupação, pelo fato da planta ser muito sensível nesta fase quanto ao fornecimento de água (RENA et al., 1994) devido ao menor desenvolvimento do sistema radicular, como constatado pela marcante diferença entre os dois anos avaliados (FIGURA 6 A e B). É nesta fase que as raízes necessitam das melhores condições físicas e químicas do solo para facilitar a absorção da água porventura existente nas maiores profundidades (GAO et al., 2016, CARDUCCI et al., 2015), ocasião onde normalmente a camada superficial já não pode suprir a demanda evapotranspirativa (SILVA et al., 2015).

Figura 4 - Mapas de krigagem para distribuição espaço temporal do conteúdo de água variando em função do manejo do solo: Mineral (M), Mineral com mulching (MM), Mineral com zeólita (MZ), Organomineral (O) e Organomineral com mulching (OM). Temperatura e precipitação diária na área experimental durante o período de 06 de Janeiro de 2014 a 31 de Dezembro de 2015 para a região de Lavras, MG (estação meteorológica mais próxima à área experimental). Fonte: INMET.



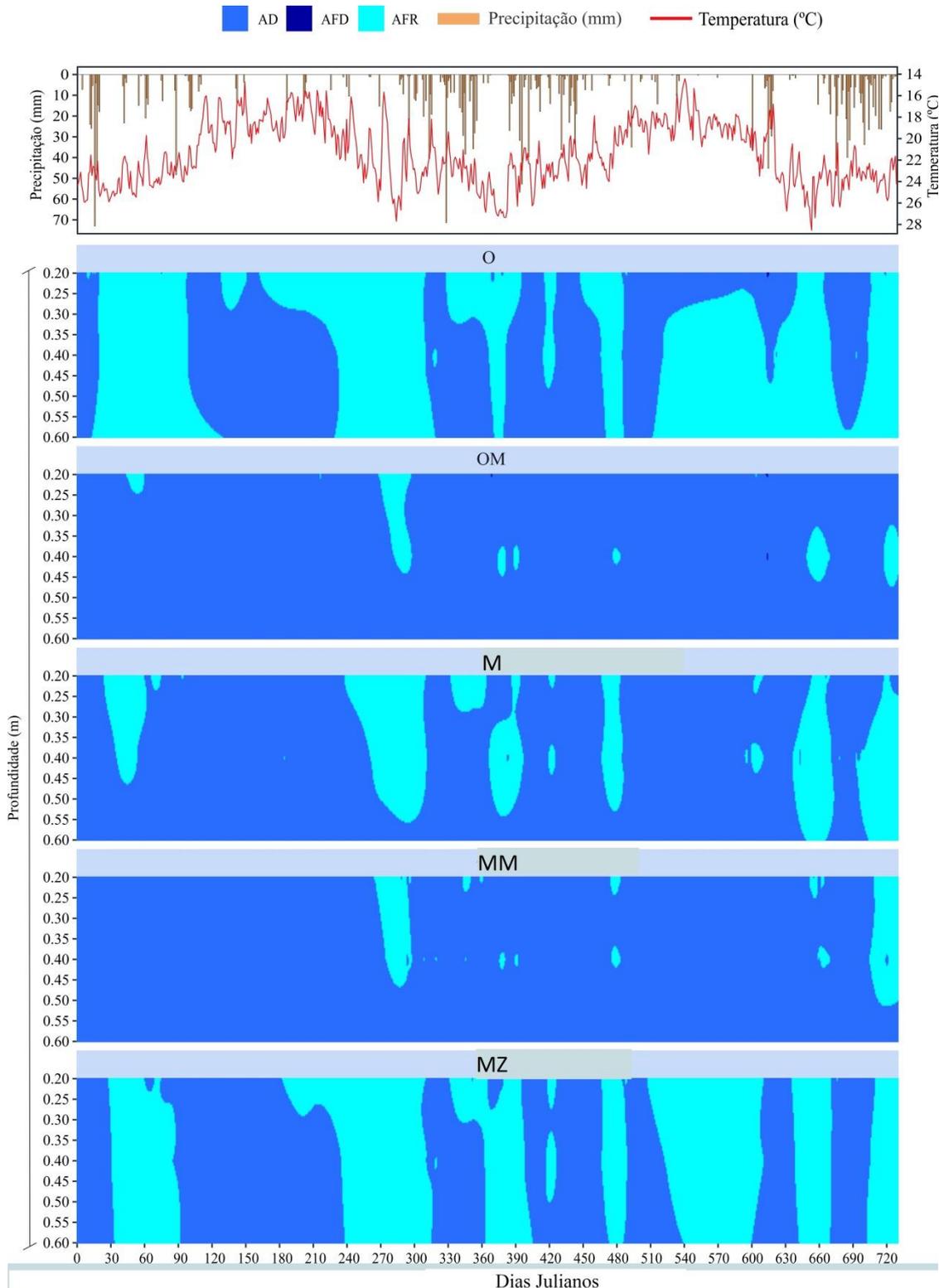
Os menores valores de conteúdo de água são observados (FIGURA 4) para o tratamento organomineral na ausência da cobertura do solo (**O**), principalmente no início da avaliação (fevereiro a março de 2014); neste período o conteúdo de água apresenta-se de forma mais variável, com valores oscilando entre 15 e 25%. Esses valores são classificados como água fortemente retida no solo conforme a Figura 5, portanto não disponível para a planta. Essa condição reflete a evaporação em condições de ausência de cobertura do solo, que também estaria associado à grande transpiração das plantas.

O aumento do conteúdo de água no solo acontece com a chegada do período chuvoso, que ocorre entre os dias 300 e 400 e também entre 600 e 690 (FIGURA 4). Mas mesmo neste período o manejo que se utiliza do fertilizante organomineral na ausência de cobertura do solo (**O**) foi o que se apresentou com os menores conteúdos de água, sinalizando para a possibilidade de que o molhamento foi seguido de rápida evaporação. Esses resultados diferem dos encontrados por Abd El-Mageed e Semida (2015), onde a adubação com organomineral na produção de pepino aumentou até 11% do conteúdo de água em solo arenoso em relação à adubação convencional, mas é de se destacar que neste experimento o solo estava submetido à irrigação.

Esperava-se que a adição do material orgânico no fertilizante organomineral (**O**) atenuasse os efeitos de déficit hídrico pelos efeitos da matéria orgânica na retenção de água de forma direta, devido sua área superficial específica e a grande quantidade de cargas superficiais. Ou mesmo por seus efeitos indiretos atuando no comportamento físico do solo na formação de agregados e distribuição do espaço poroso (HUDSON 1994, ABD EL-MAGEED; SEMIDA, 2015; MURPHY, 2015). No entanto os dados de conteúdo de água (FIGURA 4) não apontaram os benefícios que o material orgânico do tratamento **O** poderia acarretar sobre as condições testadas. Contudo, a adição de cobertura plástica em conjunto com a fertilização com organominerais (**OM**) proporcionou condições mais favoráveis para o armazenamento de água (FIGURAS 4 e 5).

Para confirmar a última hipótese, observa-se que o tratamento **M** que também não está protegido pela cobertura plástica, apresenta na maior parte do período avaliado umidade entre 20 e 30% (FIGURA 4). As áreas sombreadas pela cor azul coincidem com a ocorrência dos maiores índices de pluviosidade, onde de 20 a 40 mm contribuíram com uma faixa de umidade entre 30 a 35% para camadas superficiais. Esta água percola até o máximo de 0,45m no perfil do solo para este manejo mineral convencional, mas com valores ainda entre 20 e 30% a partir desta profundidade. Observa-se a ocorrência dos menores valores de umidade (faixa de 10 a 20%) para camada de 0,30 a 0,50m entre outubro e dezembro de 2015.

Figura 5 - Mapas categorizados para distribuição espaço temporal da disponibilidade de água variando em função do manejo do solo. AD: água disponível, AFD: Água facilmente drenável e AFR: água fortemente retida. Temperatura e precipitação diária na área experimental durante o período de 06 de Janeiro de 2014 a 31 de Dezembro de 2015 para a região de Lavras, MG (estação meteorológica mais próxima à área experimental). Fonte: INMET.



O tratamento **MZ** tem comportamento de variabilidade similar ao convencional **M** (FIGURA 4), no entanto apresenta valores de umidade ainda menores. Desta forma, não foi observado nenhum comportamento peculiar que possa ser associado à ação do mineral zeólita aplicado à profundidade de 0,40 m. Apesar de poucos relatos da utilização deste material em campos agrícolas com reflexos em retenção de água, os resultados aqui descritos diferem daqueles encontrados por Bernardi et al. (2013), onde a utilização deste mineral foi significativa no aumento da retenção de água, assim como nos conteúdos de água disponível e facilmente disponível para as plantas. O aumento da disponibilidade de água no solo quando da utilização deste mineral também foi relatado por Ippolito, Tarkalson e Lehrs (2011) com reflexos na produtividade de milho, no entanto ambos resultados foram obtidos para solos arenosos. Em Latossolo Vermelho argiloso, Barbosa et al. (2014) relataram alterações na curva de retenção de água pela mistura de solo com mineral zeólita, que refletiu em aumento de até 30% da água disponível às plantas.

A utilização da cobertura plástica (**OM** e **MM**) foi capaz de manter o conteúdo de água em faixas mais elevadas que os demais tratamentos (25 a 30%) na maior parte do período avaliado (FIGURA 4). Isso pode ser explicado pela redução de área de solo exposta para evaporação, o que propiciou maior conservação de água em profundidades além dos 0,45m, como sugerido por Gao et al. (2015) e Jia et al. (2006) como estratégia de eficiência de uso de água. Este efeito foi importante, sobretudo em períodos secos, contribuindo para manter a água da chuva na zona radicular de forma pronunciada e eficiente na época mais crítica. Em comparação com a cobertura plástica, os sistemas **M**, **O** e **MZ** armazenaram menor conteúdo de água provinda das precipitações, estando mais sujeitos a evaporação, reduzindo os efeitos provenientes da contribuição das chuvas (GAO et al., 2014, ZRIB et al., 2015). O efeito da cobertura do solo na alteração da relação solo-água-planta segundo Allen et al. (2007), pode implicar redução de 50 a 80% sobre a taxa de evaporação e de 5 a 30% nas taxas de evapotranspiração.

Comparando **OM** e **MM**, o primeiro pode ser considerado como o manejo mais eficaz por manter maiores conteúdos de água no solo no período avaliado. Estes manejos foram capazes de reduzir de forma mais eficiente a variabilidade do conteúdo de água no perfil do solo até os 0,60 m. É de se destacar que isto ocorreu não somente para os primeiros meses avaliados, mas praticamente durante todo o período seco, assim como para o segundo período de maior distribuição de chuvas (outubro a dezembro 2014 e 2015). Os valores de conteúdo de água permaneceram altos ao longo de todo ano, com valores acima de 30%, mesmo para períodos posteriores àqueles de ocorrência de chuva (dias julianos 210 ao 240, por exemplo).

Esses resultados corroboram com o aumento do conteúdo de água proporcionado pela utilização de mulching plástico em relação a solo descoberto observados por Dong et al. (2018) e Li et al. (2018b) para a cultura do milho. Maiores valores de umidade do solo também foram relatados por Abd El-Mageed e Semida (2015) em função das propriedades orgânicas advindas da aplicação de fertilizante organomineral, reduzindo os efeitos prejudiciais do stress hídrico para hortaliças. Sugere-se que a associação dos dois condicionadores de solo (organominerais e mulching plástico) potencializa o aumento do armazenamento de água no solo devido à proteção contra agentes externos, em acordo com os resultados obtidos (FIGURA 4).

Ainda é desconhecido o efeito combinado do cultivo de plantas sob mulching plástico com fertilizantes orgânicos ou mesmo organominerais na variação e disponibilidade do conteúdo de água do solo. No entanto, trabalhos científicos já apontam para aumentos do carbono no solo e da atividade microbiana com a associação de filme plástico e fertilizantes orgânicos favorecendo o desenvolvimento de culturas (JIN et al., 2018; NA et al., 2015).

Tendo em vista que o estágio inicial de crescimento dos cafeeiros é uma fase crítica para o desenvolvimento e conseqüente estabelecimento e longevidade da cultura, o uso da técnica de cobertura do solo em ambientes edáficos com limitação de recursos hídricos foi eficiente na manutenção de conteúdos de água disponível no solo, confirmando as hipóteses formuladas neste trabalho. O mesmo não foi observado para os tratamentos com o mineral zeólita e mesmo para a aplicação isolada de organomineral.

3.3 Sistema Radicular

As raízes do cafeeiro apresentaram diferentes padrões de crescimento no perfil do solo nos cinco sistemas de manejo (FIGURAS 6 e 7). Para o primeiro ano, observa-se que os condicionadores de solo, exceto **MZ**, foram eficazes no aumento do volume do sistema radicular, sendo as raízes melhor distribuídas verticalmente em **OM** e **MM**, cujos valores foram de até 1000 mm³, aos 0,60 m de profundidade.

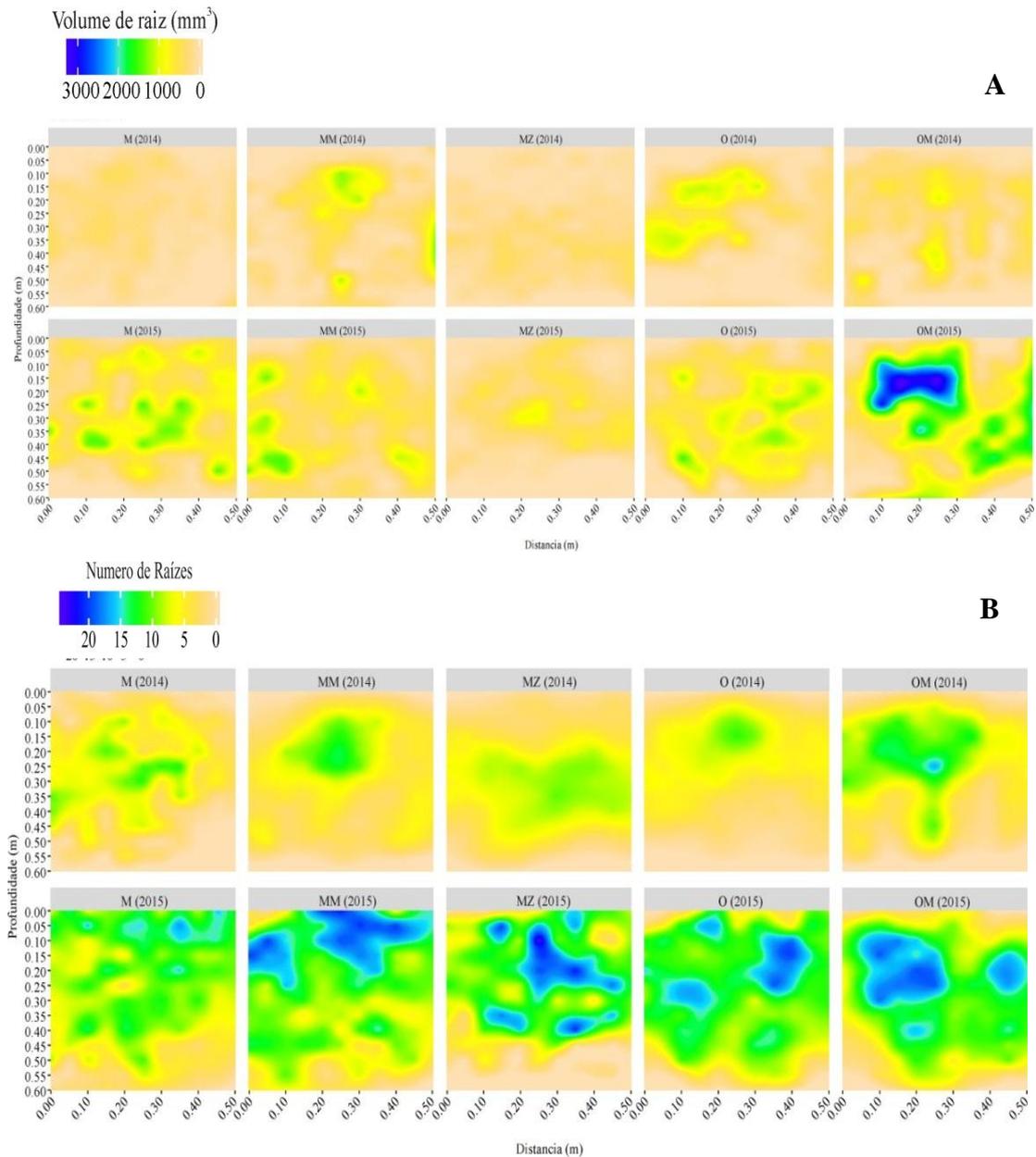
O déficit de 425 mm na precipitação para o ano de 2014 em relação ao esperado pela série histórica registrada para a região de acordo com o INMET (FIGURA 4) corroborou para uma redução drástica no volume de raízes nos cafeeiros manejados de forma convencional, salientando a necessidade de adoção de técnicas de manejo para aumentar a resiliência a essas situações em lavouras comerciais. Este fato confirma que a arquitetura do sistema radicular é influenciada pelas condições de umidade no perfil do solo (GAO et al., 2014; NING et al.,

2015), tendo em vista que maiores volumes de raízes foram encontrados em solo que apresentou maior disponibilidade de água (FIGURAS 6 e 7). Em solo mais úmido, como em condições de irrigação, o desenvolvimento superficial de raízes deve ser relacionado com a maior umidade nessas camadas (BULL, 1963). No entanto, SAKAI et al. (2015) relatam que plantas de cafeeiros irrigados e não irrigados apresentaram uma profundidade de raiz efetiva de 0,50m.

Os resultados apresentados (FIGURA 6) são consonantes com afirmações de Gu, Li e Du (2016), que verificaram um maior crescimento radicular de colza de inverno onde o solo foi protegido com cobertura plástica, apresentando maior umidade do solo e uso mais eficiente de água. Em estudo do desenvolvimento do sistema radicular de cafeeiro em Latossolo Vermelho muito argiloso e gibssítico, Silva et al. (2015) apresentando mapa de superfície contínua da umidade do solo afirmaram que o maior volume de raízes de cafeeiros concentradas na profundidade de 0,50 - 0,75 m resultou em menores conteúdos de umidade nesta camada do solo. Os autores justificam que o sistema de manejo adotado otimizou o aprofundamento do sistema radicular levando a um maior consumo de água, indicando que a profundidade efetiva para absorção de água pela cultura é função do condicionamento físico-químico dado ao solo.

Para o segundo ano, as raízes em **OM** apresentam-se melhor distribuídas e mais volumosas que nos demais manejos, com predomínio destas até 0,45m (3000 mm³ acima de 0,15 m e até 2000 mm³ > 0,25m), comprovando que a ação do organomineral potencializou o uso da cobertura plástica no condicionamento do sistema radicular das plantas. Comparativamente, o uso isolado da cobertura plástica (**MM**) tem comportamento similar ao manejo do solo de forma convencional (**M**), apresentando até 1500 mm³ de raízes, como indicado pelas cores mais claras (FIGURA 6, A). Ainda assim, estes resultados superam os alcançados em Latossolo Vermelho argiloso utilizando tratamento convencional similar ao aqui adotado avaliado por Carducci et al. (2015). Estes autores relatam que cafeeiros com 3 anos de idade apresentaram predominância de raízes até 0,25 m (com até 3000 mm³) em relação a maiores profundidades do perfil solo. Segundo Gao et al. (2016) diferenças de solo e manejo são fatores mais importantes que o próprio genótipo na definição de profundidade de enraizamento.

Figura 6 - Mapas para distribuição espacial do volume (A) e número (B) de raízes variando em função do manejo ao final do primeiro ano (2014) e segundo ano (2015) de desenvolvimento do cafeeiro.



A aplicação do fertilizante organomineral aumenta a matéria orgânica do solo e as concentrações de nutrientes, reduzindo a densidade do solo em função do aumento na porosidade total e umidade do solo (ABD EL-MAGEED; SEMIDA, 2015). Esses fatores associados à ação da cobertura plástica (**OM**) retardando a evaporação do solo e aumentando a disponibilidade de água para as plantas (FIGURA 5) certamente contribuíram significativamente para o aumento do volume e número de raízes do cafeeiro nas condições estudadas (FIGURA 6).

Em 2014 o número de raízes encontradas variou de 1 a 10 ao longo do perfil do solo (FIGURA 6, B), exceto para **O**, e elas se concentraram mais em superfície, até 0,25 m. As raízes distribuíram-se em maior quantidade na parte central do sulco de plantio, na projeção do centro do tronco das plantas. Um maior número de raízes (até 15) foi observado para o manejo **OM**, quando estas apresentam uma distribuição mais homogênea até 0,35 m e alcançam a profundidade de 0,50 m. Em 2015 o número aumentou para classe de 10 - 15 raízes, para ambos os tratamentos ao longo do perfil, onde se encontraram bem distribuídas, com menor alcance em profundidade para o tratamento **MZ** (0,50 m). Neste ano também foi possível observar a ação dos condicionadores de solo aumentando o número de raízes para classes de 15 a > 20 até uma profundidade média de 0,30m em relação ao manejo convencional, e classes de 10 a 15 até 0,60 m (exceto **MZ**). Em consonância com nossos resultados, Gao et al. (2014) observaram predomínio de raízes de milho na camada de 0-0,30 m independentemente do manejo adotado, sugerindo que a cobertura plástica, mesmo proporcionando maior umidade nas camadas superficiais, não alterou o padrão de distribuição de raiz, embora tenha aumentado seu volume em todo o perfil do solo.

Para a variável diâmetro, existe predominância de raízes ≤ 1 mm (FIGURA 7, C e D), sendo estas de grande importância fisiológica, tendo em vista que sua maior permeabilidade da membrana permite maior atividade na absorção de água e nutrientes (JESUS; CARVALHO; SOARES, 2006). Esses resultados são concordantes com os de Carducci et al. (2015), onde foi registrada maior concentração de raízes finas de cafeeiro em todo o perfil do solo três anos após a implantação de *Coffea arabica* L., com manejo do solo também a 0,60 m de profundidade. Ainda sobre cafeeiros, Inforzato e Reis (1963) encontraram maior concentração de raízes finas a 0,50 m enquanto Defrenet et al. (2016) relataram abundância de raízes com diâmetro menor que 1 a 2 mm concentradas a 0,30 m..

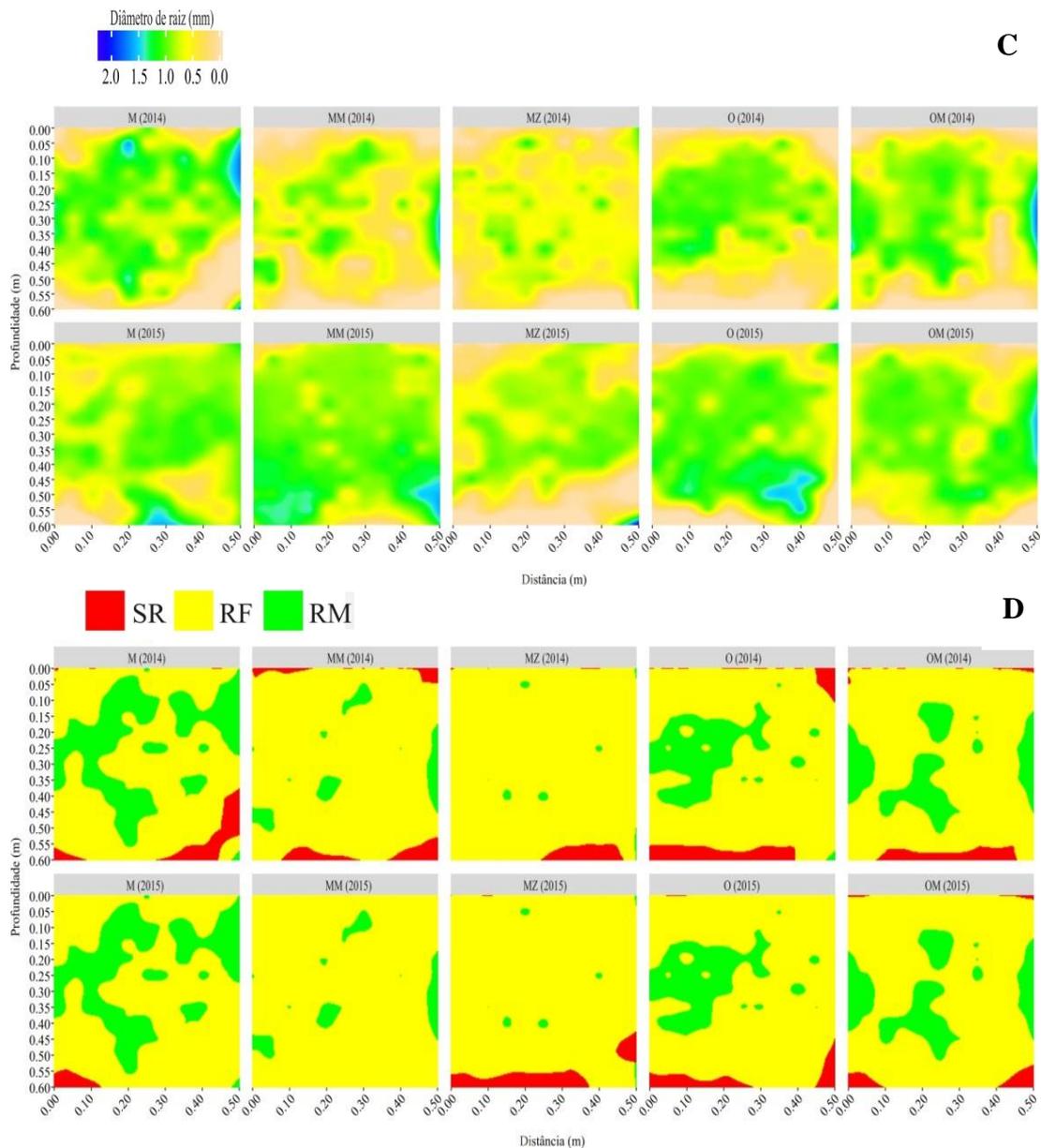
Observa-se que o padrão de distribuição das classes de diâmetro de raízes é similar para os dois anos de avaliação (FIGURA 7, D). No entanto, o manejo do solo que recebeu mulching e organomineral (**MM**, **O** e **OM**) interferiu de forma benéfica, aumentando a relação raízes finas (RF)/ raízes médias (RM). O manejo convencional apresentou a maior concentração de raízes médias ($1 < \emptyset \leq 3$ mm), que possuem menor eficiência na absorção de água (CARDUCCI et al., 2015).

Levando-se em consideração que as principais características do sistema radicular de *Coffea arabica* L. são estabelecidas até os 5 anos de idade, quando então as plantas completam seu desenvolvimento (RENA; GUIMARÃES, 2000), um sistema de enraizamento mais desenvolvido no início do período de crescimento pode adaptar melhor a cultura aos

ambientes com estação seca pronunciada (FAGERIA, 2006). Assim, mesmo que as plantas do presente estudo ainda estejam no início do ciclo produtivo (LAVIOLA et al., 2007), com base no que foi relatado é de se supor que já apresentem desempenho satisfatório ainda que estudados apenas os primeiros 0,60 m do perfil do solo. Desta forma, já foi possível constatar a eficácia da utilização de condicionadores de solo na otimização do desenvolvimento radicular. No entanto, a continuidade desta pesquisa se faz necessária com vistas a complementar o entendimento do comportamento do sistema radicular em função da umidade do solo em maiores profundidades, uma vez que o estudo de manejos que objetivam reduzir o efeito de déficit hídricos são preconizados até o oitavo ciclo produtivo da cultura (CARR, 2001).

A função de distribuição de poros ($S^*(h)$) foi alterada pelo manejo diferenciado com os condicionadores de solo, especialmente a 0,05 m com a utilização do mulching plástico (FIGURA 8), quando **OM** e **MM** promovem um deslocamento nítido da curva $S^*(h)$ à direita se comparada às de **M**, **MZ** e **O**. Ou seja, os manejos com cobertura plástica provocaram um aumento expressivo no diâmetro de poros em função da frequência, o que também é percebido de forma mais sutil para as demais profundidades. Resultados semelhantes foram encontrados para um sistema de rotação em campo de hortaliças, onde o efeito da cobertura plástica dobrou o volume de poros com diâmetro $> 60 \mu\text{m}$ (ZHANG et al., 2015). A cobertura do solo, ainda que com mulching vegetal, indicou maiores valores para macroporosidade, na faixa de diâmetro de poros de 50 a 500 μm , no cultivo mínimo de trigo (GŁĄB; KULIG, 2008) em relação ao tratamento sem cobertura. Esses resultados se dão possivelmente em função da proteção contra os agentes externos exercida pela cobertura do solo protegendo os agregados da ação de degradação, prevenindo o aumento de densidade e degradação do carbono orgânico (ZHANG et al., 2015, WANG et al., 2017), com conseqüente reflexo na porosidade do solo.

Figura 7 - Mapas para distribuição espacial do diâmetro (C) e diâmetro por classe de raízes (D) variando em função do manejo ao final do primeiro ano (2014) e segundo ano (2015) de desenvolvimento do cafeeiro. Classes de raízes: $\leq 1\text{mm}$ são raízes finas (RF); $1 < \varnothing \leq 3\text{mm}$ são Raízes médias (RM) e $> 3\text{ mm}$ são Raízes grossas (RG); Sem raiz (SR).



3.4 Função normalizada de distribuição de volume de poros

A modificação da porosidade é evidenciada na análise dos parâmetros de localização da $S^*(h)$, onde observa-se maiores valores para o diâmetro mais frequente de poros (d_{mode}), promovido pela ação do mulching plástico (**OM** e **MM**) (TABELA 5) em relação ao

tratamento essencialmente mineral (**M**). Observa-se que pelo valor do diâmetro, esta modificação ocorreu particularmente para a classe dos macroporos ($> 80 \mu\text{m}$), segundo Brewer, (1964). Estes poros também chamados estruturais (DEXTER; RICHARD, 2009) possuem grande importância ambiental e agrônômica no que se refere aos processos dinâmicos de drenagem e aeração (WHITE, 2006), afetando diretamente a elongação radicular (VALENTINE et al., 2012). Correlação positiva entre poros de elevado diâmetro e desenvolvimento de raízes finas foram registrados em cultura cafeeira por Carducci et al. (2015), corroborando com os resultados deste trabalho (FIGURA 7, D; TABELA 5).

A maior frequência de poros estruturais de maior diâmetro (d_{mode}) (FIGURA 8) propicia melhor desenvolvimento e distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo devido à redução dos impedimentos físicos como observado nos mapas de crescimento de raízes (FIGURA 6, A). Em contrapartida, este possível estímulo ao desenvolvimento radicular desempenha um papel essencial na formação e estabilização dos agregados do solo, contribuindo para uma configuração mais homogênea do diâmetro de poros (CARDUCCI et al., 2015).

Ao contrário dos manejos com o mulching, a ação isolada do organomineral (**O**) e da zeólita (**MZ**) promoveram redução do d_{mean} e d_{median} em relação ao manejo convencional (**M**). Estes resultados atrelados ao mapa de superfície de disponibilidade de água (FIGURA 5) demonstram a menor eficiência dos manejos **O** e **MZ** no suprimento de água para a cultura, o que também refletiu no menor desenvolvimento radicular (FIGURA 6), principalmente no ano de 2014 em que a chuva foi mais deficitária.

Logo, melhorias na estrutura do solo, inferidas pela melhor distribuição de poros ocasionada pela utilização da cobertura plástica aperfeiçoam a exploração dos recursos do solo pelas plantas, permitindo que o sistema radicular alcance maiores profundidades, possibilitando o uso mais eficiente da água e de nutrientes (GAO et al., 2014; GU; LI; DU, 2016).

Figura 8 - Função Normalizada de distribuição de volume de poros [$S^*(h)$] nos diferentes manejos para o perfil do solo.

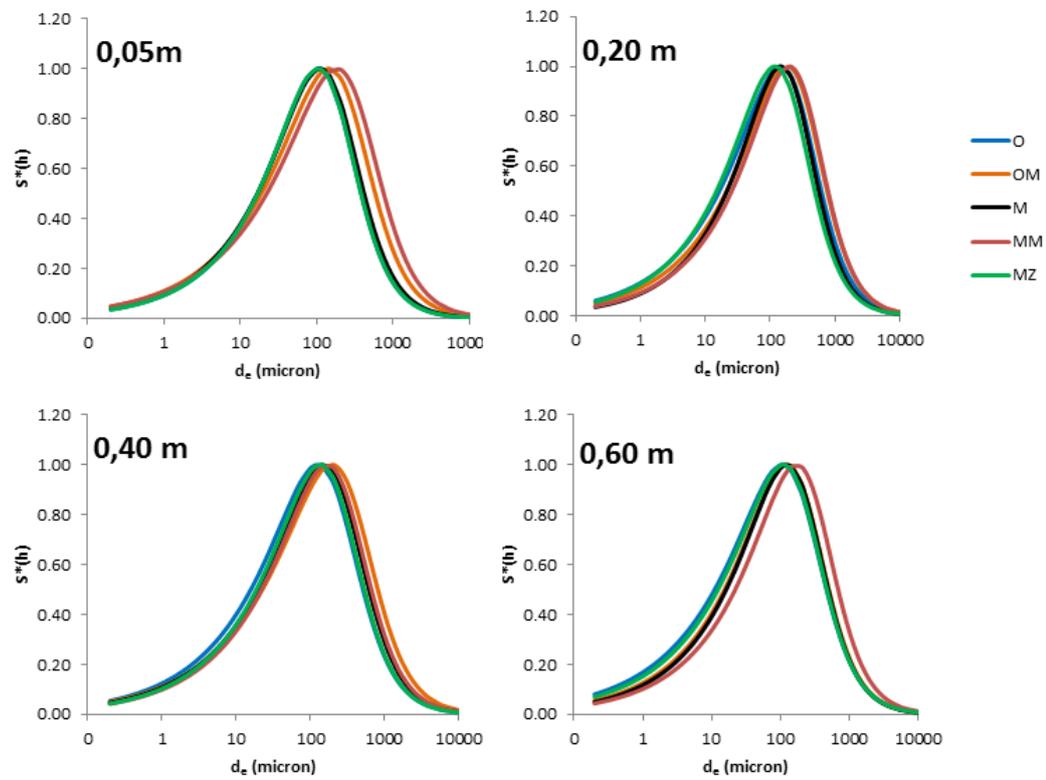


Tabela 5 - Parâmetros de localização (d_{mode} : diâmetro modal, d_{median} : diâmetro mediano e d_{mean} : diâmetro médio) da função normalizada de distribuição de poros para os diferentes manejos adotados no plantio de cafeeiros.

Manejo	d_{mode}	d_{median}	d_{mean}
	micron (μm)		
O	119,36b	68,30c	52,60c
OM	152,69a	83,46b	63,17b
M	131,00b	78,15b	61,22b
MM	174,99a	100,39a	77,05a
MZ	116,29b	68,44c	53,19c
CV (%)	27,69	26,5	28,18

Médias seguidas por uma mesma letra comparando a ação entre manejos não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Skott-knott.

4 CONCLUSÕES

a) A utilização de fertilizantes organominerais associados à cobertura plástica (**OM**) foi capaz de aumentar o conteúdo de água no perfil do solo ao longo do tempo, condicionando

aumentos na disponibilidade de água para as plantas em relação aos demais tratamentos no desenvolvimento inicial de cafeeiros.

b) O uso da cobertura plástica (**MM** e **OM**) aumentou a frequência de poros estruturais relacionados com a drenagem, aeração e desenvolvimento radicular, com potencial em alterar a dinâmica da água e aumentar o potencial de aproveitamento de água pelas plantas.

c) A ação do **OM** mostrou ainda implicações em maior volume e número de raízes, além de aumento da relação raízes finas/raízes médias, indicando um maior potencial de absorção de água. Portanto, a adoção desse manejo condiciona o solo para minimizar os efeitos negativos de déficits hídricos recorrentes na região do estudo. No entanto sugerem-se pesquisas futuras em diferentes solos e se possível em maior profundidade de avaliação e maior série temporal considerando anos mais úmidos, para assim avaliar os efeitos de manejos nas propriedades físicas do solo e sua implicação no padrão de desenvolvimento e produção do cafeeiro.

REFERÊNCIAS

- ABD EL-MAGEED, T.A., SEMIDA, W.M. Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 159, p. 1–10, Sep. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013. Brasília: ANA, 2013, 432 p.
- ALLEN, R. G. et al. Water requirements. In: Hoffman, G. J. et al. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: Ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, cap. 8, p. 208–288.
- AN, T. et al. Carbon fluxes from plants to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic film mulching and fertilizer application using ^{13}C pulse-labeling. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 80, p. 53-61, Jan. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6022: Informação e documentação: artigo em publicação periódica científica impressa. Rio de Janeiro, 2003.
- BABALOLA, O.; OSHUNSANY, S.O.; ARE, k. Effects of vetiver grass (*Vetiveria nigriflora*) strips, vetiver grass mulch and an organomineral fertilizer on soil, water and nutrient losses and maize (*Zea mays* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 6–18, Oct. 2007.
- BARBOSA, S.M. **Condicionamento físico hídrico do solo como potencializador do crescimento inicial do cafeeiro**. 2015. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- BARBOSA, S.M. et al. Potential use of zeolites in attenuation water deficit in cerrado Latosol. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, suplement, p. 2357-2368, 2014.
- BARROS, R.S. et al. Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 54, p.65–72, Aug.1997.
- BERNARDI, A. C. et al. Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. **Microporous and Mesoporous Materials**, Amsterdam, v. 167, p. 16–21, July 2013.
- BREWER R. Fabric and Mineral Analysis of Soils. Wiley, New York, 1964.
- BULL, R.A. Changes in the root systems induced by mulching and irrigation. In: Mitchell, H.W. **Studies on the effect of yield and irrigation on root and stem development in *Coffea arabica* L.** Nairobi: Ed.Turrialba, 1963, v.13, p. 96–115.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 37, p. 1-36, Jan. 2001.
- CARDUCCI, C.E. et al. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 145. p. 171-180, Jan. 2015.

- CARVALHO, R.P. et al. Organomineral fertilization on the chemical characteristics of Quartzarenic Neosol cultivated with olive tree. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 176, p. 120–126, Sep. 2014.
- CHAKRABORTY, D. et al. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p.1323–1334, Dec. 2008.
- CHEN, B. et al. Modelling soil water dynamic in rain-fed spring maize field with plastic mulching. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 198, p. 19–27, Feb. 2018.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Safra 2017, v.4, n. 4 - quarto levantamento, dez. 2017.
- DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Campinas, v.18, p.55–81, Mar. 2006.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, p.1862–1866, dez. 2007.
- DEFRENET, E. et al. Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. **Annals of Botany**, London, v. 118, p. 833-851.1–19, Aug. 2016.
- DEXTER, A.R., RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 113–118, Apr. 2009.
- DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. Model based geostatistics. New York :Springer Series in Statistics, 2007.
- DONG, Q. et al. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 201, p. 133–143, Mar. 2018.
- DOURADO NETO, D. et al. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n.1, Mar. 2000.
- ENAMORADO-HORRUTINER, Y. et al. Cuban zeolite for lead sorption: application for water decontamination and metal quantification in water using nondestructive techniques. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 13, p. 1245–1256, Mar. 2016.
- FAGERIA, N.K. Influence of dry matter and length of roots on growth of five field crops at varying soil zinc and copper levels. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 1517–1523, Aug. 2006.
- FANG, K. et al. Comparative analysis on spatial variability of soil moisture under different land use types in orchard. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 207, p. 65–72, Aug. 2016.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO.

Statistical Databases. Agriculture. Disponível em:

<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>. Ano base: 2002. Acesso em Junho de 2017.

FERNANDES, A.L.T. et al. Avaliação do uso de fertilizantes organominerais e químicos na fertirrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, p. 159–166, abr. 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple Comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.38, n.2, p. 109-112, apr. 2014.

GAO, W. et al. Deep roots and soil structure. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 39, p. 1662-1668, Feb. 2016.

GAO, Y. et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.156, p. 40–47, Feb. 2014.

GHOLAMHOSEINI, M. et al. Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.126, p.193–202, Jan. 2013.

GHOLIZADEH-SARABI, S.; SEPASKHAH, A. R. Effect of zeolite and saline water application on saturated hydraulic conductivity and infiltration in different soil textures. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.5, p.753–764, Jan. 2013.

GU, X.; LI Y.; DU, Y. Continuous ridges with film mulching improve soil water content, root growth, seed yield and water use efficiency of winter oilseed rape. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 85, p. 139–148, July 2016.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999.

GURNAH, A.M.; MUTEA, J. Effects of mulches on soil temperatures under arabica coffee at kabete, kenya. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 25, p. 237-245, 1982.

ĞLAB, T.; KULIG, B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, p. 169–178, June 2008.

HUDSON, B. Soil organic matter and available water capacity. **Journal Soil Water Conservation**, Amsterdam, v. 49, p. 189–193, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/caracteristicas_da_populacao_tab_municipios_zip_xls.shtm. Acesso em 03 jan 2017.

INFORZATO, R.; REIS, A.J. Estudo comparativo do sistema radicular dos cafeeiros Bourbon amarelo e Mundo Novo. **Bragantia**, Campinas, v. 22, p. 74–750, 1963.

INGLEZAKIS, V. et al. Experimental studies and modeling of clinoptilolite and vermiculite fixed beds for Mn²⁺, Zn²⁺, and Cr³⁺ removal. **Desalination and Water Treatment**, Abingdon, v. 57, p. 11610-11622, Jan. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE MATEOROLOGIA - INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso de dados em Janeiro de 2016.

IPPOLITO, J. A.; TARKALSON, D. D.; LEHRSCHE, G. A. Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth. **Soil Science**, Baltimore, v. 176, p. 136–142, Mar. 2011.

JAFARI, M.; HAGHIGHI, J.A.P.; ZARE, H. Mulching impact on plant growth and production of rainfed fig orchards under drought conditions. **Journal of Food Agriculture and Environment**, Helsinki, v. 10, p. 428–433, Jan. 2012.

JESUS, A. M. S.; CARVALHO, S.P., SOARES, Â.M. Comparação entre sistemas radiculares de mudas de *Coffea arabica* L. obtidas por estaquia e por sementes. **Coffee Science**, Lavras, v.1, p.14-20, Jan. 2006.

JIA, Y. et al. Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 97, p. 167–175, June 2006.

JIN, X. et al. Enhanced conversion of newly-added maize straw to soil microbial biomass C under plastic film mulching and organic manure management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, p. 154-162, Mar. 2018.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D.J.C.B. SAFIRA: manual de utilização. São Carlos, SP. Embrapa/CPDIA 2010.

Kader, M.A. et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 168, p. 155-166, may 2017.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. **Methods of soil analysis: Part 1- Physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: Ed. SSSA Book, American Society of Agronomy, 1986, p. 635-660.

LAVIOLA, B. G. et al. Dinâmica de cálcio e magnésio em folhas e frutos de *Coffea arabica* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 319–329, 2007.

LEGGO, P. J. 2015. The efficacy of the organo-zeolitic bio-fertilizer. **Agrotechnology**, v. 4, n. 1, p. 1-4, Oct. 2015.

Li, Q. et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 221, p. 50–60, May 2018a.

Li, S. et al. Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 201, p. 309–318, Mar. 2018b.

LIAKATAS, A.; CLARK, J.A.; MONTEITH, J.L. Measurements of the heat balance under plastic mulches. Part I. Radiation balance and soil heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 36, p. 227–239, Feb. 1986.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S.J. **The Saga of the Agricultural Development of the Brazilian Cerrado**. e-ifc, no.32:29-57, November, IPI 60 anniversary

- issue. 2012. Disponível em: <https://www.ipipotash.org/en/eifc/2012/32/5/english>.
- MURPHY, B.W. Impact of soil organic matter on soil properties - a review with emphasis on Australian soils. **Soil Research**, Rome, v.53, p. 605-635, Sep. 2015.
- MOSLEH, Z. et al. Sustainable allocation of agricultural lands and water resources using suitability analysis and mathematical multi-objective programming. **Geoderma**, Amsterdam, v. 303, p. 52-59, Oct. 2017.
- MOTTA, A.C.V. et al. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, p. 455–463, Feb. 2006.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v.12, p.513-522, June 1976.
- NAKHLI, S.A.A. et al. Application of Zeolites for Sustainable Agriculture: a Review on Water and Nutrient Retention. **Water Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v.228, n. 464, p. 1-34, Nov. 2017.
- NIETHER, W. et al. Spatial-temporal soil moisture dynamics under different cocoa production systems. **Catena**, Amsterdam, v. 158, p.340-349, Nov. 2017.
- NING, S. et al. Generalization of the root length density distribution of cotton under film mulched drip irrigation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 177, p.125–136, June 2015.
- OLIVEIRA, G.C. de et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, p. 327-336, 2004.
- QIN, S. et al. Effect of ridge–furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 131, p. 87-94, Jan. 2014.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: Ed. R Foundation for Statistical Computing, 2016.
- RENA, A.B., GUIMARÃES, P.T.G. Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: Ed. EPAMIG (Documentos, 37), 2000.
- RENA, A.B. et al. Coffee . In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. C. **Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops**, v. 2, Sub-Tropical and Tropical Crops, Florida: Ed. CRC Press, 1994, p. 101-122.
- REYNOLDS, W.D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v.152, p. 252–263, Sep. 2009.
- RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package from geo-statistical analysis. **R-News**, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.
- SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013, 353 p.

SAKAI, E. et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 148, p. 16–23, Jan. 2015.

SARKAR, B.; NAIDU, R. 2015. Nutrient and water use efficiency in soil: the influence of geological mineral amendments. In: RAKSHIT; BEHADUR; SEN. **Nutrient use efficiency: from basics to advances**. London: Ed. Springer, 2015, p. 29–44.

SERAFIM, M. E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964-977, out. 2011.

SILVA, B. M. et al. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 1, p. 277–286, fev. 2012.

SILVA, B.M. et al. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, p. 39-47, Feb. 2015.

SILVA, V.P.R. et al. Modelo de previsão de rendimento de culturas de sequeiro, no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.83-87, 2002.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, p. 7–31, Mar. 2004.

PEASLEY, D.; ROLFE, C. **Developing Irrigation Strategies for Coffee Under SubTropical Conditions**. Barton: Ed. RIRDC, 2003, 52p.

TEIXEIRA, P.C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. Empresa brasileira de pesquisas agropecuárias (Embrapa-Solos). 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017, 573 p.

VALENTINE T.A. et al. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, London, v. 110, p. 259–270, June 2012.

van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science America Journal**, Madson, v. 44, p. 892-898, Sep. 1980.

WANG, Y. et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 374–382, Mar. 2009.

WANG, L. et al. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.167, p. 46–53, Apr. 2017.

WARRICK, A.W. **Soil Physics Companion**. Ed. CRC Press LLC, Boca Raton, 2002.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2009.

WHITE, R.G; KIRKEGAARD, J.A. The distribution and abundance of wheat roots in a

dense, structured subsoil – implications for water uptake. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 33, p. 133–148, Nov. 2010.

WILSON, K. et al. Energy balance closure at fluxnet sites. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 113, p. 223–243, Dec. 2002.

ZHANG, G.S. et al. Effects of plastic mulch and crop rotation on soil physical properties in rain-fed vegetable production in the mid-Yunnan plateau, China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 111–11, Jan. 2015.

ZHOU, L. et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize–soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.126 , p. 181–188, Feb. 2012.

ZRIBI, W. et al. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 40–45, May 2015.

Artigo II

Deep furrow and additional liming for coffee cultivation in a naturally dense Inceptisol

(Formatado de acordo com a versão submetida ao periódico Soil and Tillage Research)

Abstract: Naturally dense soils have been commonly managed for coffee plantations in Vertentes Fields physiographic zone of Minas Gerais state, Brazil. Such dense soils in association with the irregular rainfall in recent years have increased risks for crop productivity. Therefore, management practices aiming at improving subsoil root exploration have been recommended for enhancing absorption of water and nutrient uptake, thus mitigating the edaphic drought process and ensuring the development, productivity, and longevity of the coffee crop. A field experiment was carried out in an area of dense Inceptisols through the planting of coffee crop to investigate the effect of deep furrowing with additional liming on soil quality indexes and a function of normalized pore distribution by volume [$S^*(h)$]. The experimental design was in randomized blocks with 5 treatments: 40 (conventional soil preparation with furrows at 0.40 m of depth); 60 (soil preparation with furrow to 0.60 m of depth with conventional (60S) and complementary liming application (60C)); 80 (soil preparation with furrow to 0.80 m of depth with conventional (80S) and complementary liming application (80C)). These treatments were compared to an area under native Cerrado vegetation. Six months after the crop planting, undisturbed soil samples were collected at different depths in each treatment. On these samples, water content was measured at different matrix potentials, and physical quality indicators along with the $S^*(h)$ were calculated. The results indicated that the soil management practices, compared to the native condition, promoted a better distribution of water and air (AC, P_{AWC} , RFC, P_{MAC} and S index) as well $S^*(h)$ up to 0.40 m. Below this depth, none of the management practices were able to promote significant improvements ($p < 0.05$) of these variables in relation to the soil native condition. The 80C treatment had the best air and water availability, with an expressed increase of the pore size class having functions of drainage and aeration. Moreover, this treatment stood out in comparison to the conventional management (40) for all measured variables, maintaining the adequate conditions of the native area in depth. For the managed areas, the depth of 0.60 m was the one that best improved growth and vegetative vigor of the coffee plants.

Keywords: Physical quality indicators; pore distribution; water availability; soil preparation; subsoiling.

1. Introduction

The State of Minas Gerais is the largest producer of Arabica coffee in Brazil, concentrating more than 70% of all the country's production. In 2017, the planted area in this state was 1,235,114 hectares, representing 56% of the total planted area in Brazil. From the total world production of 159.1 million bags of Arabica coffee in 2016, Brazilian production represented 35% (Conab, 2017).

Due to high market price of coffee, the crops have been drawing attention of many Brazilian producers who, in turn, have started new plantations even in soils that are considered less appropriate for such activities. Most of these soils are Inceptisols, which have physical attributes restrictive to root system development and deep rooting of the soil, such as small effective depth and naturally high bulk density, due to that a substantial part of the porous system is naturally filled with silt size particles. These soils in general have nutrient deficiency, which potentially reduces the tolerance of the crop to abiotic stress, especially in relation to climatic oscillations, impacting the biennial production of coffee crops.

Chemical limitations have been mitigated by the application of limestone (Rodrigues et al., 2001, Grieve et al., 2005), agricultural gypsum, and fertilizers. However, actions aiming at physical improvements are often neglected. Since the coffee crops in the State of Minas Gerais, Brazil, are mostly managed without irrigation, the main factor limiting the production is related to edaphic drought. Rainfall irregularity in addition to recurrent short dry periods within the rainy summer season have affected the crop in critical phases of water demand (Fialho et al., 2010), promoting a significant reduction in production and sustainability of coffee crop growing under these conditions (Serafim et al., 2013a, 2013c; Silva et al., 2015a), especially in dense and shallow Inceptisols.

The preparation of both compacted and naturally dense soil subsurface layers with a subsoiler is one of the most effective ways to improve soil structure (Akinci et al., 2004;

Medeiros, et al., 2013). This method is able to loosen the soil by breaking up and surpassing the surface layer without inverting it, increasing soil permeability to water and air as well as water storage capacity (Qin et al., 2014). Moreover, subsoiling can increase root activity in the subsurface, which allows the plants to access the water available at depth, thus reducing stress conditions (Cai et al., 2014; Querejeta et al., 2001; Santos et al., 2014).

The methodology used for soil preparation varies according to the region of the country as a function of the local production systems. In the case of perennial crops, machinery is mostly used for opening furrows at the time of planting and harvest (Löp et al., 2012; Serafim et al., 2011). However, for planting coffee crops, most producers adopt plowing and harrowing in the entire area, followed by preparation of the furrow up to 0.40 m of depth (Matielo et al., 2015).

In the Minas Gerais state, Brazil, Rena et al. (1986) reported that subsoiling coffee planting lines promoted an increase of up to 60% in production. Many producers have been adopting a differentiated preparation system that includes furrowing followed by homogenization of soil with a rotary hoe that allows for the incorporation of amendments and fertilizers up to the depth of 0.60 m (Mafes, 2017), eliminating chemical, or even physical, impediments (Serafim et al., 2011).

Studies conducted in very clayey soils in Minas Gerais state, confirmed that with the adoption of the aforementioned management practices there was an increase in macroporosity and reduction in bulk density in the planting furrow (Silva et al., 2012). This allowed for a better distribution of the root system of the coffee plants in the soil profile (Carducci et al., 2015; Silva et al., 2016) and, hence, greater absorption of water by plants (Santos et al., 2014; Silva et al., 2015b). For annual crops, such as soybean (Ghosh et al., 2006), corn (Cai et al., 2014; Qingjie et al., 2014), cotton (Akinci et al., 2004), potato (Guaman et al., 2016), sunflower (Botta et al., 2006), and in integrated grain production systems (Tian et al., 2016;

Zhang et al., 2017), there are reports of the use of deep furrows in different soil classes. However, the authors have not found papers in the literature regarding soil preparation to depths greater than 0.40 m for the cultivation of coffee plants in naturally dense and shallow Inceptisols.

Löf et al. (2012) reported preparation at depths of 0.50 to 0.70 m through subsoiling for forest crops. Moreover, deep soil preparation for planting of other perennial crops has been used for citrus (Medeiros et al., 2013), vines, and apple trees (Bechtle, 1985). These studies reported the effect of subsoiling on soil structure, with improvements in physicohydraulic conditions, optimizing root development and increasing crop yield, particularly in regions with a welldefined and prolonged dry seasons associated with recurrent short dry periods with a rainy summer season.

Considering that soil management can alter the configuration of the soil porous system, this study tests the hypothesis that the chemical and physicohydraulic conditioning of the soil by the deep furrowing with additional liming can alleviate the high bulk density effects of shallow Inceptisols on coffee plants. Furthermore, these management practices should correct chemical constraints of the soils, which are consider marginal for the coffee cultivation. In the present study, a field experiment was conducted in Minas Gerais state, Brazil. Soil evaluations were performed shortly after the end of the first year of coffee cultivation, which is considered a critical period for coffee development. The objectives were to characterize the effects of soil preparation on the physical quality of a Cambisol and thus provide basis for coffee cultivation with respect to the operations related to soil furrows preparation and additional liming in regions with aggravating water deficit.

2. Material and methods

2.1 Study area location and characterization

The experiment was installed in a farm located at Nazareno (44° 39' 04" W, 21° 10' 52" S), state of Minas Gerais, Brazil. The area has an average elevation of 935 m and is located on the Upper Rio Grande River Basin (Marques et al., 2002, Zuliani, 2003). The area is characterized by a tropical climate of altitude with hot and humid summers and cool and dry winters. Rainfall is concentrated from November to March, with an annual rainfall ranging from 1,200 to 1,500 mm (INMET, 2018), with drastic changes towards drier conditions in recent years. According to the Köppen climate classification system, the climate is the Cwa with average annual temperature ranging from 18 to 19 °C (Antunes, 1986).

The study area occupies 240 m² (24 x 10 m) and the soil is classified as Typic Dystrustept (Soil Survey Staff, 2014) derived from pelitic rocks. The C horizon starts at 0.85 m depth.

Before the installation of the experiment, the soil was sampled in the depths of 0.0 - 0.20, 0.20 - 0.40, 0.40 - 0.60, and 0.60 - 0.80 m, in 20 places. These samples were then submitted to laboratory analyses of texture by the pipette method (Day, 1965) (Table 1).

2.2 Soil Preparation

Soil correction was performed 60 days prior to planting based on chemical and physical analyses (Table 1), by applying 3 kg m⁻³ of dolomitic limestone (with 87% total neutralizing relative power, 39.7% of CaO and 13.38% of MgO), which was incorporated in the soil by harrowing.

The furrows were prepared by using different equipment: a trencher for the opening at 0.40 m of depth; a soil preparer (Mafes, 2017) for furrowing to 0.60 m of depth; and a

subsoiler followed by the soil preparer were used for opening furrows to 0.80 m of depth with deep mixing down to 0.60 m.

Treatments were chosen in order to assess the efficiency of complementary liming to depth (Table 3) by receiving an additional 200 g of dolomitic limestone per linear meter of furrow. This amount of limestone was defined through calculations based on the data presented in Table 1, in order to increase the base saturation to 70% at depths from 0.20 to 0.60 m.

The planting of the coffee (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí Vermelho - IAC 99 was carried out on December 23rd, 2015. The adopted spacing was 3.6 m between rows and 0.75 m between plants. All treatments received fertilization according to recommendations for coffee crop (Guimarães et al., 1999). Three fertilizations (20 g per plant) were carried out with 20-0-20 (NPK), following an interval of 20 days, and starting on February 10th, 2016.

After the first year of cultivation, disturbed samples were collected at the same depths previously established (Table 1) in order to investigate changes in Ca^{2+} and Mg^{2+} contents for the different soil depths in the planting row (Figure 1).

In order to control the severe erosion process inherent to Inceptisols, mechanical terracing practice associated with vegetative practices were adopted using *Brachiaria* sp in the inter-rows.

Table 1 Soil chemical and physical attributes of the soil studied before the installation of the treatments,

	----- Depth (m) -----			
	0 – 0.20	0.20 – 0.40	0.40 – 0.60	0.60 – 0.80
SOM (dag kg^{-1})	2.28	1.99	0.97	0.86
Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0.3	0.3	0.3	0.3
Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0.1	0.1	0.1	0.1
Clay (g kg^{-1})	47	50	47	45
Silt (g kg^{-1})	20	13	14	22
Sandy (g kg^{-1})	33	37	22	33

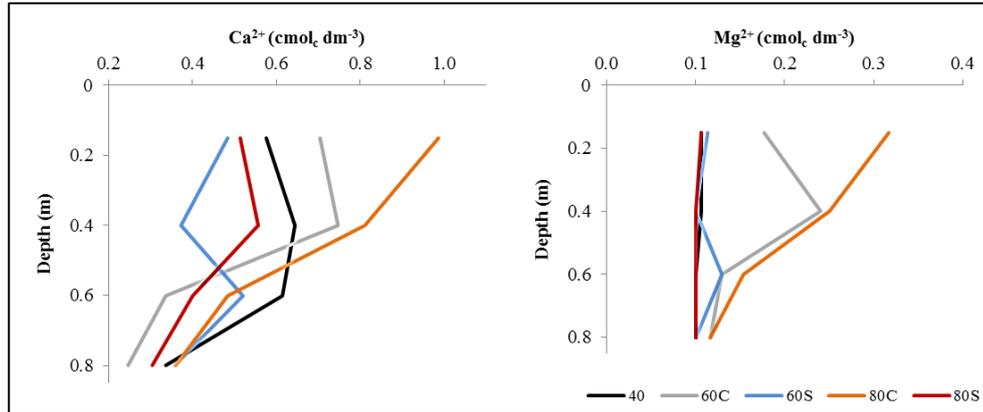


Figure 1 Contents of exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺ of the studied soil after the first year of the treatments implantation.

The experimental design was a randomized block with 3 replicates (B1, B2 and B3), and the useful portion of each of the 5 treatments consisted of a linear planting row of 10 m of length and 12 plants (Figure 2). The treatments are identified as follows: *40* (conventional soil preparation with furrow at 0.40 m of depth); *60* (soil preparation with furrow at 0.60 m of depth with conventional (*60S*) and complementary liming application (*60C*)); *80* (soil preparation with furrow at 0.80 m of depth with conventional (*80S*) and complementary liming application (*80C*)). These treatments were compared with an area under native conditions.

		80S	80C	60C	60S		40	B1
40		60S		60C	80C	80S		B2
	80S	80C	60C	60S			40	B3

Figure 2 Design of the Experimental Area.

2.3 Water Retention Curves

Undisturbed soil samples were collected at five depths: 0-0.05; 0.15-0.20; 0.35-0.40; 0.55-0.60 and 0.75-0.80 m using an Uhland soil sampler (0.064 m of diameter and 0.025 m of height). An area covered by native Cerrado vegetation was used as reference, The undisturbed samples were slowly saturated with distilled water and submitted to the matric potentials (h) of -2, -4, -6, -8 and -10 kPa in the suction unit composed of porous plate funnels and h of -33, -100, -500, -1000, and -1500 kPa in the Richards extractor (Klute, 1986). After reaching equilibrium, the samples were weighted and placed in a forced circulation oven at 105 - 110 °C for 24 hours to obtain the water content (θ) in the potentials to which they were submitted.

The water retention curves (WRC) were adjusted to the van Genuchten model (1980) with the restriction of $m = 1 - 1/n$ (Mualem, 1976) (Equation 1) using the SWRC software (Dourado Neto et al., 2000):

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r \quad (1)$$

where: h is the matric potential of water in soil (kPa); θ is the volumetric water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s is the water content at saturation ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r is the residual water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); and α and n are the empirical parameters of the model.

2.4 Indicators of soil physical quality

2.4.1 Available water capacity for plants

The plant available water capacity (P_{AWC} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (White, 2006), which indicates the capability of the soil to store and supply water to plant roots, estimated by the water contents at the field capacity and at the permanent wilting point, was determined by:

$$P_{AWC} = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (2)$$

The water content at the permanent wilting point (θ_{PWP}) was estimated by θ at the potential of -1500 kPa, and the water content at field capacity was estimated by the moisture at the inflection point of the WRC (θ_i) as suggested by Ferreira and Marcos (1983) for tropical soils, and according to Dexter and Bird (2001):

$$\theta_i = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} \quad (3)$$

A $P_{AWC} \geq 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ was considered as "ideal" (Hall et al., 1977; Cockroft and Olsson, 1997), $0.15 \leq P_{AWC} < 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ as "good", $0.10 \leq P_{AWC} < 0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ as "limited", and $P_{AWC} < 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ as "poor" (Hall et al., 1977; Warrick, 2002; White, 2006) for growth and maximum root activity.

2.4.2 Relative field capacity

The relative field capacity (RFC), defined by Reynolds et al. (2008), which indicates the soil capability of storing water and air in relation to the total soil pore volume, was determined by:

$$RFC = \theta_i / \theta_s \quad (4)$$

Desired contents of water and air for an ideal soil balance occur when this ratio (RFC) is in between 0.6 and 0.7, thus guaranteeing the maximum microbial production of nitrate, essential for the crop (Linn and Doran, 1984; Skopp et al., 1990).

2.4.3 Aeration capacity

The capability of the soil to provide air, AC ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), was estimated by the difference between the saturation water content and the water content at the field capacity (White, 2006), which, in this work, was considered as the point of inflection (Ferreira and Marcos, 1983):

$$AC = \theta_s - \theta_i \quad (5)$$

An $AC \geq 0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ was indicated as “ideal” so that the soils do not present deficit of aeration (Carter, 1988; Drewry, 2006; Mueller et al., 2008; White, 2006).

2.4.4 Macroporosity

The macroporosity, P_{MAC} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), defined as the water content between the saturation point and the microporosity (Dexter et al., 2008; Reynolds et al., 2008), was estimated at the matric potential of -6 kPa (Grohmann, 1960, Peele, 1949):

$$P_{MAC} = \theta_s - \theta_{6\text{kPa}} \quad (6)$$

A $P_{MAC} = 0.040 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ characterize soils degraded by compaction and P_{MAC} between 0.05 and $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ is considered as the "optimal range" by Carter (1988), Drewry et al.al. (2001) and Drewry and Paton (2005).

2.4.5 Bulk density

The bulk density, BD (Mg m^{-3}), defined by Hao et al. (2008), as the ratio of mass of dry soil (M_s , Mg) and the corresponding soil volume (V_b , m^{-3}) was estimated by:

$$BD = M_s/V_b \quad (7)$$

The maximum yield of crops in the field on soils with medium to fine texture was associated with the ideal BD ranging from 0.9 to 1.2 Mg m^{-3} (Drewry et al., 2008; Olness et al., 1998; Reynolds et al., 2007; Tormena et al., 2008).

2.4.6 S index

This index represents the slope of the WRC at the point of inflection defined by Dexter (2004) as:

$$S_{gi} = [-n(U_s - U_r) \left(1 + \frac{1}{m} \right)^{-(m+1)}] \quad (8)$$

in which U_s (g g^{-1}) is the gravimetric water content at the point of saturation of the soil; U_r (g g^{-1}) is the residual gravimetric soil water content, and α (hPa^{-1}) and n (dimensionless) are empirical parameters to fit the curve, with $m = 1 - (1 / n)$, also obtained by the SWRC software. Andrade and Stone (2009), studied a range of soils from the Brazilian Cerrado, defined the S value equals to 0.045 as a limit between soils of good structural quality and soils with a tendency to become degraded, whilst S values ≤ 0.025 characterize physically degraded soils.

2.5 Pore volume distribution function

Assuming the methodology described in Reynolds et al. (2009), the pore volume distribution function, $S_v(h)$ (dimensionless), was defined as the slope of the WRC expressed in a graph showing the volumetric water content, θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), versus $\ln(h)$:

$$S_v(h) = m(\alpha h)^n \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{(m+1)} \quad (9)$$

This function is plotted against the equivalent pore diameter, d_e (μm) (Reynolds et al., 2009). The parameter d_e can be determined using the equation of capillary rise (Warrick, 2002):

$$d_e = \frac{4\gamma \cos\omega}{\rho_w g h} \approx \frac{2980}{h} ; h > 0(\text{cm}); d_e(\mu\text{m}); \text{water temperature} = 20^\circ\text{C} \quad (10)$$

in which $\gamma = 72.80 \text{ N m}^{-2}$ is the water surface tension, $\rho_w = 0.99 \text{ g cm}^{-3}$ is the water density, $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ is the gravitational acceleration, and $\omega \approx 0$ is the contact angle between the water molecule and the pore wall.

The normalized pore volume distribution function, $S^*(h)$, is defined by dividing $S_v(h)$ by S_{vi} resulting in:

$$S^*(h) = \frac{S_v(h)}{S_{vi}} = \frac{m(\alpha h)^n [1+m^{-1}]^{m+1}}{[1+(\alpha h)^n]^{(m+1)}}; 0 \leq S^*(h) \leq 1 \quad (11)$$

in which S_{vi} is the peak of the pore volume distribution, corresponding to the slope of the inflection point of the WRC, which occurs at the value of the most frequent diameter (d_{mode}).

The normalized pore volume distribution functions were compared according to Reynolds et al. (2009), using “localization” (mean value, mode, and median values) and “shape” (standard deviation (SD), skewness (asymmetry), and kurtosis (peak)) parameters, The “localization” parameters use the d_e as a function of θ , as follows:

$$d_\theta = \frac{2980\alpha}{(\theta^{-1/m} - 1)^{1/n}}; 0 \leq \theta \leq 1 \quad (12)$$

The mean, median, and mode values of d_e are given by:

$$d_{mean} = \exp\left(\frac{\ln d_{0.16} + \ln d_{0.50} + \ln d_{0.84}}{3}\right) \quad (13)$$

$$d_{median} = \frac{2980\alpha}{(0.5^{-1/m} - 1)^{1/n}}; \theta = 0.5 \quad (14)$$

$$d_{mode} = \frac{2980\alpha}{(\theta_i^{-1/m} - 1)^{1/n}} = \frac{2980\alpha}{m^{1/n}} \quad (15)$$

The SD, skewness and kurtosis values of the pore frequency distribution curves are given by:

$$SD = \exp\left(\frac{\ln d_{0.84} - \ln d_{0.16}}{4} + \frac{\ln d_{0.95} - \ln d_{0.05}}{6.6}\right); 1 \leq SD < \infty \quad (16)$$

$$Skewness = \frac{1}{2} \left[\frac{\ln d_{0.16} + \ln d_{0.84} - 2(\ln d_{0.50})}{(\ln d_{0.84} - \ln d_{0.16})} + \frac{\ln d_{0.05} + \ln d_{0.95} - 2(\ln d_{0.50})}{(\ln d_{0.95} - \ln d_{0.05})} \right]; -1 \leq Skewness \leq 1 \quad (17)$$

$$kurtosis = \frac{\ln d_{0.05} - \ln d_{0.95}}{2.44(\ln d_{0.25} - \ln d_{0.75})}; 0.41 \leq kurtosis \leq \infty \quad (18)$$

The values for different diameters ($d_{0.16}$, $d_{0.84}$ etc...) are obtained by equation 12.

2.6 Plant measurements

The normalized vegetation index (NDVI) was evaluated by a Green Seeker® sensor (The GreenSeeker™ optical sensor unit, model RT200) in the months of December 2016 and January, March, April, May, July, and September 2017. The apparatus was positioned at a height of 0.8 m above and parallel to the top of the plants (Ntech Industries, 2016). Three readings were taken in each plot (10 useful plants), along with the measurement of plants height. The NDVI was proposed by Rouse et al. (1973) for the quantification of vegetation growth and is given by:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR}-\text{R})}{(\text{NIR}+\text{R})} \quad (19)$$

in which NIR is the near infrared reflectance (770 μm) and R is the red reflectance (650 μm). For the optical sensor, NDVI values range from 0 to 1, and the closer to 1 the greater the vegetative vigor of the crop.

2.7 Data analyses

Although the optimal ranges and critical limits of soil quality indicators are considered sufficiently general to be applied to a wide range of agricultural soils under different climates (Reynolds et al., 2009), the values found in this study did not fit within the limits regarding soil air capacity (AC), macroporosity (PMAC), and relative field capacity (RFC) owing to differences in the values of matric potentials used to determine microporosity and field capacity. For microporosity, values of -1 Kpa were adopted by Dexter et al. (2008) and Reynolds et al. (2008), while in Brazil, microporosity is defined as the water content at the matric potential of -6 kPa (Grohmann, 1960; Peele, 1949). The moisture at field capacity is determined at the matric potential of -10 kPa (Dexter et al., 2008; Reynolds et al., 2008), while in the present study such moisture was considered at the inflection point of the soil

water retention curve (Andrade and Stone, 2011; Ferreira and Marcos, 1983; Mello et al., 2002).

Therefore, data from Silva (2017), who also carried out studies on Inceptisol cultivated during 5 years with coffee in Minas Gerais state, was adopted as a basis for comparison. The productivity reached in that studied soil has been surpassing the mean value for the state of Minas Gerais (24.9 bags/ha) (Conab, 2017) by at least 15 bags/ha (Serafim et al., 2013a).

For the comparison between management systems, an analysis of variance was performed and, when significant, the Scott-Knott test ($p < 0.05$) was applied to compare the mean values, using the SISVAR software (Ferreira, 2014). Pearson correlations were also performed between the physical indicators and the measurements of plants (height and vegetation index).

3. Results and discussion

3.1 Indicators of soil physical quality

The indicators of the soil physical quality were compared to the values considered adequate for vegetative growth established in the literature (Dexter et al., 2008; Reynolds et al., 2008) and referred to as optimal limits (OL). As observed in Figure 3, OL values were not sufficiently effective to characterize the physical attributes of the studied Inceptisol. In this way, as a reference, we adopted a similar soil submitted to a model system of soil management, referred to as SAP (Serafim et al, 2011; Silva, 2017). Thus, this current study compares the obtained values here with those obtained by SAP, taken as reference. However, the study in the SAP soil took place five years after the soil preparation, while the present study is focused on the first year after planting.

The analysis of variance revealed a significant interaction ($p < 0.05$) between depths and management for all evaluated parameters (Figure 3). Considering the variation of depths within treatments, it was verified that the natural condition of this soil presented a layer of physical restriction at 0.20 m of depth, which was indicated by the greater BD and RFC, as well as by the lower values of AC, P_{AWC} , P_{MAC} and S index. These latter ones are greater for the superficial layer (0.05 m) and at depths greater than 0.20 m. At the 0.20 m layer, this soil has greater clay content, which helps to explain the differences found (Table 2). The increase of fine particle sizes fractions in this soil layer promotes an increase in microporosity and, consequently, an increase in water retention (Severiano et al., 2009).

Pereira et al. (2012) related the loss of quality of the plants in forest sites to the physical and chemical constraints that promote the genesis of naturally dense Inceptisols in the central region of Minas Gerais state. Pezzoni Filho et al. (2014) also reported the occurrence of these soils, and discussed the lack of studies in the literature regarding cultivation in this soil class. However, adequate soil management has revealed the potential of such soils for agricultural crops (Serafim et al., 2011; Severiano et al., 2009).

With the adoption of different management practices, the values of AC, P_{AWC} , P_{MAC} and S index in the soil surface layers were increased and then decreased with depth in the soil profile (Figure 3). These results corroborate studies carried out in Germany (Borchet, 1984, Borchet and Graf, 1985), where subsoiling showed a positive effect on the reduction of bulk density and increase of macroporosity in soils with texture varying from medium to very clayey, being restrictive only for soils with silt contents greater than 70%.

Considering the present study, it is probable that the use of the preparation equipment led to an increase of BD and RFC (Figure 3) in the layers below the contact with the cutting tools because soil moisture conditions were inadequate at the time of soil preparation. These

findings are supported by Silva (2018), who carried out a study in the same area, and found a decrease in soil permeability at depths below the bottom of the furrow.

However, soil preparation methods *60C* and *80C* were able to promote total homogenization in the planting furrows. Those treatments did not show significant differences between BD for the different depths, indicating inadequate soil moisture conditions at the time of soil preparation, which is known to promote compaction (Pezzoni Filho et al., 2014).

Analyzing the variation of the management practices within each depth, the BD remained within the optimal limit for the entire soil profile, although above the values considered as SAP reference down to 0.40 m depth. The management practices significantly reduced BD in comparison to the soil from the native area down to 0.20 m depth, demonstrating the effectiveness of the machinery action in breaking up naturally dense layers in the soil. This promotes benefits to the structural arrangement, with positive consequences for water infiltration and in the plant rooting. Such behavior was observed by Cai et al. (2014), Querejeta et al. (2001), Serafim et al. (2013a), and Silva et al. (2015b).

The studied soil in its natural condition has a low physical quality (*S* index) in the first 0.20 m of depth due to a possible increase in BD, which is intrinsic to most of the soils belonging to this class (Pereira et al. 2010). At this depth, low aeration capacity ($AC < 0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and limited water availability ($0.10 \leq P_{AWC} < 0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) were observed, caused by a high BD value ($> 1.2 \text{ Mg m}^{-3}$). All the management practices improved the aeration and water retention conditions when compared to the natural condition of this soil. The treatments directly improved the soil structural quality, increasing from 0.027 (natural) to > 0.050 (managements) for the 0.20 m of depth. In a review about subsoiling practices, Schneider et al. (2017) reported that in the presence of soil layers with restriction to root growth, mainly compacted layers, the deep soil preparation increased crop production in 20% when compared to sites without.

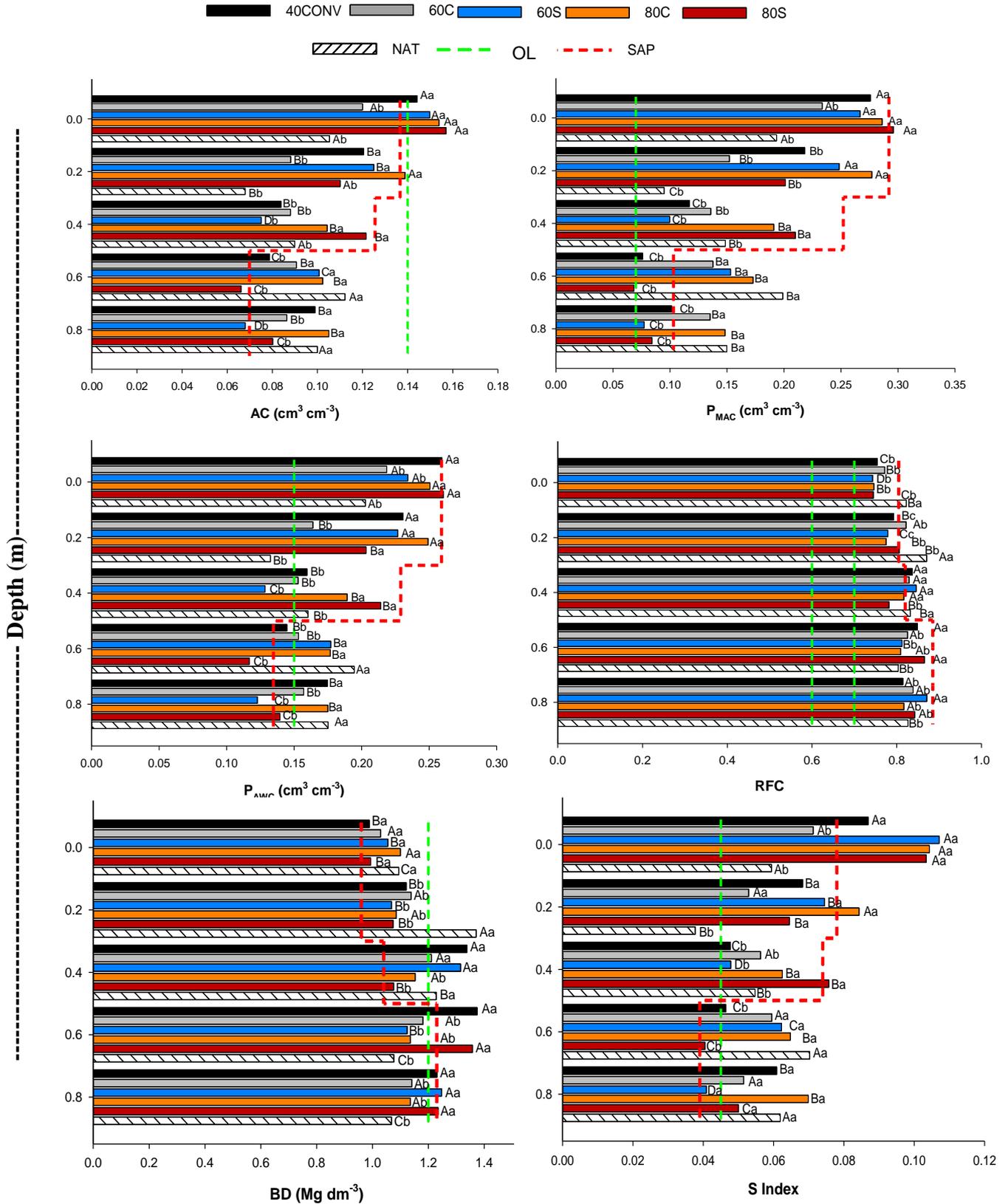


Figure 3 Values of soil physical quality indicators at depths of 0.05, 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 m in Inceptisol, optimal limits proposed in the literature and SAP reference value.

(*)AC = air capacity; P_{AWC} = available water capacity for plants; P_{MAC} = macroporosity; T_p = total porosity; Micro = Microporosity; RFC = relative field capacity; BD = Bulk density; OL = optimal limits defined in the world literature. SAP = Adjusted optimal values for CRA data considering high productivity in coffee cultivation

in Inceptisol in the state of Minas Gerais, Brazil. Means followed by the same lowercase letter, do not differ from each other for treatments within the same depth, and by the same capital letter, do not differ among each other for depth within a same treatment by the Skott-knott test.

Serafim et al. (2013a) observed a reduction of surface BD and increase of macroporosity in the planting row up to 0.80 m of depth in an Inceptisol managed following the premises of the SAP system. The authors related the improvement of the soil physical quality (indicated by the optimal hydric interval parameter, not analyzed in this study) to the opening of the planting furrow up to 0.60 m of depth, associated with the incorporation of fertilizers and organic residues from the braquiaria inter-rows. High doses of agricultural gypsum were also used at the soil surface, which indirectly contributed to the formation of macroaggregates, and directly to the stabilization of microaggregates through the complexing action of exchangeable Ca^{2+} , as suggested by Andrade (2018).

Compared to the natural condition, soil preparation reduced the relative field capacity (RFC) from the surface down to 0.20 m of depth to a value below the SAP reference. This reduction indicates a reduction of the water storing capacity in relation to the diffusion of air within the pore system, thus causing a reduction of water storage pores, favoring macropores and, hence, drainage. However, it is observed that RFC reduction did not negatively affect the porosity responsible for water availability to plants (P_{AWC}) down to 0.20 m of depth (Figure 3). The management practices were beneficial due to an increase in these values in relation to the soil under natural conditions, indicating a reduction of pores where water is strongly retained under potentials equal to or lesser than -1500 kPa.

At the depth of 0.40 m, the subsoiler (80C and 80S) produced better results than the other treatments by reducing BD and increasing AC, P_{MAC} , P_{AWC} , and S index in relation to the structure of the soil under natural conditions, although BD was above the natural condition. However, the SAP reference values for these variables were not reached. Bulk density values above the optimal limits for 40CONV and 60S was observed, which might

constrain soil exploration by the root system. The inefficiency of *60S* differs from that observed by Medeiros et al. (2013), in which the subsoiling of the inter-row of a citrus crop broke down cohesive layers of a Ultisol. This was noticed through the reduction of the values of BD and penetration resistance besides increases in values of the hydraulic conductivity (down to 0.80 m of depth).

At the depth of 0.60 m, an increase of BD caused by *40CONV* and *80S* treatments with values above optimal limits and SAP were observed. The aeration indicators (AC and P_{MAC}) and water availability (PAWC) were reduced on average in 35, 64, and 33%, respectively, with the treatments *40CONV* and *80S*, as well as the S index, which increased from 0.065 (natural) to 0.029, again confirming a possible compaction (Akinici et al., 2004) promoted by the bottom of the trencher and the subsoiler, respectively.

The increase of RFC in relation to the soil under natural condition at the depth of 0.60 m indicates an increase in water-holding pores. However, this water might be strongly retained in extremely small pores and, thus, not easily available to plants. The RFC values are above those considered as optimal, where an adequate proportion between aeration and drainage is established, promoting a condition that optimizes nitrate production by the soil microbiota (Linn and Doran, 1984; Skopp et al., 1990), especially considering that nitrogen is a limiting nutrient for coffee growth and productivity (Bote et al., 2018; Salamanca-Jimenez et al., 2016). In this case, none of the treatments was able to promote the ideal proportion ($0.6 > RFC < 0.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) at any depth. The SAP reference was not in the range considered ideal by the OL. Nevertheless, it has resulted in satisfactory productivity by coffee plants, suggesting that the ideal proportion ($0.6 > RFC < 0.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) is not required within the same range for the coffee crop, considering the studied soil (Serafim et al., 2013a, c).

Soil preparation to 0.80 m of depth varied between management practices, and treatments *60C* and *80C* had lesser BD and greater PMAC in relation to the others. The BD

values were within the range considered ideal ($<1.20 \text{ Mg m}^{-3}$) only for treatments *60C* and *80C*, which might indicate a greater exploitation of roots in the soil profile (Tormena et al., 2008).

However, the isolated effect of soil preparation (*60S* and *80S*) reduced P_{AWC} in an average of 25% in relation to the soil under natural condition. That is, the water was more strongly retained on the surface of the remaining particles of the aggregates that were sprayed by the action of the rotating hoe, reducing water availability to plants. However, this was not observed when this operation was combined with additional the liming application (Figures 1 and 3), which suggests that exchangeable Ca^{2+} could be helping in the formation of new aggregates, as evidenced by Silva et al. (2016) after 1.5 years of coffee cultivation in Inceptisol. These authors observed a better structuring of the soil by increasing the size of aggregates promoted by high amount of exchangeable Ca^{2+} provided by the use of gypsum in a conservation management system. Moreover, the lesser BD at 0.40 m and 0.60 m of depth for *60C* and *80C*, also suggests that the operation was effective in breaking the naturally dense soil layers, allowing better root development and access to greater amounts of water (P_{AWC}) in depth (Figure 3) during drought periods. In this way, soil management increases the survival rate of plants along with their productivity, as also reported by Serafim et al. (2013b) in Inceptisols.

Moreover, considering that total surface liming is often not efficiently incorporated into the soil, and that limestone has low solubility (Valzano et al., 2001), the benefits of this technique at surface layers might not be efficient in reaching deeper layers of the soil profile. Thus, the application of additional liming at depth with subsequent soil preparation allowed for the correction of the soil down to 0.40 m of depth in treatments *60C* and *80C* (Figure 1). These treatments provided an increase of 0.4 and 0.5 cmolc dm^{-3} of exchangeable Ca^{2+} and of 0.1 and 0.2 cmolc dm^{-3} of exchangeable Mg^{2+} in the soil profile. These values correspond to

an increase of 160 kg of Ca^{2+} and 23 kg of Mg^{2+} per hectare (considering that 1 cmolc is equivalent to 40 kg of Ca^{2+} and 23 kg of Mg^{2+}). Corroborating these results, Rodrigues et al. (2001) demonstrated the efficiency of subsurface liming to the Catuaí coffee cultivar and found that increasing the dose of liming applied in depth caused an increase of root surface (with smaller diameters). This was also observed by Caires et al. (2006), who attributed the 66% increase in development of wheat roots at the 0-60 cm layer to the increase of Ca^{2+} , in addition to a 140% increase in grain yield.

The action of liming on the soil physical properties can indirectly occur by the machinery for the incorporation of this amendment, as used in treatments *60C* and *80C*, by the increase of the microbial activity and/or by the plant root system (Grieve et al., 2005). Furthermore, the reduction of the clay dispersion, decrease in penetration resistance, greater infiltration rate and more water availability to plants also play an important role (Valzano et al., 2001). Liming has the potential to improve soil structure, acting through high concentrations of Ca^{2+} and high ionic strength for the soil solution. This favors the flocculation of clay size particles (Andrade, 2018), and formation of stable aggregates (Bardgett et al., 2004) and recently formed pores (Bardgett et al., 2014; Lange et al., 2015), justifying additional liming application in greater depths of the soil profile.

Treatment *80C* was the best one for the parameters AC , P_{MAC} , P_{AWC} , and S index, being this the unique treatment that always remained above or most similar to the soil under natural condition at all the evaluated depths. So, the deep tillage with draining action to 0.80 m followed by the soil preparer down to 0.60 m of depth associated with the use of additional liming in depth within the planting furrow promoted an adequate balance and better combination between the supply of water and air. The large volume of subsoil represents an important resource for nutrient and water absorption by the root system, making it valuable

the soil management in depth and of great importance in order to better use this resource (Lehmann, 2003).

3.2 Parameters of normalized pore volume distribution function

The normalized pore volume distribution functions modeled for each soil management practice and reference areas are shown in Figure 4. All treatments caused the curve to shift to the right by 0.20 m in relation to the natural condition, which no longer occurred at 0.40 m. This implies an increase in the frequency of larger diameter pores, indicating structural benefit to 0.20 m by the action of the machinery. At 0.60 m and 0.80 m of depth, only the 80C management system positively stood out, while the others shifted the curve to the left side, which may be an indication of poor use of the equipment along with inadequate soil moisture at the time of use, affecting the structural arrangement of this soil (Botta et al., 2006).

The normalized pore volume distribution functions are given by the “location” and “shape” parameters presented in Figure 5. Regarding the “shape” parameters, both the management systems and the reference areas presented "poorly ordered" distribution (i.e., high pore diameter variation, $4 < SD < 16$), and "leptokurtic" (the distribution function curve is more attenuated, with a greater peak than a normal distribution and steeper extremes ($1.11 < Kurtosis < 1.50$)), according to the limits established by Blott and Pye (2001). It is observed that the negative skewness values characterize excess of pores with a large diameter in relation to a lognormal distribution (Figure 5). This diagnosis is due to the fact that most of the data are centered to the right of the curve, with the left area being longer (Figure 4). The behavior for skewness and kurtosis of the curves for the treatments were similar to the values of the SAP curve, but as the physical quality becomes more limiting (Figure 3), the characteristic pore diameter decreases (Figure 4 and 5).

In relation to the “localization” parameters, the average values in the soil profile of d_{mode} , d_{median} and d_{mean} are well above those studied by Reynolds et al. (2009), which d_{mean} taken as reference assumes values between 0.7 and 2 μm for predominantly sandy soils, and, according to Ghiberto et al. (2015), between 1.2 and 3 μm for predominantly clayey to silty soils of Argentina. In both cases, it is emphasized that these soils have very different genesis and characteristics in comparison with the Brazilian tropical soils, especially in relation to aggregation and structure, which justifies the difference of the “localization” parameters between them.

By analyzing the treatments in the soil profile, at the superficial layer (0.05 m of depth) the average diameter (d_{mean}) is increased by the soil harrowing, but the most frequent diameter (d_{mode}) remains below the soil under natural condition (Figure 5). At 0.20 m of depth, the three “localization” parameters (d_{mean} , d_{mode} and d_{median}) indicate an increase in relation to the natural area. This is consistent with the qualifications provided by the RFC, P_{AWC} , AC, P_{MAC} and S index, and supports the fact that the depth of 0.20 m is the most affected by soil harrowing, with significant increase in pore diameter, independently of the machinery utilized. The d_{mode} increases in average from 100 μm under natural condition to 300 μm with the soil management treatments. These values correspond to "drainage and aeration pores" according to the White (2006) classification. In this study, they are associated with high AC and P_{AWC} values at the superficial layer after the management treatments were implanted (Figure 3).

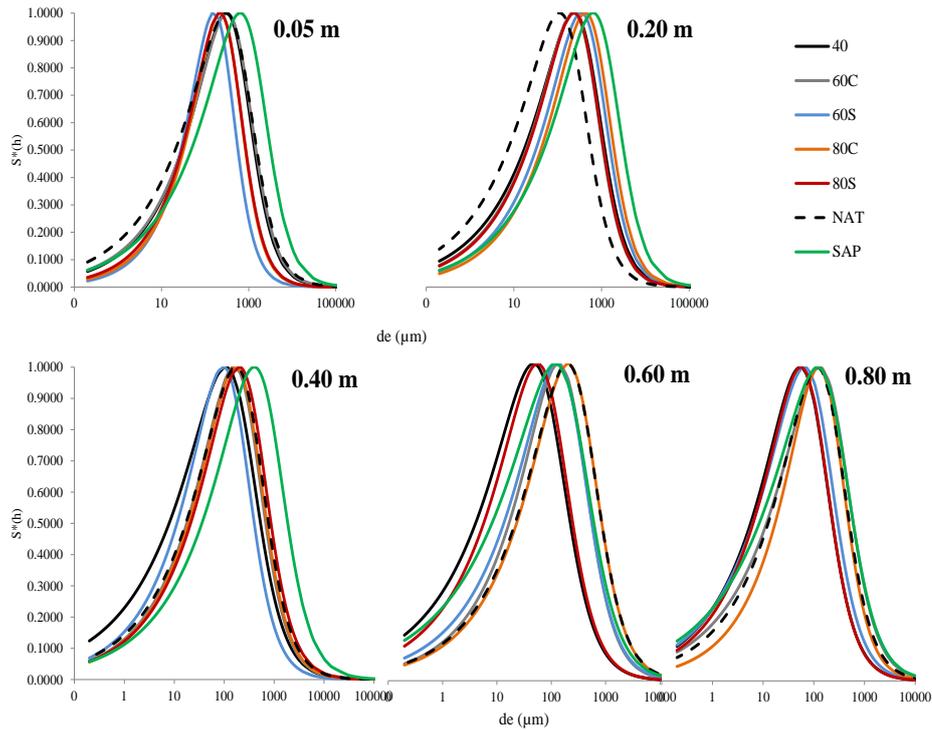


Figure 4 Normalized pore volume distribution function for different management systems and reference areas at different soil depths.

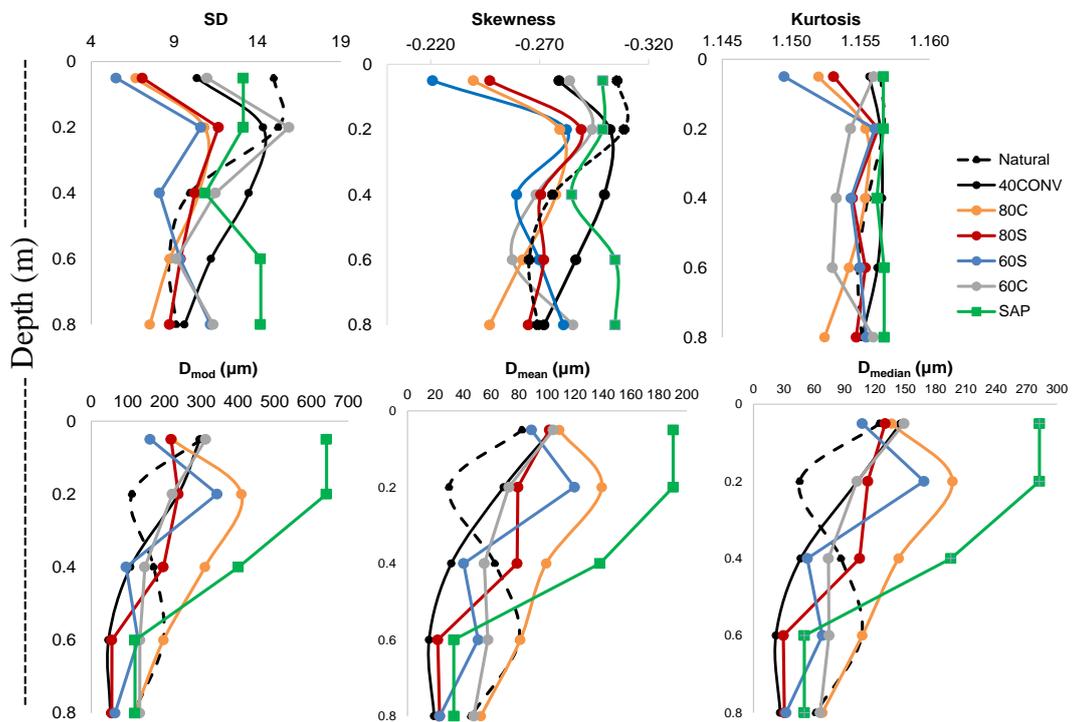


Figure 5 Localization and shape parameters for the normalized pore volume distribution function for the different managements systems.

At 0.20 and 0.40 m of depth, it was noticed that soil preparer + subsoiler, 80 (*S* or *C*) increased all the parameters of “localization” in relation to the natural condition and the other management systems. For those depths, there was also an increase of d_{mode} to 400 μm , which can be associated to the beneficial action obtained by the significant increase in P_{MAC} and AC as well as reduction of BD in relation to conventional management (Figure 3). This range of diameter is comprised of macropores ($> 50 \mu\text{m}$) (Sing et al., 2008) or drainage and aeration pores (30-500 μm) (White, 2006) with primordial infiltration function (Qin et al., 2014) and conduction of water in structured soils (Cameira et al., 2003), but also in the conduction in the ideal exchange of air (Feiza et al., 2015).

Studies carried out by Serafim et al. (2013a) confirm that the factors aforementioned favor root growth in the subsurface due to improvements in the physical quality because of deep furrow preparation. The authors observed the presence of fine roots down to the depth of 2 m in the profile of an Inceptisol cultivated in intensive system of management with furrow opening and revolving to 0.60 m associated with high doses of agricultural gypsum on the surface.

The soil preparer was efficient below the 0.60 m depth (Figures 3 and 4) and promoted greater pore diameter values compared to those obtained with conventional management. It is observed that the treatments 80*C* and 60*C* were able to reach values of diameter (mode, mean, and median) similar to the natural condition of this soil at 0.80 m of depth. However, the addition of additional liming in the planting furrow in these treatments certainly contributed to the improvement of soil physical quality, differing from Reynolds et al. (2014), who did not observe an effect of the amendments on the relationship between d_{mode} and porosity.

The lesser values of the pores diameter of the other treatments at these depths (Figures 3 and 4) are possibly due to the action of the machinery for soil preparation for the establishment of the pasture that preceded the coffee crop, without deep tillage. The 80*S*

management treatment showed a pore distribution similar to the conventional preparation (*40CONV*) for 0.60 and 0.80 m, and pore diameters lower than the natural condition (Figures 3 and 4), which was also observed for the physical indicators (Figure 3). This fact suggests an error of mechanical operation, since Medeiros et al. (2013) confirmed a reduction of BD and increase of macroporosity down to 0.80 m of depth by the use of subsoiler in the inter-row of a citrus crop, which resulted in a 31% increase in yield of orange fruits.

The mean, median, and modal pore diameters of the standard pore volume distribution functions (Figure 3) in all management treatments are well below the SAP reference down to 0.40 m of depth (Figure 5). The management practices used in the SAP promoted beneficial changes in the structure of an Inceptisol after 1.5 years of implantation, forming aggregates with morphometric characteristics that favor soil adequate structure (Silva et al., 2016). Soils submitted to the same management practices demonstrated that the increase of exchangeable Ca^{2+} (by addition of agricultural gypsum and liming) favored the increase of pores, especially at the 0-0.34 m layer, and of fine roots (Carducci et al., 2014), with reflections in more absorption of water by plants (Santos et al., 2014a; Serafim et al., 2013a; Silva et al., 2015b).

The management system *80C* (Figure 5), mainly at 0.40 m of depth, was the one that most approximated to the SAP values for porosity. Compared to the other treatments, this one maintained the best conditions observed in the soil under natural condition throughout the soil profile, with an expressive increase of d_{mode} at the depths of 0.20 and 0.40 m. These results confirm the best relationship between soil air and water capacity for the management system *80C* (Figure 3). Therefore, the soil treatments using drainage followed by the furrow preparer coupled with the adequate chemical characteristics provided by additional liming application (Figure 1) was the most consistent for the designations of the physical quality for the soil.

3.3 Plant parameters

The changes caused by the management treatments implied changes in plant growth and vegetative vigor regardless the treatment (Figure 6). There is a significant correlation between plant height and RFC, P_{MAC} , d_{mean} , BD, P_{AWC} , and S index. Improvements in the physical conditions indicated by the increase of the S index at the depths of 0.60 and 0.80 m and reduction of the BD at 0.60 m also imply height gain and consequent better plant development. BD had the highest correlation (-0.59) with plant growth. The vegetative vigor significantly correlates with the “localization” parameters of $S^*(h)$ and also with the P_{MAC} and P_{AWC} indicators. An increase in air capacity and water availability due to the increase in mean and median pores diameters indicates an increase in NDVI.

The depth of 0.60 m had the best correlation between the quality indicators and the “localization” parameters of $S^*(h)$ with NDVI and plant height (Figure 6). This demonstrates that soil management at this depth is the main factor defining changes in vegetative vigor and plant growth at this growth stage. At this same depth, Santos et al. (2014) found a better correlation between vegetative vigor and soil moisture for 2.5-year-old coffee plants in a soil under a conservationist management system with fertilization and soil revolving at 0.60 m of depth.

It is observed that d_{mean} and P_{AWC} positively correlate with height and NDVI at 0.60 m of depth (Figure 6). Thus, management provides an increase in the mean pore diameter of the soil (which is at the maximum, close to the lowest limit of the drainage and aeration class - Figure 5), which reflects in positive responses of plant growth and vigor associated with increased water availability (P_{AWC}). At the superficial layer, it is observed that the reduction of d_{mode} by the management treatments promoted an increase in NDVI. This inverse relationship might be related to the fact that smaller values of d_{mode} , in another words, those that approximate to the limit of the class of drainage and aeration pores (30 - 500 μm) (White, 2006), promote lower consequences to the retention and consequent availability of water,

allowing for a better balance between water and air at the surface layer, reflecting in better vigor of the plant.

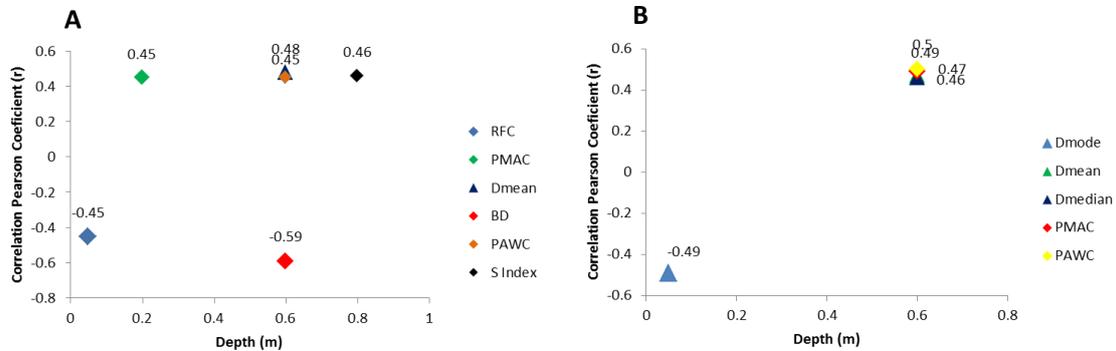


Figure 6 Pearson correlation between plant parameters - height (A) and NDVI (B) -, soil physical quality indicators and location parameters of S * (h) for the studied soil profile.

4. Conclusions

a) Management treatments used to improve coffee cultivation in young soils with physical restrictions, such as naturally high bulk density and low effective rooting depth, promoted improvements in soil structure, which was demonstrated by the better performance of the physical quality indicators down to 0.40 m of depth.

b) The deep furrow preparation obtained by the soil preparation associated with the use of the subsoiler and additional liming application at depth proved to be the most efficient treatment to increase aeration and water availability, thus reducing the negative effects of the natural high bulk density. Furthermore, this management treatment reached the entire profile of the evaluated soil (up to 0.80 m of depth), suggesting potentiality to mitigate the effects of water deficits due to the prolonged drought in the winter and short droughts during the summer rainy period in this physiographical/climatological zone.

c) Comparisons of the results found for the physical quality indicators with the critical limits and/or optimum ranges proposed in the literature pointed that they do not apply to the

studied Inceptisol. Therefore, there is a need to establish local optimum range values considering the particularities of each soil class.

d) For the depth of 0.60 m, there are significant correlations between indicators of quality, NDVI and plant height, indicating that this depth best defines plant growth and vegetative vigor.

Acknowledgments

The authors thank CNPq, FAPEMIG, CAPES and Embrapa Café for the financial support to carry out this work, UFLA for institutional support, and Frade farm for providing sampling areas and for the logistical support.

References

- Akinci, I., Cakir, E., Topakci, M., Canakci, M., Inan, O., 2004. The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. *Soil Tillage Res.* 77, 203–210.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.006>
- Andrade, R. Agregação de um Latossolo submetido a elevadas doses de Gesso na cafeicultura. 2018. Dissertação apresentada ao Departamento de Ciência do Solo. UFLA. 43p.
- Andrade, R., Stone, L., 2011. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 15, 111–116.
- Andrade, R.S. and L.F. Stone. 2009. S index as an indicator of physical quality of Brazilian Cerrado soils. (In Portuguese, with English abstract.) *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambiental* 13:382–388.
- Antunes, F.Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.12. n.138, p.9-13, 1986.
- Bardgett, R.D., Mommer, L., De Vries, F.T., 2014. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends Ecol. Evol.* 29, 692–699.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.006>
- Bechtle, W., 1985. Erfahrungen und Ergebnisse aus Tieflockierungen in Baden- Württemberg. *Schriftenr. des Dtsch. Verbands für Wasserwirtschaft und Kult. e.V.* 70, 37–74.

- Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms*.
<https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Borchet, H., Graf, R., 1985. Über die Entwicklungstendenz des Bodengefüges in tiefgelockerten Böden aus verschiedenen geologischen Substraten. *Schriftenr. des Dtsch. Verbands für Wasserwirtschaft und Kult. e.V.* 70, 75–138.
- Borchet, H. 1984. Grenzen und Vorhersage der Bodenmeliorationswirkung bei der Tieflockerung. *Mitteilungen der Dtsch. Bodenkundlichen Gesellschaft* 40, 37–42.
- Bote, A.D., Zana, Z., Ocho, F.L., Vos, J., 2018. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation level and rate of nitrogen supply II . Uptake and distribution of nitrogen, leaf photosynthesis and first bean yields. *Eur. J. Agron.* 92, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.006>
- Botta, G.F., Jorajuria, D., Balbuena, R., Ressia, M., Ferrero, C., Rosatto, H., Tourn, M., 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil Tillage Res.* 91, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.12.011>
- Cai, H., Ma, W., Zhang, X., Ping, J., Yan, X., Liu, J., Yuan, J., Wang, L., Ren, J., 2014. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *Crop J.* 2, 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.04.006>
- Caires, E.F., Corrêa, J.C.L., Churka, S., Barth, G., Garbuio, F.J., 2006. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. *Sci. Agric.* 63, 502–509. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000500013>
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Curi, N., Heck, R.J., Rossoni, D.F., de Carvalho, T.S., Costa, a. L., 2015. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil Tillage Res.* 145, 171–180.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.015>
- Carducci, C.E.E., Oliveira, G.C.C., Curi, N., Heck, R.J.J., Rossoni, D.F.F., de Carvalho, T.S.S., Costa, a. L.L., 2014. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil Tillage Res.* 145, 171–180.
- Carter, M.R., 1988. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil & Tillage Res.* 12, 37–51.
- Cockroft, B., Olsson, K.A., 1997. Case study of soil quality in south-eastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. In: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 339–350.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil Tillage Res.*

70, 131–140.

- Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), 2017. Acompanhamento da safra brasileira de café, v.4 - Safra 2017, n. 4 - quarto levantamento, dez. de 2017.
- Day, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling. Part 1.* Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.545-567.
- Dexter, A. R., Czyż, E. A., Richard, G., Reszkowska, A., 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma* 143, 243–253.
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214.
- Dexter, A. R.; Bird, N. R. A. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research*, v.57, p.203-212.
- Drewry, J.J., 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: a review. *Agric. Ecosys. Environ.* 114, 159–169.
- Drewry, J.J., Cameron, K.C., Buchan, G.D., 2001. Effect of simulated dairy cow treading on soil physical properties and ryegrass pasture yield. *New Zealand J. Agric. Res.* 44, 181–190.
- Drewry, J.J., Paton, R.J., 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43, 525–531.
- Drewry, J.J., Cameron, K.C., Buchan, G.D., 2008. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing a review. *Aust. J. Soil Res.* 46, 237–256.
- Dourado Neto, D., Nielsen, D. R., Hopmans, J. W., Reichardt, K., Bacchi, O. O. S., Lopes, P. P. 2001. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Sci. Agríc.*, 57, 1, 2000.
- Feiza, V., Feizienė, D., Sinkevičienė, A., Bogužas, V., Putramentaitė, A., Lazauskas, S., Deveikytė, I., Seibutis, V., Steponavičienė, V., Pranaitienė, S., 2015. Soil water capacity, pore-size distribution and CO₂ e-flux in different soils after long-term no-till management 102, 3–14. <https://doi.org/10.13080/z-a.2015.102.001>
- Ferreira, M. M.; Marcos, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. *Ciência e Prática*, v.7, p.96-101, 1983.
- Ferreira, Daniel Furtado. *Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple*

- comparisons. Ciênc. agrotec. 2014, vol.38, n.2, pp. 109-112 . Disponível em: ISSN 1413-7054. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.
- Fialho, G.S., Silva, D.P. Da, Reis, E.F. Dos, Fonseca, A.F.A. Da, Ferrão, M.A.G., 2010. Behavior of *Coffea arabica* L. Plants exposed to water deficits in different phases of their initial development. IDESIA 28, 35–39.
- Ghiberto, P.J., Imhoff, S., Libardi, P.L., Silva, A.P., Tormena, C.A., Pilatti, M.A. 2015. Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. Scientia Agrícola. v.72, n.2, p.167-174.
- Ghosh, P.K., Mohanty, M., Bandyopadhyay, K.K., Painuli, D.K., Misra, A.K., 2006. Growth , competition , yield advantage and economics in soybean /pigeonpea intercropping system in semi-arid tropics of India I . Effect of subsoiling. F. Crop. Res. 96, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.05.009>
- Grieve, I.C., Davidson, D.A., Bruneau, P.M.C., 2005. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. Geoderma 125, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.06.004>
- Grohmann, F., 1960. Distribuição tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. Bragantia 19, 10.
- Guaman, V., Båth, B., Hagman, J., Gunnarsson, A., Persson, P., 2016. Short time effects of biological and inter-row subsoiling on yield of potatoes grown on a loamy sand , and on soil penetration resistance , root growth and nitrogen uptake. Eur. J. Agron. 80, 55–65.
- Guimarães, P. T. G., Garcia, A. W. R., Alvarez V, V. H., Prezotti, L. C., Viana, A. S., Miguel, A. E., Oliveira, J. D. (1999). Cafeeiro. CFSMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação. Viçosa: FCV.
- Hall, D.G.M., Reeve, M.J., Thomasson, A.J., Wright, V.F., 1977. Water retention, porosity and density of field soils. Soil Survey Tech. Monog. No. 9, Rothamsted, Harpenden, U.K.
- Hao, X., Ball, B.C., Culley, J.L.B., Carter, M.R., Parkin, G.W., 2008. Soil density and porosity, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), Soil Sampling and Methods of Analysis, 2nd Edition. pp. 743–759.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/Andgt>. Acesso em Fev. 2018.
- Klute, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C.A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R.I., Mellado-

- Vázquez, P.G., Malik, A.A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B.C., Trumbore, S.E., Gleixner, G., 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nat. Commun.* 6, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>
- Lehmann, J., 2003. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant Soil* 255, 319–331.
- Linn, D.M., Doran, J.W., 1984. Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils. *Soil Sci. Soc. Am.* 48, 1267–1272.
- Löf, M., Dey, D.C., Navarro, R.M., Jacobs, D.F., 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New For.* 43, 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>
- Mafes. Big mix AS-2, preparador de solo. 3p. 2017. Disponível em: http://mafes.com.br/big_mix.html
- Marques, J.J.G.S.M.; Curi, N.; Lima, J.M. Recursos ambientais da Bacia do Alto Rio Grande, Minas Gerais. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 33p. (Especialização Lato Sensu em Solos e Meio Ambiente).
- Matielo, J.B.; Santinato, R.; Almeida, S.R.; Garcia, A.W.R.. *Cultura do café no Brasil. Manual de recomendações*, Fundação Procafé. 2015. 590p.
- Medeiros, J.C., Figueiredo, G.C., Mafra, Á.L., Rosa, J.D., Yoon, S.W., 2013. Deep subsoiling of a subsurface-compacted typical hapludult under citrus orchard. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 911–919. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400008>
- Mello, C.R. de, Oliveira, G.C. de, Resck, D.V.S., Lima, J.M.D.E., Dias Júnior, M. de S., 2002. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência e Agrotecnologia* 26, 836–841.
- Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.*, v.12, p.513-522, 1976.
- Mueller, L., Kay, B.D., Been, B., Hu, C., Zhang, Y., Wolff, M., Eulenstein, F., Schindler, U., 2008. Visual assessment of soil structure: Part II. Implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany. *Soil Till. Res.* 103, 188–196.
- Ntech Industries. *Greenseeker Manuals*. Disponível em: <http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html>. Acesso em: 5 jan. 2016.
- Olness, A., Clapp, C.E., Liu, R., Palazzo, A.J., 1998. Biosolids and their effects on soil properties. In: Wallace, A., Terry, R.E. (Eds.), *Handbook of Soil Conditioners*. Marcel Dekker, New York, NY, pp. 141–165.
- Peele, T. C. Relation of percolation rates through saturated soil cores to volume of pores drained In 15 and 30 minutes under 60 centimeters tension. *Soil Science Socite of America. Proc*, 14: 359-361. 1949.

- Pereira, T.C.; Ker, J.C.; Almeida, C.C. 2012. Qualidade de solos cultivados com eucalipto na região central de Minas Gerais: atributos físicos, químicos e mineralógicos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, vol. 7, pp. 706-713.
- Pereira, T.T.C.; Ker, J.C.; Schaefer, C.E.G.R.; Barros, N.F.; Neves, J.C.L.; Almeida, C.C. 2010. Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 34, núm. 4, pp. 1283-1296.
- Pezzoni Filho, J.C.; Fenner, P.T.; Lanças, P.K.; Pezzoni, D.; Moraes, W.B.; Chagas, H.A.; Trosdorf, J.C.R. 2014. Compactação de um cambissolo háplico causada pela extração florestal com trator skidder CERNE, v. 20, núm. 2, abril-junio, pp. 199-207.
- Qin, S., Zhang, J., Dai, H., Wang, D., Li, D., 2014. Effect of ridge – furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area. *Agric. Water Manag.* 131, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.015>
- Qingjie, W., Caiyun, L., Hongwen, L., Jin, H., Kumer, K., Rasaily, R.G., Zhonghui, L., Xiaodong, Q., Hui, L., David, A., Mchugh, J., 2014. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield : 12-Year experiment on alkaline soils of Northeast China. *Soil Tillage Res.* 137, 43–49.
- Querejeta, Â.I., Rolda, A., Albaladejo, J., Castilho, V., 2001. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *For. Ecol. Manage.* 149, 115–128.
- Rena, A. B.; Maestri, M. Fisiologia do cafeeiro. In: Rena, A. B.; Malavolta, E.; Rocha, M.; Yamada, T. *Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 13-85, 1986.
- Reynolds, W., Drury, C., Yang, X., Tan, C., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C. a., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252–263.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S., Zhang, T.Q., 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till. Res.* 96, 316–330.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Tan C.S. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structured regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146, pp. 466-474.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., Yang, J.Y. 2014. Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil. *Can. J. Soil Sci.* 94: 403-419.

- Rodrigues, L.A., Martinez, H.E.P., Neves, J.C.L., Roberto, F., Mendonça, S.M., 2001. Growth response of coffee tree shoots and roots to subsurface liming 207–214.
- Rouse, J.W; Hass, R.H; Schell, J.A; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite Symposium, 3., 1973, Washington. Proceedings... Washington: NASA, 1973. v.1, p.309-317.
- Salamanca-Jimenez, A., Doane, T.A., Horwath, W.R., 2016. Performance of Coffee Seedlings as Affected by Soil Moisture and Nitrogen Application, *Advances in Agronomy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.11.006>
- Santos, W.J.R., Silva, B.M., Oliveira, G.C., Volpato, M.M.L., Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J., 2014. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma* 221–222, 91–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.006>
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., Seidel, S.J., 2017. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil Tillage Res.* 174, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.005>
- Serafim, M.E., César De Oliveira, G., Silva De Oliveira, A., Maria De Lima, J., Tácito, P., Guimarães, G., Costa, J.C., 2011. Intensive coffee cultivation management in the physiographic region of the upper San Francisco river, Mg: a case study. *Biosci. J.* 27, 964–977.
- Serafim, M.E., de Oliveira, G.C., Vitorino, A.C.T., Silva, B.M., Carducci, C.E., 2013a. Qualidade física e Intervalo Hídrico Ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 733–742. <https://doi.org/10.1590/S0100-068320130003000020>
- Serafim, M.E., Oliveira, G.C. De, Lima, J.M. De, Silva, B.M., Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., 2013b. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 362–370. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>
- Serafim, M.E., Serafim, M.E., Deoliveira, G.C., Curi, N., Delima, J.M., Guimarães, P.T.G., Lima, V.M.P., 2013c. Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. *Biosci. J.* 29, 1640–1652.
- Severiano, C., Oliveira, G.C. De, Curi, N., Dias Júnior, M.D.S., 2009. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). *Rev. Bras. Ciência do Solo* 33, 159–168.
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015a. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res.* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>

- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Oliveira, L.M., 2012. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. *Biosci. J.* 28, 338–345.
- Silva, B.M., Santos, W.J.R., Oliveira, G.C., Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J., 2015b. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. *Cienc. e Agrotecnologia* 39, 39–47.
- Silva, É.A., 2017. Propriedades físico-hídricas do solo e desenvolvimento radicular do cafeeiro Lavras – MG. Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Ciência do solo, Universidade Federal de Lavras, MG.
- Silva, É.A., De Oliveira, G.C., Carducci, C.E., Silva, B.M., Serafim, M.E., 2016. Aggregates morphometry of a Inceptisol under conservationist system. *Semin. Agrar.* 37, 1165–1176. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1165>
- Silva, R.F. Comportamento físico-hídrico de solos submetidos ao preparo e manejo sob lavoura cafeeira. Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, MG. 77p.
- Sing, K.S.W., Everett, D.H., Haul, R. A. W., Moscou, L.; Pierotti, R. A., Rouquerol, J., Siemieniowska, T. 2008. Reporting physisorption data for gas/solid systems - with special reference to the determination of surface area and porosity. International Union of Pure and Applied Chemistry. Physical Chemistry Division. P. 606-619.
- Skopp, J., Jawson, M.D., Doran, J.W., 1990. Steady-State Aerobic Microbial Activity as a Function of Soil Water Content. *Soil Sci. Soc. Am.* 54, 1619–1625.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12 Edition, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, 97, 123, 287.
- Tian, S., Ning, T., Wang, Y., Liu, Z., Li, G., Li, Z., 2016. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China. *Soil Tillage Res.* 163, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.005>
- Tormena, C.A., Silva, Á.P. Da, Imhoff, S.D.C., Dexter, A.R., 2008. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. *Sci. Agric.* 65, 56–60. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000100008>
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.*, 44, pp. 892-898.
- Valzano, F.P., Murphy, B.W., Greene, R.S.B., 2001. The long-term effects of lime (CaCO₃), gypsum (CaSO₄.2H₂O), and tillage on the physical and chemical properties of a sodic red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.* 39, 1307–1331. <https://doi.org/10.1071/SR99114>
- Warrick, A.W., 2002. *Soil Physics Companion*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA.
- White, R.E., 2006. *Principles and Practice of Soil Science*. Blackwell Publishing, Oxford,

UK.

Zhang, Y., Wang, R., Wang, S., Wang, H., Xu, Z., Jia, G., Wang, X., Li, J., 2017. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system. *F. Crop. Res.* 209, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.002>

Zuliani, D.Q. Balanço geoquímico em plantações de eucalipto e caracterização de águas superficiais próximas a depósitos de lixo: estudos de caso. 2003. 91p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.