

SIRO PAULO MOREIRA

**QUALIDADE DO SOLO EM CULTIVOS COM PLANTAS DE COBERTURA NO
ALTO PARANAÍBA-MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Teogenes Senna de Oliveira

Coorientador: Rafael da Silva Teixeira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M838q
2023
Moreira, Siro Paulo, 1995-
Qualidade do solo em cultivos com plantas de cobertura no
Alto Paranaíba-MG / Siro Paulo Moreira. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (119 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.413>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Física do solo. 2. Solos - Teor de carbono. 3. Solos -
Teor de nitrogênio. 4. Solos - Qualidade -Indicadores de do
solo. 5. Ativação enzimática. I. Oliveira, Teógenes Senna de,
1961-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.43


SIRO PAULO MOREIRA

**QUALIDADE DO SOLO EM CULTIVOS COM PLANTAS DE COBERTURA NO
ALTO PARANAÍBA-MG**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de março de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 SIRO PAULO MOREIRA
Data: 03/07/2023 11:10:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Siro Paulo Moreira
Autor

Documento assinado digitalmente
 TEOGENES SENNA DE OLIVEIRA
Data: 03/07/2023 11:37:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Teogenes Senna de Oliveira
Orientador

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO GERAL

MOREIRA, Siro Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Qualidade do solo em cultivos com plantas de cobertura no Alto Paranaíba-MG.** Orientador: Teogenes Senna de Oliveira. Coorientador: Rafael da Silva Teixeira.

A manutenção da qualidade do solo é necessária para a garantia da segurança alimentar e a produção agrícola sustentável, em vista das mudanças climáticas e a necessidade de adequação dos sistemas de uso do solo. Com isso, o uso de indicadores de qualidade tem se tornado cada vez mais importante para demonstrar o grau de sustentabilidade dos sistemas de uso do solo. Na mesorregião do Alto Paranaíba-MG, os cultivos mecanizados são favorecidos pelo relevo e tipo de solo, mas causam impactos nos atributos físicos, químicos e biológicos do mesmo. Medidas para mitigar os impactos oriundos do trânsito de máquinas se tornam necessárias para evitar problemas por compactação do solo, sendo o uso de plantas de cobertura uma estratégia de baixo custo. O presente estudo objetivou avaliar: (i) atributos físicos do solo em sistemas de cultivo perenes e anuais com uso de plantas de cobertura em diferentes profundidades; (ii) a influência das plantas de cobertura nos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) totais e das frações da matéria orgânica do solo; e (iii) a atividade enzimática associada aos ciclos de carbono (C), fósforo (P) e enxofre (S). Duas situações foram estudadas, a primeira envolveu a contribuição das plantas de cobertura em cultivo solteiro (*Urochloa ruziziensis*) e com mistura de plantas (mix) nas entrelinhas do café (1º. Capítulo); e a segunda envolveu o uso de braquiária (*Urochloa brizantha*) participando da sucessão de cultivos de cereais em diferentes épocas de implantação (2º. Capítulo). Na produção cafeeira, constatou-se que as plantas de cobertura trazem diversos benefícios, principalmente nos atributos físicos do solo em profundidade e no aumento e manutenção dos estoques de C e N. Houve situações de compactação de uma camada do solo em ambas situações, mostrando que é necessário adaptar as operações e diminuir o tráfego em períodos de maior umidade no solo. O uso de braquiária em áreas de cultivo de cereais e fibras se mostrou uma boa opção, com benefícios para a manutenção da porosidade de solos suscetíveis à erosão, mesmo em solos arenosos e de textura média avaliados. Mas o trânsito recente de máquinas agrícolas ocasionou problemas por compactação superficial, comprovado pela redução das atividades de enzimas e detrimento dos atributos físicos do solo em superfície, podendo dificultar a infiltração de água.

Palavras-chave: Atributos físicos. Estoques de C e N. Atividade de enzimas. Indicadores de qualidade do solo. Sistemas conservacionistas.

GENERAL ABSTRACT

MOREIRA, Siro Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2023. **Soil quality in crops with cover crops in Alto Paranaíba-MG.** Advisor: Teogenes Senna de Oliveira. Co-advisor: Rafael da Silva Teixeira.

Maintaining soil quality is necessary to ensure food security and sustainable agricultural production, in view of climate change and the need to adapt land use systems. As a result, the use of quality indicators has become increasingly important to demonstrate the degree of sustainability of land use systems. In the mesoregion of Alto Paranaíba-MG, mechanized cultivations are favored by the relief and type of soil, but cause impacts on its physical, chemical and biological attributes. Measures to mitigate the impacts arising from the traffic of machinery become necessary to avoid problems due to soil compaction, with the use of cover crops being a low-cost strategy. The present study aimed to evaluate: (i) soil physical attributes in perennial and annual cropping systems using cover crops at different depths; (ii) the influence of cover crops on total carbon (C) and nitrogen (N) stocks and soil organic matter fractions; and (iii) enzymatic activity associated with carbon (C), phosphorus (P) and sulfur (S) cycles. Two situations were studied, the first involved the contribution of cover crops in single cultivation (*Urochloa ruziziensis*) and with a mixture of plants (mix) between coffee rows (1st Chapter); and the second involved the use of Brachiaria (*Urochloa brizantha*) participating in the succession of cereal crops at different implantation times (2nd Chapter). In coffee production, it was found that cover crops bring many benefits, mainly in the physical attributes of the soil in depth and in the increase and maintenance of C and N stocks. There were situations of compaction of a soil layer in both situations, showing that it is necessary to adapt operations and reduce traffic in periods of higher soil moisture. The use of brachiaria in areas of cereal and fiber cultivation proved to be a good option, with benefits for maintaining the porosity of soils susceptible to erosion, even in sandy and medium textured soils evaluated. But the recent transit of agricultural machinery has caused problems due to surface compaction, evidenced by the reduction of enzyme activities and the detriment of the physical attributes of the surface soil, which may hinder water infiltration.

Keywords: Physical attributes. C and N stocks. Enzyme activity. Soil quality indicators. Conservation systems.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS	13
CAPÍTULO I: REFLEXOS DO CULTIVO DE COBERTURAS VEGETAIS SOBRE A QUALIDADE DO SOLO EM LAVOURAS DE CAFÉ (<i>Coffea arabica</i> L.) NO ALTO PARANAÍBA-MG	18
1. INTRODUÇÃO	20
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1. Descrição das áreas de estudo e histórico de uso	21
2.2. Amostragem de solo	25
2.3. Análises físicas	25
2.4. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS)	26
2.5. Estoques de C e N das frações MOP, MOAM, MOD e Total	27
2.6. Atividade de enzimas do solo	28
2.7. Análises estatísticas	29
3. RESULTADOS	30
3.1. Densidade do solo, condutividade hidráulica, macroporosidade, microporosidade e porosidade total	30
3.2. Resistência à penetração	34
3.3. Curva de retenção de água e capacidade de água disponível	36
3.4. Estoques de C e N totais e nas frações da MOS	39
3.5. Atividade de enzimas do solo	43
3.6. Análise de componentes principais (PCA)	45
4. DISCUSSÃO	46
4.1. Atributos físicos	46
4.2. Estoques de C e N nas frações da MOS	50
4.3. Atividade de enzimas do solo	52
4.4. Análise de componentes principais (PCA)	54
5. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	57
CAPÍTULO II: QUALIDADE DO SOLO NO CULTIVO DE CEREAIS PÓS-SUCCESSÃO COM BRAQUIÁRIA (<i>Urochloa brizantha</i>) EM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO	65
6. INTRODUÇÃO	67

7. MATERIAL E MÉTODOS	69
7.1. Descrição das áreas de estudo e histórico de uso	69
7.2. Amostragem de solo.....	73
7.3. Análises físicas.....	73
7.4. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS)	75
7.5. Estoques de C e N das frações MOP, MOAM, MOD e Total	75
7.6. Atividade de enzimas do solo	76
7.7. Análises estatísticas.....	78
8. RESULTADOS	79
8.1. Densidade do solo, condutividade hidráulica, macroporosidade, microporosidade e porosidade total	79
8.2. Resistência à penetração.....	83
8.3. Curva de retenção de água e capacidade de água disponível.....	85
8.4. Estoques de C e N totais e nas frações da MOS	88
8.5. Atividade de enzimas do solo	92
8.6. Análise de componentes principais (PCA).....	94
9. DISCUSSÃO	96
9.1. Atributos físicos	96
9.2. Estoques de C e N nas frações da MOS	100
9.3. Atividade de enzimas do solo	103
9.4. Análise de componentes principais (PCA).....	106
10. CONCLUSÃO	107
REFERÊNCIAS.....	108
CONSIDERAÇÕES FINAIS	119

INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um dos recursos mais importantes para a produção de alimentos no planeta. A manutenção da qualidade do solo é necessária para a garantia da segurança alimentar e a produção agrícola sustentável, em vista das mudanças climáticas e a necessidade de adequação dos sistemas de uso atualmente adotados (YUAN et al., 2020). O termo qualidade do solo consiste na capacidade deste em fornecer suporte e nutrientes às plantas, armazenar água e atender as necessidades humanas (DORAN; PARKIN, 1994). Com isso, o uso de indicadores de qualidade tem se tornado cada vez mais importante para demonstrar o grau de sustentabilidade dos sistemas de uso do solo, que podem ser de ordem física, química e biológica (PHAM et al., 2018).

A avaliação dos indicadores de qualidade do solo tem se tornado cada vez mais essencial nos agroecossistemas produtivos, pois, por meio dela é possível traçar estratégias de uso do solo compatíveis com os princípios da sustentabilidade. Dentre os indicadores, tem sido recomendado os que podem sofrer mudanças em médio prazo, tais como densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e a matéria orgânica do solo (MOS) (CARVALHO et al., 2013). Doran e Parkin (1994) argumentam que um bom indicador de qualidade do solo é aquele fácil de se medir e interpretar, além de ser sensível ao manejo. A matéria orgânica do solo, por ser um importante reservatório de nutrientes, estar associada ao fornecimento de cargas nos solos e contribuir em sua agregação, também deve ser monitorada (CARVALHO et al., 2004), bem como as atividades enzimáticas, uma vez que elas respondem rapidamente às mudanças nas práticas de manejo (PANDEY et al., 2014).

Os indicadores físicos são de grande importância para estimar o grau de degradação do solo, funcionando como suporte para a adoção de estratégias que visem a melhoria de sua qualidade (MONCADA et al., 2014). O intenso tráfego de máquinas agrícolas, o tipo de fertilizante, a cultura e a drenagem impactam diretamente na qualidade física do solo, podendo prejudicá-la com áreas ou camadas compactadas (VALIPOUR et al., 2014). A compactação é definida com o aumento da densidade do solo pelo resultado de cargas e pressões aplicadas ao mesmo, e varia conforme a textura e o uso adotado (FERNANDES et al., 2012). A compactação é representada pelo aumento da densidade e da resistência do solo à penetração (LUCIANO et al., 2012; LOPES et al., 2020), e pode ser facilitada pela quantidade de água no solo. A água funciona como um lubrificante entre as partículas do solo, fazendo com que o mesmo se torne mais susceptível à compactação com o aumento de sua presença (MARTINS et al., 2012). Outra característica relevante para a compactação do solo é a sua textura. Solos de textura argilosa

são mais propensos à compactação em relação aos de textura arenosa, uma vez que os grânulos de areia não são passíveis de serem comprimidos, como ocorre com os agregados de argila (NAGHDI et al., 2020).

Dentre outros indicadores, destacam-se a porosidade total (PT), a macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), a condutividade hidráulica (CH) e a umidade do solo (θ). Estes indicadores revelam alterações estruturais provocadas pela adoção de determinado sistema de uso do solo, como também problemas relacionados à susceptibilidade de erosão (LIMA et al., 2013; ZAMBRANA et al., 2010). Com o aumento da compactação dos solos ocorre a redução da macroporosidade e, conseqüentemente, a diminuição da aeração, o fluxo de água e o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Também há o aumento da interação entre os elementos químicos com as partículas sólidas, dificultando o seu transporte até a planta (ZAMBRANA et al., 2010; VALADÃO et al., 2015).

A curva de retenção de água no solo (CRA) é outro indicador utilizado para avaliação da qualidade de sistemas agrícolas (TIAN et al., 2022), também dependente das características de cada solo, pois resulta de atributos como textura, estrutura, mineralogia e o conteúdo de matéria orgânica (SILVA et al., 2020). A partir da CRA é possível calcular diversos atributos do solo, como a PT, Ma, Mi e saturação, sendo considerada de grande importância para a estimativa de indicadores de qualidade física do solo (SILVA et al., 1994; BEUTLER et al., 2002). Outro indicador obtido a partir da CRA é a capacidade de água disponível (CAD) do solo, calculada pela diferença dos teores de água retidos na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), a critério de uma profundidade determinada. A CAD de um solo é um dos parâmetros determinantes na duração e intensidade do déficit hídrico para o desenvolvimento e a produtividade de uma cultura (ESTEBAN et al., 2019), representando o volume de água que pode ser retida pelo solo e absorvida pelas raízes (TEIXEIRA et al., 2021).

A matéria orgânica do solo (MOS) é outro indicador a ser considerado na avaliação da qualidade do solo, por ser responsável em manter o equilíbrio dos agroecossistemas, pois está relacionada aos processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no solo (BARBOSA; DE OLIVEIRA, 2022). É um importante reservatório de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) para os cultivos (SARKER et al., 2018) e, também, está associada a uma melhor estruturação do solo (CHANEY; SWIFT, 1984), além de ser fonte de energia para a microbiota (FROUZ, 2018).

A matéria orgânica do solo (MOS) apresenta grande heterogeneidade química e complexidade estrutural, o que torna o seu estudo difícil e complexo (MASOOM et al., 2016). Novos métodos de avaliação trouxeram grandes avanços nessa temática. Historicamente o

estudo da MOS apontava para o fracionamento químico visando sua compreensão e seu papel na persistência no solo (MINASNY et al., 2020). Porém, o fracionamento físico da MOS, a partir da divisão desta em compartimentos que apresentam funções distintas no solo (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020), tem abrangido melhor a dinâmica do estudo neste tema. As frações físicas da MOS são: matéria orgânica associada a minerais (MOAM < 0,053 mm), matéria orgânica particulada (2 mm < MOP > 0,053 mm) e matéria orgânica dissolvida (MOD < 0,45µm), com essa última podendo fazer parte da MOP ou MOAM (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020).

A matéria orgânica dissolvida (MOD) é a fração da MOS mais sensível às diferenças de uso do solo (SANTOS et al., 2022), sendo composta principalmente por materiais percolados no perfil por ação das chuvas, serapilheira, deposições de raízes, microrganismos e exsudatos, moléculas orgânicas dissolvidas na água da chuva e até a própria MOS (GMACH et al., 2020; KALBITZ et al., 2000). A MOD faz parte dos processos de sorção e desorção da matéria orgânica associada a minerais. Devido a essa mobilidade e interação com a matriz mineral, a MOD é considerada uma das vias de aumento do estoque de carbono em profundidade no solo (LEINEMANN et al., 2018). É um importante recurso para os microrganismos do solo, sendo considerada uma fonte prontamente disponível (MARSCHNER; KALBITZ, 2003) e continuamente consumida, transformada e formada no solo (ROTH et al., 2019; DING et al., 2020).

Os indicadores biológicos de qualidade do solo estão associados principalmente a atividade microbiana do solo, seja pela respiração de tais organismos ou pela determinação das atividades das enzimas do solo, que participam ativamente do ciclo do carbono (β -glicosidase), do nitrogênio (urease), do enxofre (arilsulfatase) e do fósforo (fosfatase ácida) (KAURIN et al., 2021; XU et al., 2019). As enzimas são um grupo de proteínas de grande importância nos processos bioquímicos do solo (DICK et al., 1996, WAHSHA et al., 2016). Populações microbianas e enzimas estão sujeitas a alterações de acordo com o uso do solo e são consideradas, por diversos autores, como ferramentas importantes para a avaliação da qualidade do solo (MATSUOKA et al., 2003), muitas vezes associadas a boas produtividades (WAHSHA et al., 2016). De maneira geral, as enzimas se apresentam em baixas concentrações no solo e, por isso, sua avaliação é realizada pelas atividades que realizam e não por suas quantidades (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Nesse contexto, o presente trabalho avaliou as alterações dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, a partir de indicadores específicos de qualidade. Para tanto, foi dividido em dois capítulos: O primeiro investigou a contribuição das plantas de cobertura em cultivo

solteiro (*Urochloa ruzizensis*) e com mistura de plantas (mix) nas entrelinhas do café; e o segundo avaliou o uso de braquiária (*Urochloa brizantha*) participando da sucessão de cultivos de cereais em diferentes épocas de implantação, ambos realizados na região do Alto Paranaíba-MG.

Assim, os objetivos deste estudo consistiram em avaliar: (i) atributos físicos do solo em sistemas de cultivo perenes e anuais com uso de plantas de cobertura em diferentes profundidades; (ii) a influência de sistemas de uso do solo com plantas de cobertura nos estoques de C e N das frações da matéria orgânica do solo; e (iii) a atividade enzimática associada aos ciclos de C, P e S em sistemas de uso do solo com plantas de cobertura.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, T. C. S.; DE OLIVEIRA, V. P. V. Indicadores químicos e biológicos de qualidade do solo utilizados no monitoramento da degradação em ambientes semiáridos: análise do estado da arte. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 17403-17423, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-126>
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.829-834, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300029>
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1153-1155, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>
- CARVALHO, L. C. C.; DA SILVA, F. M.; FERRAZ, G. A.; DA SILVA, F. C.; STRACIERI, J. Spatial variability of soil physical attributes and agronomic characteristics of coffee crop. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.
- CHANEY, K.; SWIFT, R. S. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. **Journal of Soil Science**, v. 35, n. 2, p. 223–230, 1984. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1984.tb00278.x.
- DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J.W.; JONES, A. J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 247-272, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspepub49.c15>
- DING, Y.; SHI, Z.; YE, Q.; LIANG, Y.; LIU, M.; DANG, Z.; WANG, Y.; LIU, C. Chemodiversity of Soil Dissolved Organic Matter. **Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 10, p. 6174–6184, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c01136.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Wisconsin: **Soil Science Society American**, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspepub35.c1>
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, I. N.; PAULA, N. R. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.60-71, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>
- FERNANDES, A.L.; SANTINATO, F.; SANTINATO, R. Utilização da subsolagem na redução da compactação do solo para produção de café cultivado no cerrado mineiro. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, 2012.
- FROUZ, J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. **Geoderma**, v. 332. p. 161–172, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.08.039.

GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; KAISER, K.; CERRI, C. E. P. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 3, 2020. DOI: 10.1590/1678-992x-2018-0164.

KALBITZ, K.; SOLINGER, S.; PARK, J. H.; MICHALZIK, B.; MATZNER, E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. **Soil Science**, Bayreuth, Germany, v. 165, n. 4, p. 32, 2000.

KAURIN, A.; GLUHAR, S.; MAČEK, I.; KASTELEC, D.; LESTAN, D. Demonstrational gardens with EDTA-washed soil. Part II: Soil quality assessment using biological indicators. **Science of The Total Environment**, v. 792, p. 148522, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148522>

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020. DOI: 10.1111/gCBra.14859.

LEINEMANN, T.; PREUSSER, S.; MIKUTTA, R.; KALBITZ, K.; CERLI, C.; HÖSCHEN, C.; MUELLER, C. W.; KANDELER, E.; GUGGENBERGER, G. Multiple exchange processes on mineral surfaces control the transport of dissolved organic matter through soil profiles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 118, p. 79–90, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.12.006.

LIMA, R.P; SILVA, A.R; APARECIDA, J. Importância de atributos físicos do solo na identificação da compactação. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 13, 2013. DOI: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7392968#>

LOPES, A. G. C.; DA SILVA CORREIA, T. P.; DE BRITO, G. R., DE ALMEIDA FARIA, A. P. F.; SILVA, P. R. A. Desempenho operacional e custo da subsolagem com e sem rodado duplo no trator agrícola. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 3, p. 317-329, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n3p317-329>

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. D.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1733-1744, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600007>

MARSCHNER, B.; KALBITZ, K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. **Geoderma**, v. 113, n. 3–4, p. 211–235, 2003. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00362-2.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. D. S.; AJAYI, A. E.; MOREIRA, F. M. D. S. Structural sustainability of Cambisol under different land use system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1724-1732, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600006>

MASOOM, H.; COURTIER-MURIAS, D., FAROOQ, H.; SOONG, R.; KELLEHER, B. P.; ZHANG, C.; SIMPSON, A. J. Soil Organic Matter in Its Native State: Unravelling the Most

Complex Biomaterial on Earth. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 1670–1680, 2016. DOI: 10.1021/acs.est.5b03410.

MATSUOKA, M., MENDES, I. C., LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 27, 425-433. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300004>

MINASNY, B.; MCBRARATNEY, A. B.; WADOUX, A. M. J. C.; AKOEB, E. N.; SABRINA, T. Precocious 19th century soil carbon science. **Geoderma Regional**, v. 22, p. e00306, 2020. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00306.

MONCADA, P. M., GABRIELS, D., CORNELIS, W. M. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. **Geoderma**, 235–236, 271–278. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.014>

MOREIRA, F. S., SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. **Editora UFLA**, Lavras, MG, Brasil, p. 729, 2006. URI: <http://biblioteca.uniscied.edu.mz/handle/123456789/1700>

NAGHDI, R.; SOLGI, A.; LABELLE, E. R.; NIKOOY, M. Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. **Pedosphere**, v. 30, n. 4, p. 508-516, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60428-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60428-4)

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; BOHRA, J.S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 51-60 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.013>

PHAM, T. G.; NGUYEN, H. T.; KAPPAS, M. Assessment of soil quality indicators under different agricultural land uses and topographic aspects in Central Vietnam. **International Soil and Water Conservation Research**, 6(4), 280–288. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.08.001>

PIRES, A. R. P.; SILVA, B.; OLIVEIRA, I. C.; PEREIRA, J. O. S. **Normalização de trabalhos acadêmicos**: atualizada conforme NBR 14724/2011 e NBR 6023/2018. Viçosa, MG, UFV, BBT, 2021. Manual eletrônico (114 p.). Disponível em: <http://www.bbt.ufv.br/wpcontent/uploads/ManualtrabalhosAcademicos.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.

ROTH, V. N.; LANGE, M.; SIMON, C.; HERTKORN, N.; BUCHER, S.; GOODALL, T.; GLEIXNER, G. Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 9, p. 755–761, 2019. DOI: 10.1038/s41561-019-0417-4.

SARKER, J. R.; SINGH, B. P.; DOUGHERTY, W. J.; FANG, Y.; BADGERY, W.; HOYLE, F. C.; DALAL, R. C.; COWIE, A. L. Impact of agricultural management practices on the nutrient supply potential of soil organic matter under long-term farming systems. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 71–81, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2017.08.005.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of de least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P. de; MARTINS, A. F.; PEREIRA, W. E.; SANTOS, T. E. D.; AMARAL, A. J. do. Caracterização físico-hídrica de solos arenosos através da curva de retenção de água, índice S e distribuição de poros por tamanho. **Agrarian**, v. 13, n. 50, p. 478–492, 2020. DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i50.10993>

SANTOS, R. S.; WIESMEIER, M.; OLIVEIRA, D. M. S.; LOCATELLI, J. L.; BARRETO, M. S. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; CERRI, C. E. P. Conversion of Brazilian savannah to agricultural land affects quantity and quality of labile soil organic matter. **Geoderma**, v. 406, n. October 2021, 2022. a. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115509](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115509).

TEIXEIRA W. G, VICTORIA D. C, BARROS A. H. C, LUMBRERAS J. F, ARAUJO FILHO J. C, SILVA F. A. M, LIMA E. P, BUENO FILHO J. S. S, MONTEIRO J. E. B. A. Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**; 2021. (Boletim técnico, 272).

TIAN, M., QIN, S., WHALLEY, W. R., ZHOU, H., REN, T., & GAO, W. Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density, penetrometer resistance, water retention curve, least limiting water range and X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 221, p. 105420, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105420>

VALADÃO, F. C. A., WEBER, O. L. S., VALADÃO JÚNIOR, D. D., SCAPINELLI, A., DEINA, F. R. E BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 243-255, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150144>

VALIPOUR, M. Drainage, waterlogging, and salinity. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 12, p. 1625-1640, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.905676>

WAHSHA, M. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soils, **Catena**, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.021>. 2016.

XU, H.; SHAO, H.; LU, Y. Arbuscular mycorrhiza fungi and related soil microbial activity drive carbon mineralization in the maize rhizosphere. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 182, p. 109476, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109476>

YUAN, P., WANG, J., LI, C., XIAO, Q., LIU, Q., SUN, Z., WANG, J., & CAO, C. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set. **Soil and Tillage Research**, 204, 104732. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104732>

ZAMBRANA, M.O.D.; RUIZ, H.A.; SILVA, T.C.A.; NEVES, C.L.N.; CORRÊA, G.F.; ERASO, M.H. A compactação de três materiais de solo, na redução da condutividade

hidráulica, porosidade do solo e matéria seca de raiz nas culturas de soja e caupi. **Revista de Agronomia**, v. 27, n. 1, p. 74-84, 2010.

CAPÍTULO I: REFLEXOS DO CULTIVO DE COBERTURAS VEGETAIS SOBRE A QUALIDADE DO SOLO EM LAVOURAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) NO ALTO PARANAÍBA-MG

RESUMO

MOREIRA, Siro Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Reflexos do cultivo de coberturas vegetais sobre a qualidade do solo em lavouras de café (*Coffea arabica* L.) no Alto Paranaíba-MG.** Orientador: Teogenes Senna de Oliveira. Coorientador: Rafael da Silva Teixeira.

O café é uma das commodities de maior importância para o Brasil, sendo o mesmo o maior produtor mundial. O estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional, com destaque para a região do Alto Paranaíba. Os cultivos mecanizados são favorecidos pelo relevo e tipo de solo predominantes nessa região, mas causam impactos nos atributos físicos, químicos e biológicos. Medidas para mitigar os impactos oriundos do trânsito de máquinas se tornam necessárias para evitar problemas por compactação do solo, além de favorecer uma maior ciclagem de nutrientes, aumento de inimigos naturais de pragas e maior atividade microbiana do solo, sendo o uso de plantas de cobertura uma estratégia viável e de baixo custo. Objetivou-se avaliar atributos físicos, os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) totais (CT e NT), nas frações físicas da matéria orgânica do solo (MOS) e a atividade de enzimas associadas aos ciclos de C, N e P em cultivos de café com braquiária (CBra), plantas de cobertura diversas (CMix), e área de vegetação natural (VNat), em diferentes profundidades, na região do Alto Paranaíba-MG. O uso de braquiária e mix de plantas de cobertura favoreceu o armazenamento e capacidade de água disponível do solo até um metro de profundidade quando comparado a área de referência. Foi observada a presença de uma camada compactada na área de CBra (0,10-0,30 m), mostrando que a planta de cobertura não foi suficiente pra evitar problemas de compactação oriundos do efeito cumulativo do tráfego de máquinas agrícolas. A braquiária proporcionou valores de estoques de C e N similares aos encontrados na área de VNat até um metro de profundidade. Quando se utilizou CMix houve um aumento significativo nos estoques da MOP na camada 0,30-0,60 m. As atividades de arilsulfatase não aumentaram em CBra e CMix, comparativamente a área de referência (VNat). A maior atividade da β -glicosidase foi constatado em CMix. Os resultados da fosfatase ácida (P) foram superiores na área com uso de braquiária nas entrelinhas, e podem ter sido influenciados pelo uso de fontes inorgânicas de fósforo como adubo na área com mix de plantas de cobertura.

Palavras-chave: Plantas de cobertura. Compactação. Manejo conservacionista.

CHAPTER I: REFLECTIONS OF COVERAGE CULTURE ON SOIL QUALITY IN COFFEE CROPS (*Coffea arabica* L.) IN ALTO PARANAÍBA-MG

ABSTRACT

MOREIRA, Siro Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2023. **Reflections of coverage culture on soil quality in coffee crops (*Coffea Arabica* L.) in Alto Paranaíba-MG.** Advisor: Teogenes Senna de Oliveira. Co-advisor: Rafael da Silva Teixeira.

Coffee is one of the most important commodities for Brazil, being the world's largest producer. The state of Minas Gerais is the largest national producer, with emphasis on the Alto Paranaíba region. Mechanized cultivations are favored by the relief and type of soil predominant in this region, but cause impacts on physical, chemical and biological attributes. Measures to mitigate the impacts arising from the traffic of machines become necessary to avoid problems due to soil compaction, in addition to favoring a greater cycling of nutrients, an increase in natural enemies of pests and greater microbial activity in the soil, with the use of cover crops a viable and cost-effective strategy. The objective was to evaluate physical attributes, total carbon (C) and nitrogen (N) stocks (CT and NT) in the physical fractions of soil organic matter (SOM) and the activity of enzymes associated with the cycles of C, N and P in coffee crops with brachiaria (CBra), various cover crops (CMix), and natural vegetation area (VNat), at different depths, in the Alto Paranaíba region-MG. The use of brachiaria and mix of cover crops favored the storage and available water capacity of the soil up to one meter deep when compared to the reference area. The presence of a compacted layer in the CBra area (0.10-0.30 m) was observed, showing that the cover plant was not enough to avoid compaction problems arising from the cumulative effect of the traffic of agricultural machinery. Brachiaria provided C and N stock values similar to those found in the VNat area up to one meter deep. When CMix was used, there was a significant increase in MOP stocks in the 0.30-0.60 m layer. Arylsulfatase activities did not increase in CBra and CMix compared to the reference area (VNat). The highest β -glucosidase activity was found in CMix. The results for acid phosphatase (P) were higher in the area with brachiaria between the rows, and may have been influenced by the use of inorganic sources of phosphorus as fertilizer in the area with a mix of cover crops.

Keywords: Cover plants. Compression. Conservation management.

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das commodities de maior importância para o Brasil, sendo o maior produtor mundial (USDA, 2020). A produção nacional em 2022 foi de 50,9 milhões de sacas, sendo 32,7 milhões de café arábica (*Coffea arabica* L.) e 18,2 milhões de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner). O estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional, com 22,0 milhões de sacas (CONAB, 2023).

O desenvolvimento da cafeicultura em Minas Gerais se iniciou nas regiões Sul e Zona da Mata, no início do século 19 (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000). Com o tempo, a produção cafeeira se expandiu para novas áreas, como o Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Alto Jequitinhonha (EMATER, 2021). Essas regiões apresentam características que favorecem a mecanização da produção, como relevo mais suavizado e solos mais profundos, mas que necessitam de sistemas irrigados para uma alta produtividade (GOMES et al., 2020). Apesar de profundos e capazes de armazenar grandes volumes de água, os solos desta região apresentam limitações químicas ao crescimento de raízes de culturas comerciais, tais como: elevada toxicidade de alumínio (Al^{3+}), baixos teores de fósforo (P), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) (SILVA et al., 2003; LYNCH; WOJCIECHOWSKI, 2015).

Embora operações mecanizadas proporcionem benefícios econômicos para o manejo das lavouras, há efeitos negativos sobre diversos atributos físicos do solo (BARBOSA et al., 2019). No café, o tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas em áreas de relevo plano ou suave é constante e geralmente em uma mesma posição ao longo dos anos, gerando áreas concentradas de compactação no solo (OZPINAR et al., 2018). É imprescindível, portanto, o emprego de práticas que proporcionem o rompimento eficiente de camadas compactadas do solo, especialmente pelo uso de plantas de cobertura (FARIAS et al., 2013). Altas produções de biomassa, tanto da parte aérea, quanto do sistema radicular de plantas de cobertura, geram melhoria da qualidade física do solo (QUEIROZ et al., 2011), pois atingem camadas mais profundas, favorecendo a ciclagem de nutrientes e o aumento da diversidade microbiana do solo (PEREIRA et al., 2017).

Plantas como a braquiária (*Urochloa* sp. P.Beauv.) se destacam na região dos Cerrados, por serem mais fáceis de conduzir nas entrelinhas dos cafezais e possuem ação direta na qualidade e estruturação do solo (ROCHA et al., 2014). Características como adaptabilidade às condições locais, arquitetura apropriada para consórcio em sistema de produção com café, perenidade, rusticidade, facilidade de manutenção e resistência à mecanização, aliadas à uma

ação agregante do solo, favorecem o uso da braquiária e a qualificam como uma espécie promissora para uso como cobertura nas entrelinhas do café (WUTKE et al., 2014).

Por outro lado, o uso de diferentes espécies de plantas (mix de plantas de cobertura) pode aumentar a abundância e diversidade microbiana, proporcionando o aumento dos estoques de carbono (CORDEIRO et al., 2022), quando comparado com cultivos individuais (ZHANG et al., 2022). Além das características de alta produção de biomassa, raízes profundas e elevada mobilidade de nutrientes do solo, esses cultivos apresentam potencial para sequestro de carbono em maiores profundidades (THORUP-KRISTENSEN et al., 2020). Favorecem, também, mudanças nas taxas de mineralização de nutrientes no solo (FRANZLUEBBERS et al., 1995), influenciando ciclos biogeoquímicos do C, N, P, e S, majoritariamente intermediados por microrganismos na decomposição da MOS (GAMA-RODRIGUES et al., 2005; BARRETO et al., 2008).

A partir das informações levantadas, pressupõe-se que: (i) o uso de plantas de cobertura melhora os atributos físicos do solo em sistemas de cultivo intensivo de café, reduzindo camadas compactadas em superfície e profundidade, favorecendo o aumento da porosidade do solo e o fluxo e armazenamento de água do solo; (ii) sistemas de uso conservacionistas do solo com plantas de cobertura são capazes de aumentar os estoques de C e N das frações orgânicas da MOS em superfície e profundidade; (iii) plantas de cobertura favorecem a atividade de enzimas relacionadas aos ciclos do C, P e S em superfície e profundidade.

Nesse sentido, os objetivos do presente trabalho foram de avaliar: (i) atributos físicos do solo em cultivos de café com braquiária e plantas de cobertura diversas em diferentes profundidades; (ii) a influência de sistemas de uso do solo com braquiária e plantas de cobertura diversas nos estoques de C e N das frações da matéria orgânica do solo em diferentes profundidades; e (iii) a atividade enzimática associada aos ciclos de C, P e S em cultivos de café com braquiária e plantas de cobertura diversas.

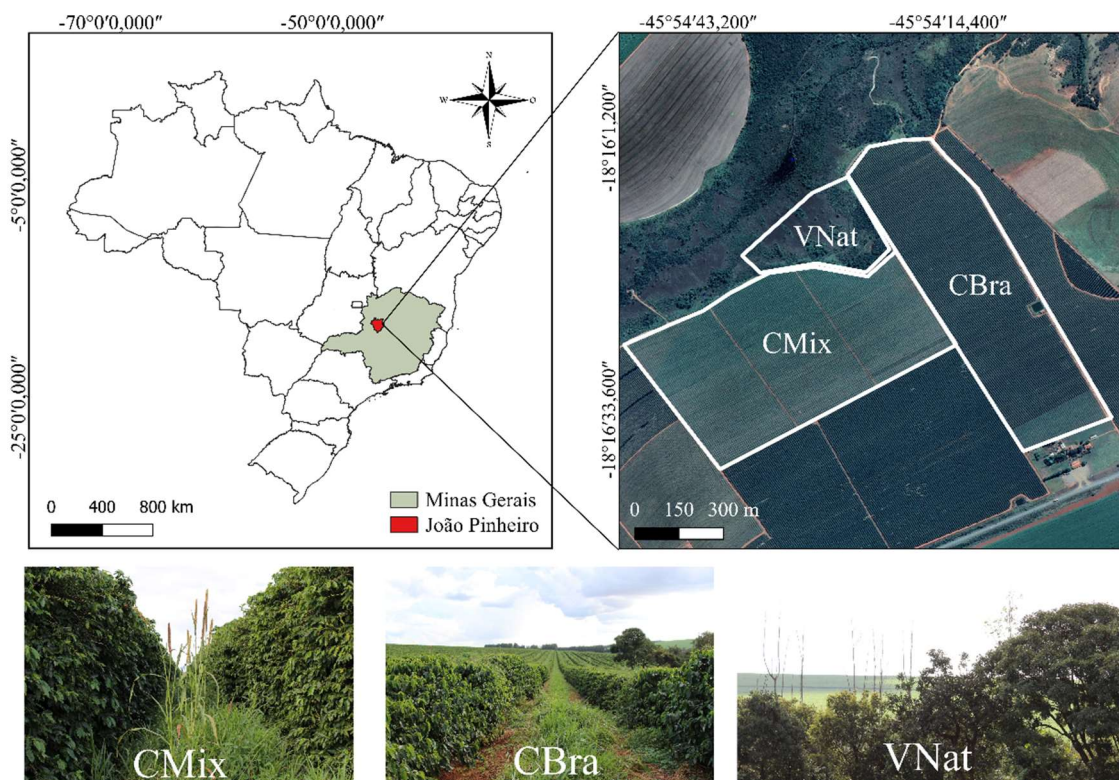
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição das áreas de estudo e histórico de uso

Os sistemas de uso do solo selecionados para o presente estudo estão localizados no município de João Pinheiro - MG, Brasil (18°16'15" S, 45°54'22" W). O clima é, segundo a classificação de Köppen, tropical chuvoso com inverno seco (Aw), com precipitação e temperatura médias anuais de 1.420 mm e 22 °C, respectivamente. O período do ano com maiores precipitações e temperaturas ocorre entre novembro a abril, com nítida estação seca no

inverno, de maio a outubro (ALVARES et al., 2013). A altitude média das áreas de coleta é de 910 m (Figura 1).

Figura 1 - Localização das áreas de cultivo de café com diferentes espécies (CMix) e com braquiária (CBra), cultivadas como plantas de cobertura nas entrelinhas, e sob vegetação natural (VNat), no município de João Pinheiro - MG, Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo predominante na área é Latossolo Vermelho, predominando solos de textura argilosa a muito argilosa (teor de argila entre 58 e 66%; Tabela 1). As áreas de café são irrigadas por gotejamento, sendo totalmente mecanizadas, e o manejo da adubação e correções são realizados conforme as recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes de Ribeiro et al. (1999).

Duas áreas de cultivo com café (*Coffea arabica* L.) foram selecionadas para o presente estudo: a primeira com cultivo de braquiária (*Urochloa ruziziensis* (R.Germ.& Evrard) Crins) nas entrelinhas do café (CBra, 34,2 ha), e outra com uma mistura de espécies de plantas de cobertura nas entrelinhas do café (CMix, 44,82 ha). A área CMix possui plantas das seguintes espécies: nabo-forrageiro (*Raphanus sativus* L.), braquiária (*Urochloa ruziziensis* (R.Germ.& Evrard) Crins), trigo-mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench), crotalária (*Crotalaria* sp. L.), girassol (*Helianthus annuus* L.) e milho (*Cenchrus americanus* (L.) Morrone). Além dessas áreas, uma outra sob vegetação natural (VNat, 18,3 ha) também foi avaliada.

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), no município de João Pinheiro - MG, Brasil

	CMix				CBra				VNat			
	0,0-0,10	0,10-0,30	0,30-0,60	0,60-1,00	0,0-0,10	0,10-0,30	0,30-0,60	0,60-1,00	0,0-0,10	0,10-0,30	0,30-0,60	0,60-1,00
pH H ₂ O (1:2,5)	6,17	6,51	5,35	5,70	6,15	6,19	5,66	5,80	5,22	5,19	5,44	5,14
P (mg dm ⁻³)	21,10	1,10	0,10	0,10	4,80	2,00	0,10	0,10	1,70	0,30	0,10	0,10
P-Rem (mg L ⁻¹)	26,20	19,40	12,50	9,60	25,60	20,50	12,90	9,70	19,00	13,70	9,90	7,30
K (mg dm ⁻³)	41,00	134,00	77,00	93,00	69,00	83,00	35,00	17,00	41,00	29,00	21,00	13,00
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,99	3,10	0,44	0,41	4,11	3,14	0,46	0,46	2,23	0,26	0,22	0,11
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,56	0,59	0,00	0,00	1,12	0,72	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,39	0,20	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,20	2,90	3,40	2,40	3,90	3,70	3,50	2,60	8,40	6,00	3,90	2,90
SB (cmol _c dm ⁻³)	6,66	4,03	0,64	0,65	5,41	4,07	0,55	0,50	2,81	0,33	0,27	0,14
t (cmol _c dm ⁻³)	6,66	4,03	0,64	0,65	5,41	4,07	0,55	0,50	3,10	0,72	0,47	0,14
T _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	9,86	6,93	4,04	3,05	9,31	7,77	4,05	3,10	11,21	6,33	4,17	3,04
V (%)	67,5	58,20	15,80	21,30	58,10	52,40	13,60	16,10	25,10	5,20	6,50	4,60
m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,40	54,20	42,60	0,00
Dp (g cm ⁻³)	2,47	2,35	2,41	2,33	2,41	2,44	2,38	2,33	2,35	2,50	2,44	2,44
ADA (kg kg ⁻¹)	0,08	0,14	0,019	0,01	0,08	0,14	0,09	0,08	0,07	0,08	0,10	0,10
Areia grossa (kg kg ⁻¹)	0,24	0,22	0,189	0,20	0,21	0,17	0,18	0,17	0,25	0,27	0,24	0,25
Areia fina (kg kg ⁻¹)	0,08	0,08	0,105	0,10	0,11	0,13	0,11	0,12	0,11	0,14	0,13	0,07
Silte (kg kg ⁻¹)	0,08	0,06	0,052	0,05	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04	0,05
Argila (kg kg ⁻¹)	0,59	0,64	0,655	0,66	0,60	0,63	0,65	0,65	0,58	0,56	0,59	0,63

Obs.: Potencial hidrogeniônico (pH) em água: determinado em solução 1:2,5 (solo-solução) por potenciometria; P-Rem: Fósforo remanescente extraído por CaCl₂ e determinado por absorção molecular; K e o P disponíveis: extraídos com solução de Mehlich-1; Ca²⁺, Al³⁺ e Mg²⁺ extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; H+Al: extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, a pH 7,0; SB = soma de bases trocáveis (Mg²⁺ + K⁺ + Ca²⁺); T = capacidade de troca catiônica a pH 7,0, que é soma de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Al³⁺ e H⁺; t = capacidade de troca catiônica efetiva, que é a soma de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Al³⁺; V = saturação por bases V(%) = (100*SB)/t; m = saturação por alumínio, em que m = (100*Al³⁺)/(SB+Al³⁺); Densidade de partículas (Dp) determinada pelo método do balão volumétrico; Argila dispersa em água (ADA) determinada pelo método da pipeta; Areia grossa e fina determinadas por peneiramento; Silte e argila determinados pelo método da pipeta + agitação lenta. Metodologias segundo Alvarez et al. (2000) e Teixeira et al. (2017).

Fonte: Elaborado pelo autor.

As áreas de estudo escolhidas estão localizadas na fazenda Farroupilha Café (403 ha), onde se cultiva café desde 2003. Na área de café com diferentes espécies de plantas de cobertura em mix (CMix) nas entrelinhas foi implantada a variedade Catucaí, sendo que anteriormente era uma área de pastagem, implantada na década de 1990, após corte e queimada da vegetação natural existente. O manejo das entrelinhas dos cafeeiros consistia no uso de equipamento de corte e trituração dos restos vegetais para controle das plantas espontâneas (trincha), assim como aplicação de herbicida não seletivo com jato dirigido nas entrelinhas na época da colheita, a fim de controlar as plantas espontâneas e facilitar a colheita. A partir de 2012, a aplicação de calcário e gesso passou a seguir a recomendação para a cultura, assim como a aplicação de adubo, de acordo com as análises de solo, realizadas anualmente, o que anteriormente era realizado de forma empírica. Em 2019 foi plantada uma nova variedade (Catuaí vermelho IAC 144) com espaçamento de 3,8 m nas entrelinhas e 0,7 m entre plantas. Na implantação da lavoura, foi utilizado um sulcador para perfurar a linha de plantio, seguido da aplicação de uma mistura de esterco de aviário (6.000 kg ha⁻¹), palha de café (6.000 kg ha⁻¹), calcário dolomítico (500 kg ha⁻¹) e o adubo fosfatado supersimples (SSP; 500 kg ha⁻¹). A adubação de cobertura foi realizada um mês após o plantio com ureia (148 kg ha⁻¹), SSP (60 kg ha⁻¹), cloreto de potássio (KCl; 145 kg ha⁻¹) e manganês (Mn; 6 kg ha⁻¹). Junto com o plantio do café (2019), foi semeado braquiária e realizada uma gradagem leve, para nivelamento e cobertura das sementes. Com o semeio da braquiária houve uma mudança no manejo das entrelinhas, que passou a ser roçada. Em 2021 foi semeado, pela primeira e de uma só vez, a mistura de espécies diferentes citada anteriormente, da mesma forma que foi semeado braquiária em 2019, sendo que a braquiária existente foi previamente dessecada com herbicida. A área é irrigada por gotejamento e a lâmina d'água é aplicada de acordo com a necessidade da cultura e época do ano, sendo controlada por uma empresa terceirizada.

A área de café com braquiária (CBra) nas entrelinhas foi implantada em 2012, com a variedade Catuaí vermelho IAC 144, espaçada em 4,0 m nas entrelinhas e 0,5 m entre plantas. Anteriormente era uma área de cultivo de cereais, principalmente milho para silagem, tendo sido implantada na década de 1990, quando era uma área de vegetação natural, assim como em CMix. O plantio, e as respectivas adubações foram realizados da mesma forma que em CMix, assim como o manejo da irrigação. O semeio da braquiária foi realizado em 2015, da mesma forma realizada em CMix, passando a ser roçada também. Em 2018 foi utilizado subsolador nas entrelinhas do café junto com uma poda de esqueletamento (corte dos ramos laterais e parte da haste principal da planta), não tendo sido realizado um novo semeio da braquiária.

A área sob vegetação natural (VNat) escolhida é formada por uma vegetação primária, originalmente da fitofisionomia denominada Cerradão. Esse tipo de vegetação é caracterizado por ser um sub-bosque formado por pequenos arbustos e ervas, com poucas gramíneas, com a presença majoritária de espécies que ocorrem no Cerrado sentido restrito e algumas espécies de florestas, como as encontradas na fitofisionomia Mata Seca (RIBEIRO et al., 2008). A área coletada compreende uma área cercada, sem pastejo de animais e nenhum recurso madeireiro extraído, sendo considerada uma área preservada.

2.2. Amostragem de solo

Durante o mês de março de 2022, no final do período chuvoso na região, em cada uma das três áreas de estudo escolhidas, foram abertas quatro trincheiras, com comprimento aproximado de 1 x 1 m de profundidade, totalizando 12 trincheiras. As amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, sendo as amostras indeformadas coletadas no centro de cada camada avaliada. Estas foram definidas após abertura de todas as trincheiras e avaliação de critérios morfológicos como cor, estrutura e exame tátil-visual com uso de faca. As amostras de solo foram coletadas e, dependendo das análises realizadas, estas foram secas ao ar e peneiradas (< 2 mm) ou refrigeradas (~ 4°C) ainda no campo, tendo sido ambas armazenadas para posteriores análises.

2.3. Análises físicas

A umidade do solo foi determinada gravimetricamente em amostras deformadas em estufa de circulação de ar a 105 °C, até atingirem peso constante, por cerca de 24 horas (TEIXEIRA et al., 2017).

A densidade do solo (D_s) e de partículas (D_p) foram determinadas pelos métodos do anel e do balão volumétricos, respectivamente (TEIXEIRA et al., 2017), possibilitando a estimativa da porosidade total (PT), de acordo com fórmula:

$$PT = (1 - D_s/D_p) \quad (1)$$

em que: PT é a porosidade total de cada camada avaliada ($m^3 m^{-3}$); D_s é a densidade do solo da camada avaliada ($Mg m^{-3}$); e D_p é a densidade de partículas da camada avaliada ($Mg m^{-3}$).

A microporosidade (M_i) foi determinada em amostras indeformadas equilibrando a umidade em mesa de tensão a 6 kPa, sendo a macroporosidade obtida por diferença entre PT e M_i (TEIXEIRA et al., 2017). A condutividade hidráulica do solo em meio saturado (CH) foi realizada em anéis volumétricos, com tempo de estabilização de 60 minutos e altura de coluna

de água de 2,0 cm com carga constante, e o volume de água medido em provetas (TEIXEIRA et al., 2017).

A resistência à penetração com umidade corrigida (RP_{uc}), medida no penetrômetro digital em bancada modelo TE-096, do Laboratório de Física do Solo do Departamento de solos (DPS), foi avaliada em ponto central de cada amostra indeformada, em amostras com umidade equilibrada a 10 kPa, tensão que caracteriza a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}). Avaliações da resistência à penetração (RP_c) também foram realizadas a ainda durante as coletas de campo, utilizando o equipamento penetrômetro digital Falker, modelo PenetroLOG2040, com diâmetro de cone de 12,83 mm, haste com profundidade máxima de penetração de 60 cm e velocidade de inserção máxima de 5 cm s^{-1} . Dez medições de resistência a penetração foram feitas no entorno de cada trincheira (transecto) de forma aleatória na área de VNat, e perpendicular à linha de plantio do café nas áreas de CMix e CBra, completando um total de 40 medições para cada sistema de uso do solo.

A umidade nas tensões estabelecidas para a obtenção da curva de retenção de água no solo (CRA) foi obtida pelo equilíbrio de amostras indeformadas nas tensões de 1, 6, e 10 kPa em mesa de tensão. Amostras deformadas foram utilizadas para as tensões de 100, 300 e 1500 kPa, utilizando câmaras de Richards (TEIXEIRA et al., 2017). No entanto, devido à quantidade de CRA's geradas, procedeu-se pela análise estatística dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (" θ_r ", " θ_s ", " α " e " n ") (SEKI et al., 2023), além da comparação das umidades (θ) nas tensões de 10 kPa (Capacidade de campo - θ_{CC}) e 1500 kPa (Ponto de murcha permanente - θ_{PMP}). Com os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foi calculada a capacidade de água disponível (CAD), de acordo com a fórmula adaptada de Kiehl, (1979) e Shaw; Yule, (1981):

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times D_s \times E \times 10 \quad (2)$$

em que: CAD é a capacidade de água disponível da camada avaliada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$); θ_{CC} é a umidade na capacidade de campo da camada avaliada (g g^{-1}); θ_{PMP} é a umidade no ponto de murcha permanente da camada avaliada (g g^{-1}); D_s é a densidade do solo da camada avaliada (g cm^{-3}); E é a espessura do solo para cada camada (cm); 10 é o fator de conversão de mm para $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

2.4. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS)

Amostras deformadas de solo ($< 2 \text{ mm}$) foram utilizadas para o fracionamento físico da matéria orgânica (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), o qual foram separadas em duas frações: matéria orgânica particulada (MOP), que está associada à fração areia ($> 53 \text{ }\mu\text{m}$); e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (silte + argila, $< 53 \text{ }\mu\text{m}$). O procedimento

consistiu na dispersão de uma subamostra de solo (10 g) com 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹), em uma proporção (1:3, m:v) por 15 h em um agitador horizontal. Em seguida, realizou-se o peneiramento úmido com o auxílio de uma peneira com 53 µm de malha. O material retido consiste na MOP e a fração que passou pela peneira, MOAM. Essas frações foram secas em estufa com circulação forçada a uma temperatura de 60 °C até peso constante, e em seguida, moídas e peneiradas com peneira de 250 µm de malha, para determinar seus teores de carbono (C) e nitrogênio (N). Os teores de C e N da MOP e MOAM foram determinados via combustão seca, utilizando um analisador elementar CHNS, modelo Flash EA 1112 da marca Thermo Finnigan (Milan/Itália).

Para a extração da matéria orgânica dissolvida (MOD, fração < 0,45 µm), as amostras, refrigeradas ainda no campo e mantidas a ~ 4 °C, foram acondicionadas em sacos plásticos de cor preta (para evitar foto-oxidação), padronizadas pelo peneiramento em malha de 4 mm, retirando raízes grossas presentes (CHANTIGNY et al., 2007). O solo foi pesado e adicionada água deionizada na proporção 1:1 (m:v), descontando-se a umidade gravimétrica. O uso da água deionizada como extrator objetivou preservar os compostos químicos da MOD. A seguir, as amostras de solo com a água deionizada foram agitadas suavemente com o auxílio de um bastão de vidro durante 3 minutos e, em seguida, centrifugadas a 3450 rpm por 10 min. O sobrenadante foi filtrado utilizando membranas de policarbonato de 0,45 µm de diâmetro de poro, ao abrigo da luz, sendo o volume aferido, seguido do armazenamento em freezer a -18 °C. O filtrado foi armazenado em potes plásticos e, posteriormente, determinado o C e N da MOD por um analisador de carbono TOC-L (Shimadzu, Kyoto, Japão) com adaptador para determinação de nitrogênio (TN).

2.5. Estoques de C e N das frações MOP, MOAM, MOD e Total

Os estoques de C e N da MOP, MOAM e MOD foram calculados considerando a massa específica do solo (ELLERT; BETTANY, 1995). Esse método leva em consideração a massa de solo equivalente das áreas de uso, sendo corrigida a espessura dos sistemas com as mudanças na densidade do solo (Ds), utilizando como referência a densidade média da área de vegetação natural em sua respectiva profundidade. A massa do solo em cada profundidade de cada tratamento foi determinada pela equação:

$$M_{solo} = E \times ha \times Ds \quad (3)$$

em que: M_{solo} é a massa de solo por hectare em cada camada avaliada (Mg ha⁻¹); E é a espessura do solo para cada camada (m); ha é a área empregada (1 ha = 10.000 m²); e Ds é a densidade

do solo em cada camada amostrada (g cm^{-3}). Em seguida, a espessura da camada a ser descontada ou acrescida nos sistemas em relação a vegetação natural foi determinada pela equação:

$$E_{(ad|sub)} = (M_{ref} - M_{solo}) \times fha/Ds \quad (4)$$

em que: $E_{(ad|sub)}$ é a espessura da camada de solo a ser acrescida (+) ou descontada (-) da camada do sistema (m); M_{ref} é a massa equivalente média do tratamento de referência (Mg ha^{-1}); M_{solo} é a massa de solo equivalente de cada tratamento (Mg ha^{-1}); fha é o fator de conversão de ha para m^2 ($0,0001 \text{ ha m}^{-2}$); e Ds é a densidade do solo para a área da camada amostrada (Mg m^{-3}). Após determinar a espessura, os estoques de C e N foram calculados pela seguinte equação:

$$ES = (C \times Ds \times E \pm E_{(ad|sub)}) \times 10 \quad (5)$$

em que: ES é o estoque de C ou N nas frações da MOS (Mg ha^{-1}); E é a espessura da camada de solo (m); Ds é a densidade do solo do sistema de cultivo na camada escolhida ($\text{g cm}^{-3} = \text{Mg m}^{-3}$); C ou N são os teores de C ou N na fração da MOS (g kg^{-1}); e 10 é o fator de conversão de kg m^{-2} para Mg ha^{-1} .

Os estoques da área de referência foram calculados apenas pelo produto do teor, densidade e espessura da camada de solo, pela equação:

$$ES = C \times Ds \times E \times 10 \quad (6)$$

em que: ES o estoque de C ou N nas frações da MOS da área de referência (Mg ha^{-1}); E é a espessura da camada de solo (m); Ds é a densidade do solo do sistema de cultivo na camada escolhida ($\text{g cm}^{-3} = \text{Mg m}^{-3}$); e 10 é o fator de conversão de kg m^{-2} para Mg ha^{-1} .

2.6. Atividade de enzimas do solo

Amostras deformadas de solo ($< 2 \text{ mm}$) foram utilizadas para a determinação das atividades das enzimas arilsulfatase, β -glicosidade e fosfatase ácida (SILVEIRA et al., 2022), nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,30-0,60 m.

Para a determinação da atividade da enzima arilsulfatase pesou-se uma subamostra de solo (1 g) em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), e foram adicionados 4 mL de tampão acetato $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e 1 mL de solução de *p*-nitrofenil sulfato de potássio (PNS). As amostras foram, então, incubadas em estufa a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora e, após a incubação, foram adicionados 1 mL de CaCl_2 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e 4 mL de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e, no branco, o PNS foi adicionado após a incubação. Agitou-se em agitador do tipo vórtex e a suspensão do solo foi filtrada em papel filtro de filtragem lenta e o filtrado utilizado para a obtenção da absorbância da solução (com

coloração amarela), que foi lida em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm. O equipamento foi calibrado de acordo com a curva de calibração da solução padrão diluída de *p*-nitrofenol (PNF), que apresenta coloração amarela.

A determinação da atividade da enzima β -glicosidade foi realizada pesando uma subamostra de solo (1 g) em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), onde foram adicionados 4 mL de solução-estoque do tampão universal modificado (MUB) e 1 mL de solução de *p*-nitrofenil- β -D-glicosídio (PNG), seguido da incubação em estufa a 37 °C por 1 hora. Após a incubação, foram adicionados 1 mL de CaCl_2 0,5 mol L⁻¹ e 4 mL de solução Tris pH 12 0,1 mol L⁻¹. No branco, o PNS foi adicionado após a incubação. Na sequência, agitou-se em agitador do tipo vórtex e a suspensão do solo foi filtrada em papel filtro de filtragem lenta, sendo o filtrado (com coloração amarela) utilizado para determinação da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm. O equipamento foi calibrado de acordo com a curva de calibração da solução padrão diluída de *p*-nitrofenol (PNF), que apresenta coloração amarela.

A atividade da enzima fosfatase ácida foi determinada pesando-se uma subamostra de solo (1 g) em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), e adicionando 4 mL de solução estoque do tampão universal modificado (MUB 2 a pH 6,5) e 1 mL de solução de *p*-nitrofenil fosfato dissódico (P-NPP). Após, as amostras seguiram o mesmo procedimento adotado na determinação da arilsulfatase.

A atividade enzimática é expressa em μg de *p*-nitrofenol por grama de solo por hora (μg de *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹), que corresponde a mg de *p*-nitrofenol por quilograma de solo por hora (mg de *p*-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹). O cálculo da atividade de cada enzima é feito com base na curva de calibração de *p*-nitrofenol. Para expressar a atividade da enzima na massa de solo a partir da curva padrão é usada a equação:

$$A_E = (C \times V)/(g \times t) \quad (7)$$

em que: A_E é a atividade da enzima ($\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$); C é a concentração de *p*-nitrofenol na suspensão do solo ($\mu\text{g mL}^{-1}$); V é o volume da suspensão de solo (10 mL); g é a massa do solo seco ao ar (g); e t é o tempo de incubação (1 h).

2.7. Análises estatísticas

Os resultados foram analisados estatisticamente considerando um fatorial 3 x 4 com restrições de aleatorização, em que as trincheiras foram sistematicamente distribuídas dentro das áreas de cultivo (CMix, CBra) e VNat, caracterizando um delineamento sistemático

(ALVAREZ, V. V. H.; ALVAREZ, 2013; CALZADA BENZA, 1964), sendo as profundidades dispostas em faixas. Utilizou-se quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e o desdobramento das interações sistema de uso x profundidade foi realizado independentemente da significância pelo teste F, até 25% de probabilidade (PERECIN; CARGNELUTTI FILHO, 2008). As médias dos tratamentos em cada profundidade foram comparadas pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade, utilizando-se os erros apropriados para cada tipo de comparação, usando o *software* R versão 4.1.2 com o pacote *ExpDes.pt* e função *sis2* (FERREIRA et al., 2022).

Tabela 2 - Quadro de análise de variância (ANOVA) do delineamento sistemático

Fontes de variação	Graus de liberdade
Sistemas	$(i-1) = 2$
Erro A	$(i-1) * (i-1) + (k-1) = (2 \times 2) + (3) = 7$
Profundidade	$j-1 = 3$
Erro B	$(j-1) * (k-1) = 3 \times 3 = 9$
Sistemas * profundidade	$(i-1) * (j-1) = 2 \times 3 = 6$
Erro C	$2 \times 2 \times 3 = 12$
Total	$40 - 1 = 39$

Fonte: Dados da pesquisa.

Também foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) para melhor relacionar as variáveis que comportaram uma maior explicação da variação entre os sistemas e as profundidades. Para tanto, procedeu-se com a avaliação dos autovetores, sendo selecionadas as variáveis com autovetor igual ou superior a 0,7, e assim procedeu-se nova análise, até que todos os parâmetros apresentassem autovetor $\geq 0,7$. Correlação de Pearson também foi realizada entre os valores de RP_c , RP_{uc} e umidade do solo. Ambas análises foram realizadas no *software* R versão 4.1.2.

3. RESULTADOS

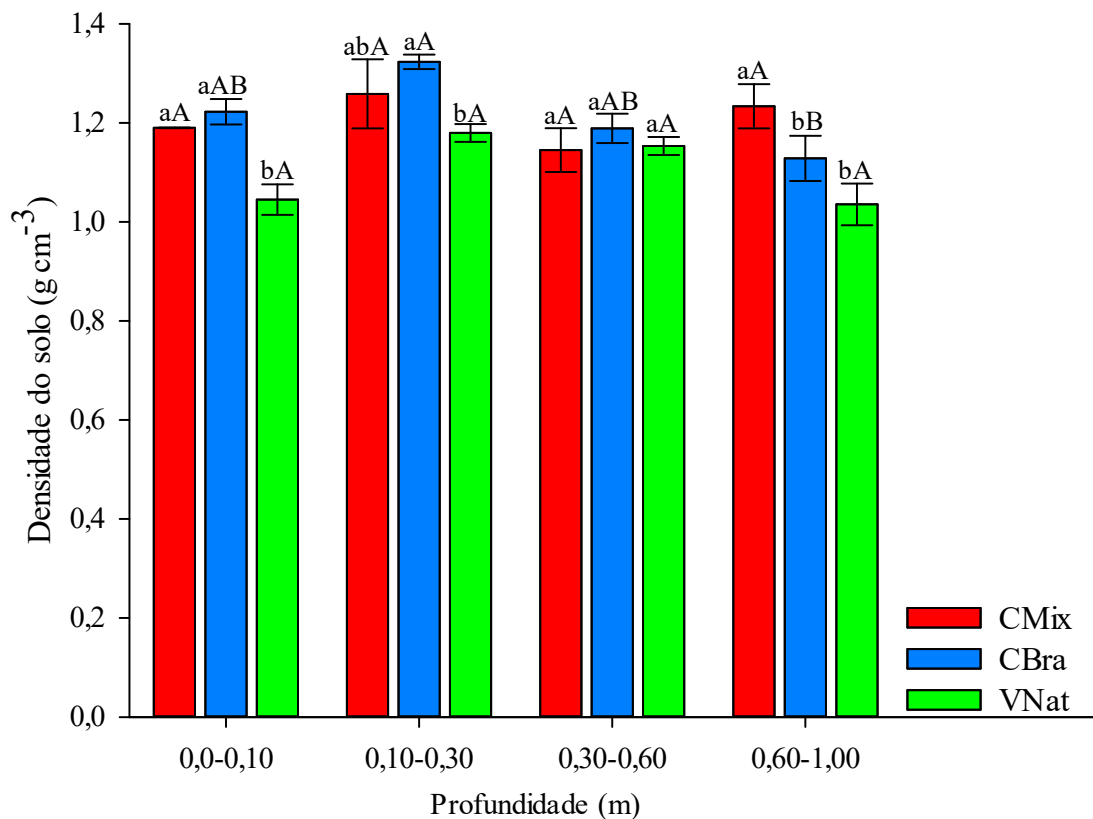
3.1. Densidade do solo, condutividade hidráulica, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os resultados das comparações entre os valores médios de densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica (CH) com solo saturado, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) de um Latossolo Vermelho das situações de estudo envolvendo os sistemas de manejo CMix, CBra e VNat, nas quatro profundidades avaliadas.

Observou-se os menores ($p < 0,05$) valores de Ds em VNat ($1,04 \text{ g cm}^{-3}$) quando comparado a CBra ($1,22 \text{ g cm}^{-3}$) e CMix ($1,19 \text{ g cm}^{-3}$) em 0,0-0,10 m, sendo os dois últimos semelhantes ($p > 0,05$). Na camada de 0,10-0,30 m foi observado o mesmo comportamento, com VNat ($1,18 \text{ g cm}^{-3}$) se diferenciando ($p < 0,05$) apenas de CBra ($1,32 \text{ g cm}^{-3}$). Na profundidade de 0,30-0,60 m não houve diferenças ($p > 0,05$) entre os valores de Ds observados ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 1,16 \text{ g cm}^{-3}$), sendo que em 0,60-1,00 m os maiores valores ($p < 0,05$) foram verificados em CMix ($1,23 \text{ g cm}^{-3}$) quando comparado a CBra ($1,13 \text{ g cm}^{-3}$) e VNat ($1,03 \text{ g cm}^{-3}$). CBra e VNat foram semelhantes ($p > 0,05$) nesta última profundidade.

Nas comparações entre profundidades não foram constatadas diferenças ($p > 0,05$) em CMix e VNat, enquanto CBra apresentou os maiores valores de Ds em 0,10-0,30 m, sendo também superiores ($p < 0,05$), somente quando comparado a 0,60-1,00 m.

Figura 2 - Densidade do solo (Ds) de um Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, João Pinheiro - MG

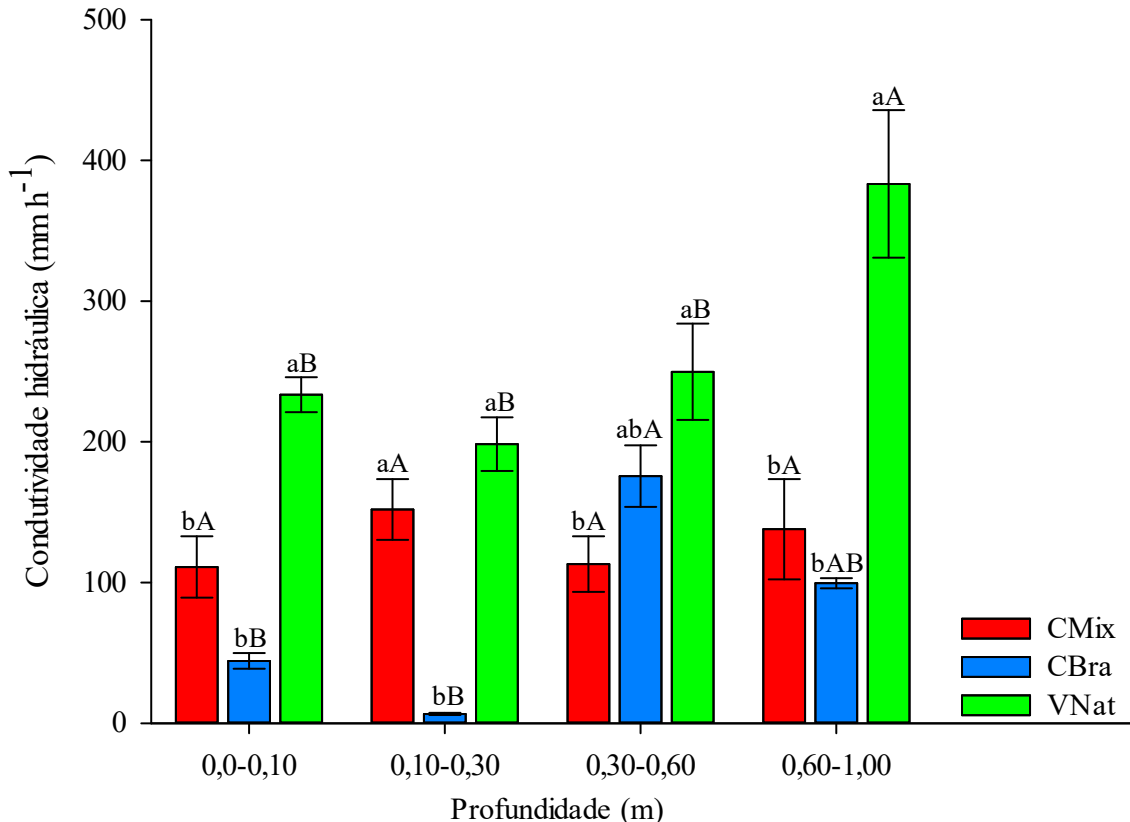


Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contrariamente ao observado na variável D_s , VNat obteve os maiores ($p < 0,05$) valores de CH quando comparado a CMix e CBra, na profundidade de 0,0-0,10 m (233,5; 111,1 e 44,3 mm h^{-1} , respectivamente) e em 0,60-1,00 m (383,2; 137,9 e 99,5 mm h^{-1} , respectivamente), sendo os dois últimos semelhantes ($p > 0,05$). Na profundidade 0,10-0,30 m os maiores ($p < 0,05$) valores de CH foram observados em VNat (198,3 mm h^{-1}) e CMix (151,9 mm h^{-1}) comparativamente a CBra (6,6 mm h^{-1}), sendo os primeiros similares ($p > 0,05$) entre si. Em 0,30-0,60 m observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores de CH em VNat (249,8 mm h^{-1}) somente quando comparado a CMix (113,1 mm h^{-1}). Nas comparações entre profundidades não foram constatadas diferenças ($p > 0,05$) entre os valores de CMix. Em CBra os maiores ($p < 0,05$) valores foram observados em 0,30-0,60 m somente quando comparado a 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m, sendo as últimas similares ($p > 0,05$) entre si. Os maiores ($p < 0,05$) valores de CH em VNat foram observados na camada 0,60-1,00 m quando comparado às outras, que não se diferiram estatisticamente.

Figura 3 - Condutividade hidráulica com solo saturado (CH) de um Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, João Pinheiro - MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A macroporosidade (Ma) apresentou, na camada de 0,0-0,10 m, os maiores ($p < 0,05$) valores em VNat ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) quando comparado a CBra ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e CMix ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), sendo os dois últimos semelhantes ($p > 0,05$). Para microporosidade, constatou-se valores superiores ($p < 0,05$) de CMix ($0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação a CBra ($0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e VNat ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), sendo os dois últimos semelhantes ($p > 0,05$). CMix ($0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e VNat ($0,56 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) não se diferiram ($p > 0,05$) e foram superiores ($p < 0,05$) a CBra ($0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) quanto a PT.

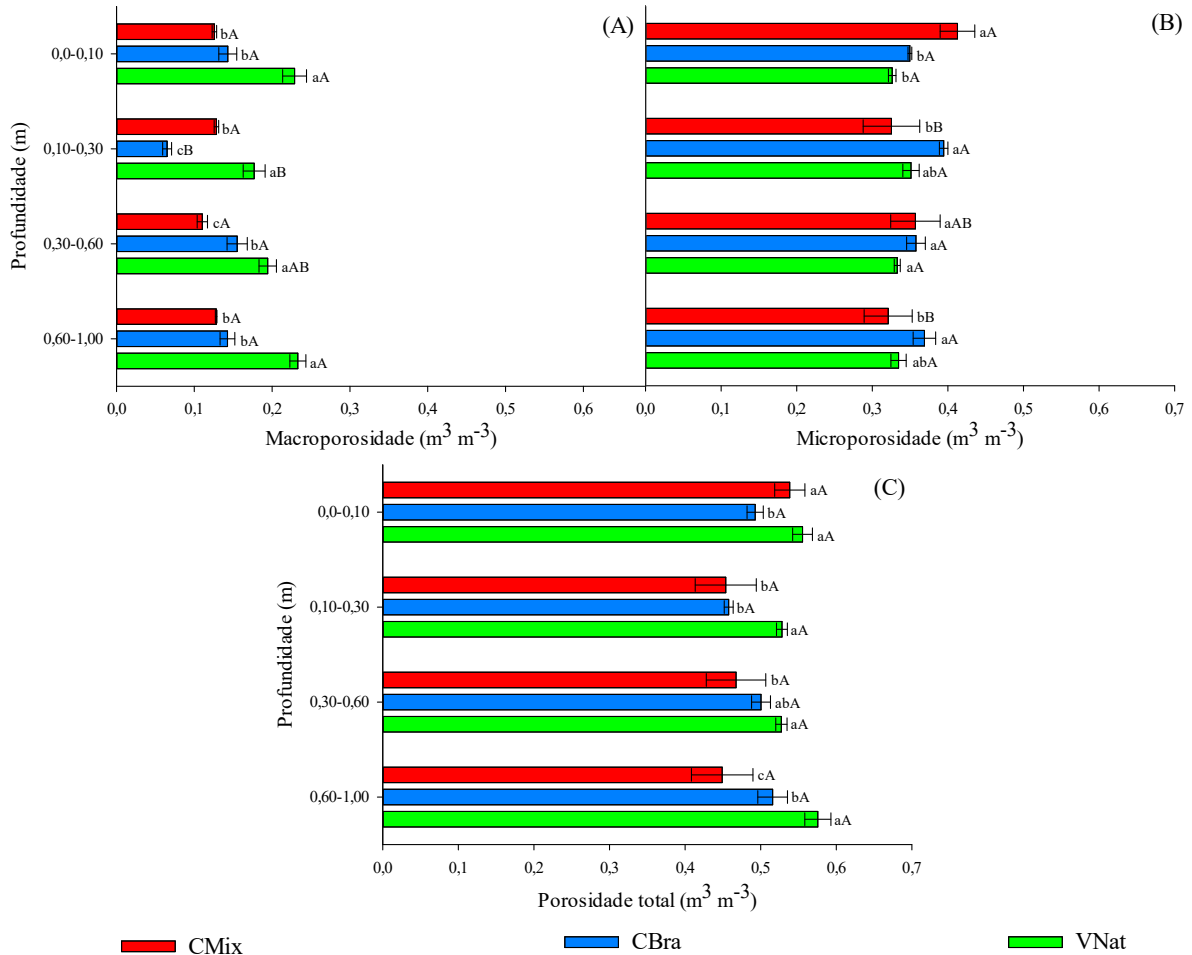
Em 0,10-0,30 m, VNat ($0,18$ e $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de Ma e PT quando comparado a CBra ($0,06$ e $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) e CMix ($0,13$ e $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), sendo os dois últimos semelhantes ($p > 0,05$) quanto a PT, enquanto CMix apresentou maiores ($p < 0,05$) valores de Ma que CBra. A Mi apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores em CBra ($0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) somente quando comparado a CMix ($0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Na profundidade de 0,30-0,60 m os maiores ($p < 0,05$) valores de Ma e PT foram observados em VNat ($0,19$ e $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), quando comparado a CBra ($0,15$ e $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) e CMix ($0,11$ e $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente). CBra foi superior ($p < 0,05$) a CMix para Ma e semelhantes ($p > 0,05$) quando PT foi estimada. As três situações de estudo não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) para Mi ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Em 0,60-1,00 m, similar ao que foi observado na camada anterior, VNat ($0,23$ e $0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de Ma e PT quando comparado a CBra ($0,14$ e $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) e CMix ($0,13$ e $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), sendo os dois últimos semelhantes ($p > 0,05$) em macroporosidade e CBra apresentando maiores ($p < 0,05$) valores que CMix em porosidade total. Para microporosidade, os maiores ($p < 0,05$) valores foram observados em CBra ($0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) somente quando comparado a CMix ($0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Nas comparações entre profundidades não foram constatadas diferenças ($p > 0,05$) entre os valores de Ma em CMix, de Mi em CBra e VNat e de PT em CMix, CBra e VNat. Na variável Ma, CBra apresentou os menores ($p < 0,05$) valores somente em 0,10-0,30 m, quando comparado às outras profundidades, sendo estas últimas similares ($p > 0,05$) entre si. Na mesma variável (Ma), VNat apresentou valores similares ($p > 0,05$) em 0,0-0,10 e 0,60-1,00 m e superiores ($p < 0,05$) somente a 0,10-0,30 m. Para Mi, em CMix, os maiores ($p < 0,05$) valores foram observados em 0,0-0,10 m somente quando comparado a 0,10-0,30 e 0,60-1,00 m, sendo as duas últimas semelhantes ($p > 0,05$).

Figura 4 - Macroporosidade (A), microporosidade (B) e porosidade total (C) de um Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, João Pinheiro - MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Resistência à penetração

A Figura 5 apresenta os resultados de resistência à penetração em condições de campo (RP_c) e com umidade corrigida para a capacidade de campo (RP_{uc}) nas profundidades de 0,0-0,60 e 0,0-1,00 m, respectivamente, e a umidade no momento das coletas nas situações de estudo.

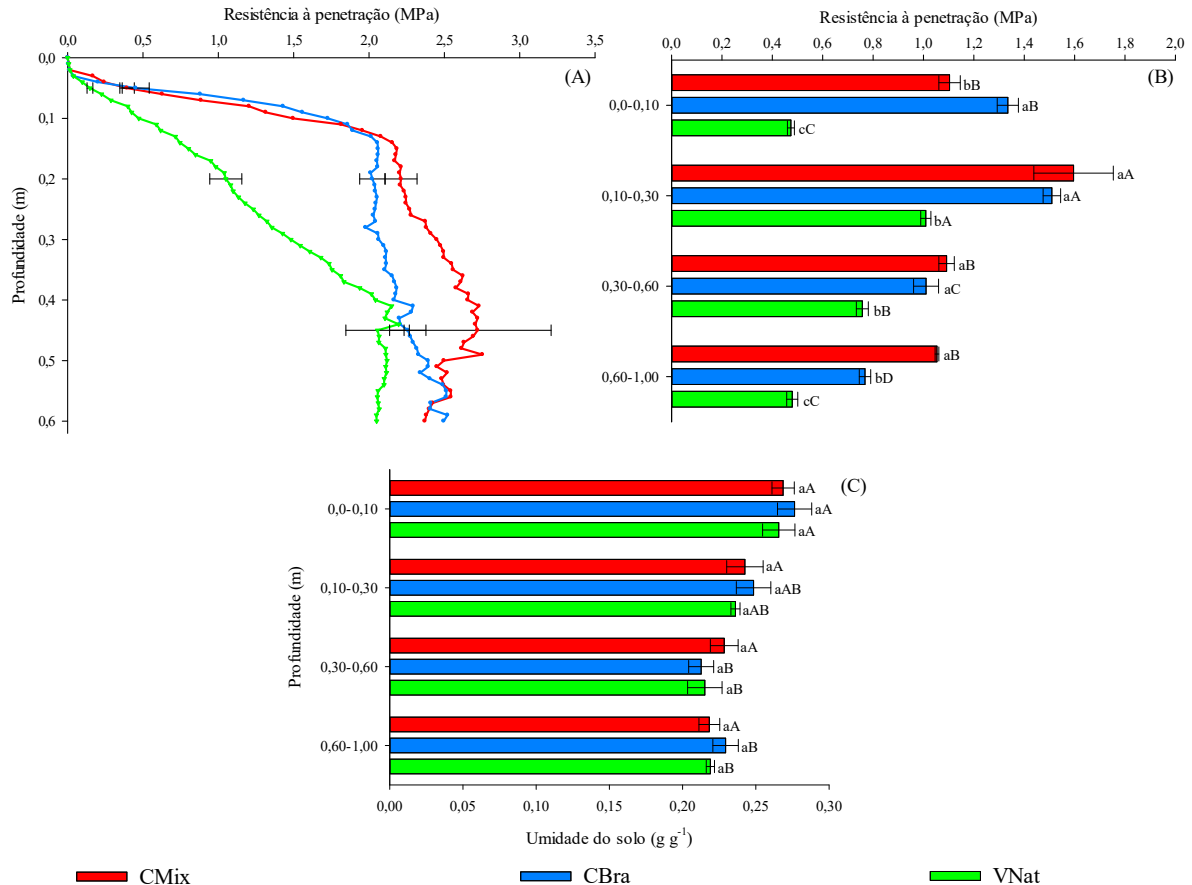
De maneira geral, o comportamento observado em RP_c também é observado em RP_{uc} . Em VNat são observados os menores valores de ambas as variáveis (RP_c e RP_{uc}) quando comparado a CMix e CBra. Até a profundidade de 0,40 m, os valores de RP_c ficaram abaixo de 2,0 MPa em VNat, mantendo-se constantes nessa faixa até 0,60 m. A RP_c apresenta o mesmo comportamento em CBra e CMix, atingindo valores próximos a 2,0 MPa na profundidade de

0,15 m, aumentando até próximo de 2,5 MPa na profundidade de 0,50 m. Em CMix foram observados valores superiores a CBra até 0,50 m, com ambos se igualando de 0,50-0,60 m (Figura 5 - A).

A possível influência dos valores de umidade do solo (Figura 5 - C) sobre as RP_c pode ser descartada, já que, até a camada estudada (0,0-0,60 m), não houve diferenças ($p>0,05$) entre os valores em cada profundidade avaliada, possibilitando as comparações de RP_c entre as situações de estudo. Porém, nas comparações entre profundidades é possível notar um comportamento comum a todas as situações estudadas, em que 0,0-0,10 m ($\bar{X}_{Geral} = 0,27 \text{ g g}^{-1}$) apresentou os maiores valores, seguido de 0,10-0,30 m ($\bar{X}_{Geral} = 0,24 \text{ g g}^{-1}$). As profundidades 0,30-0,60 ($\bar{X}_{Geral} = 0,22 \text{ g g}^{-1}$) e 0,60-1,00 m ($\bar{X}_{Geral} = 0,22 \text{ g g}^{-1}$) apresentaram valores de umidade semelhantes ($p>0,05$) e menores ($p<0,05$) que 0,0-0,10 m, resultando em menores valores de RP_c . A exceção a esse comportamento ocorreu em CMix ($\bar{X}_{Geral} = 0,24 \text{ g g}^{-1}$), onde os valores de umidade foram similares ($p>0,05$) entre si em todas as profundidades.

Os valores de RP_{uc} , como já comentado, seguem o mesmo padrão de comportamento observado em RP_c , em que VNat (0,47 MPa) apresentou os menores ($p<0,05$) valores quando comparado a CMix (1,10 MPa) e CBra (1,33 MPa), sendo CBra superior ($p<0,05$) a CMix na camada de 0,0-0,10 m. Nas camadas 0,10-0,30 e 0,30-0,60 m, CMix (1,59 e 1,09 MPa, respectivamente) e CBra (1,51 e 1,01 MPa, respectivamente) apresentaram valores de RP_{uc} semelhantes ($p>0,05$). Contrariamente ao anterior, em 0,60-1,00 m, CMix (1,05 MPa) apresentou valores superiores ($p<0,05$) a CBra (0,77 MPa). Nas comparações entre profundidades, constatou-se que todas as situações de estudo apresentaram os maiores ($p<0,05$) valores de RP_{uc} em 0,10-0,30 m. Já na profundidade de 0,0-0,10 m, CMix e CBra apresentaram os valores menores que em 0,10-0,30 m, sendo que em CBra estes foram superiores ($p<0,05$) às outras profundidades (0,30-0,60 e 0,60-1,00 m) e em CMix foram semelhantes ($p>0,05$). VNat apresentou um comportamento similar ao de CBra e CMix, tendo sido observado que os maiores ($p<0,05$) valores de RP_{uc} ocorreram em 0,10-0,30 m (1,01 MPa), seguidos de 0,30-0,60 m (0,76 MPa) e 0,0-0,10 e 0,60-1,00 m (0,47 e 0,48 MPa, respectivamente), sendo as últimas similares ($p>0,05$) entre si (Figura 5 - B).

Figura 5 - Resistência à penetração em condições de campo (RP_c) (A) e com umidade corrigida para a capacidade de campo (RP_{uc}) (B) e umidade (C) de um Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,60 m e 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, João Pinheiro - MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação de Pearson entre os valores de RP_c e umidade do solo nas situações de estudo, nas profundidades de 0,0-1,00 m foi ($r = -0,95$; $p < 0,001$), demonstrando que à medida que se diminui a umidade do solo, aumenta-se a RP_c . Não foi observada correlação significativa ($p > 0,05$) entre os valores de RP_c e RP_{uc} ($r = 0,12$), assim como RP_{uc} e umidade do solo ($r = -0,18$; $p > 0,05$).

3.3. Curva de retenção de água e capacidade de água disponível

A Tabela 3 e a Figura 6 apresentam os resultados dos parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) pelo modelo de van Genuchten, as umidades nas tensões de 10 kPa (θ_{cc}) e 1500 kPa (θ_{PMP}) e os valores de capacidade de água disponível (CAD), nas profundidades avaliadas, assim como o somatório de CAD de 0,0-1,00 m.

Os valores dos parâmetros de ajuste “ θ_s ”, “ θ_r ”, “ α ”, e “ n ” apresentaram diferenças ($p < 0,05$) entre as situações de estudo em cada uma das profundidades e entre profundidades

para cada situação de estudo. Tais diferenças refletiram nos resultados de umidade (θ) nas tensões que correspondem à capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

Observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores de θ_{CC} em CMix quando comparado a CBra e VNat tanto em 0,30-0,60 quanto 0,60-1,00 m, assim como θ_{PMP} em 0,60-1,00 m, sendo os dois últimos sistemas semelhantes ($p > 0,05$). Em 0,10-0,30 m, observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores de θ_{CC} e de θ_{PMP} em CMix e CBra quando comparado a VNat, sendo os dois primeiros semelhantes ($p > 0,05$). Não foram encontradas diferenças ($p > 0,05$) entre as situações de estudo nas profundidades 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m para θ_{PMP} . Somente em 0,10-0,30 m, no caso de θ_{CC} , foi observado um comportamento distinto, em que CBra foi superior ($p < 0,05$) somente a VNat. Nas comparações entre profundidades, não foram observadas diferenças ($p > 0,05$) para a maioria das situações, tanto para θ_{CC} quanto θ_{PMP} , sendo que somente em CBra as profundidades 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m foram superiores ($p < 0,05$) a 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, e 0,10-0,30 m foi superior ($p < 0,05$) somente a 0,60-1,00 m em VNat.

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) pelo modelo de van Genuchten e umidade ($m^3 m^{-3}$) na tensão matricial de 10 kPa (θ_{CC}) e 1500 kPa (θ_{PMP}) em Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, João Pinheiro - MG

Sistema de cultivo	Parâmetros				Umidade ($m^3 m^{-3}$)	
	θ_s	θ_r	α	n	θ_{CC}	θ_{PMP}
0,0-0,10 m						
CMix	0,53 bA	0,16 aA	0,08 bA	1,39 aA	0,36 aA	0,20 aA
CBra	0,46 cA	0,15 aAB	0,04 bA	1,48 aAB	0,39 aA	0,21 aA
VNat	0,66 aA	0,17 aA	0,45 aA	1,35 aA	0,30 bAB	0,20 aA
0,10-0,30 m						
CMix	0,47 aA	0,16 aA	0,06 aA	1,50 aA	0,34 abA	0,22 aA
CBra	0,45 aA	0,15 aB	0,14 aA	1,32 bB	0,36 aA	0,22 aA
VNat	0,49 aB	0,15 aA	0,09 aC	1,46 abA	0,32 bA	0,19 bA
0,30-0,60 m						
CMix	0,49 bA	0,18 aA	0,03 bA	1,71 aA	0,36 aA	0,21 aA
CBra	0,51 bA	0,17 abAB	0,12 bA	1,48 bAB	0,31 bB	0,21 aA
VNat	0,69 aA	0,16 bA	0,33 aB	1,50 bA	0,29 bAB	0,19 aA
0,60-1,00 m						
CMix	0,43 cA	0,18 aA	0,05 bA	1,57 aA	0,34 aA	0,23 aA
CBra	0,50 bA	0,18 aA	0,06 bA	1,59 aA	0,30 bB	0,20 bA
VNat	0,68 aA	0,17 aA	0,24 aB	1,54 aA	0,28 bB	0,18 bA

Obs.: θ_s é a umidade de saturação (m^3/m^3); θ_r é a umidade residual (m^3/m^3); α (m^{-1}) e n (adimensional) são parâmetros empíricos de ajuste do modelo de van Genuchten. Foi adotada a relação $m=1-1/n$. Letras minúsculas

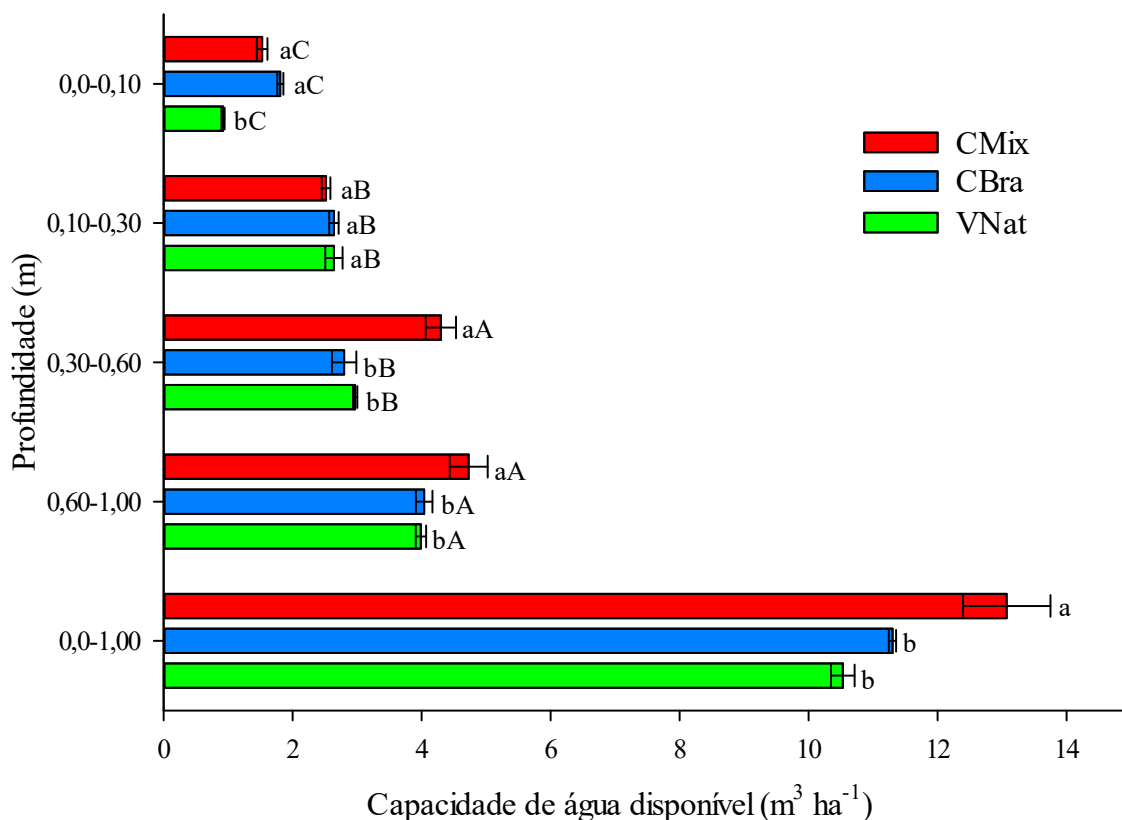
comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comportamento comum foi observado para a CAD, em que CMix apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores quando comparado a CBra e VNat em 0,30-0,60 (4,3; 2,8 e 2,9 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, respectivamente) e 0,60-1,00 m (4,7; 4,0 e 4,0 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, respectivamente) e no somatório de 0,0-1,00 m (13,1; 11,3 e 10,5 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, respectivamente), sendo CBra e VNat semelhantes ($p > 0,05$). Em 0,10-0,30 m ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 2,6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$) não houve diferença ($p > 0,05$) entre as situações de estudo, e em 0,0-0,10 m CMix e CBra (1,5 e 1,8 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, respectivamente) apresentaram maiores valores de CAD quando comparado a VNat (0,9 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), sendo as duas primeiras similares ($p > 0,05$) entre si.

Nas comparações entre profundidades foi observado um comportamento comum e já esperado em CBra e VNat, em que 0,60-1,00 m foi superior ($p < 0,05$) a 0,10-0,30 e 0,30-0,60 m, e estas superiores ($p < 0,05$) a 0,0-0,10 m e similares ($p > 0,05$) entre si. A exceção a esse comportamento se deu em CMix, com 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m semelhantes ($p > 0,05$) e superiores ($p < 0,05$) a 0,10-0,30 m, e esta última superior ($p < 0,05$) a 0,0-0,10 m (Figura 6).

Figura 6 - Capacidade de água disponível (CAD) do solo em Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60; 0,60-1,00 e 0,0-1,00 m, João Pinheiro – MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

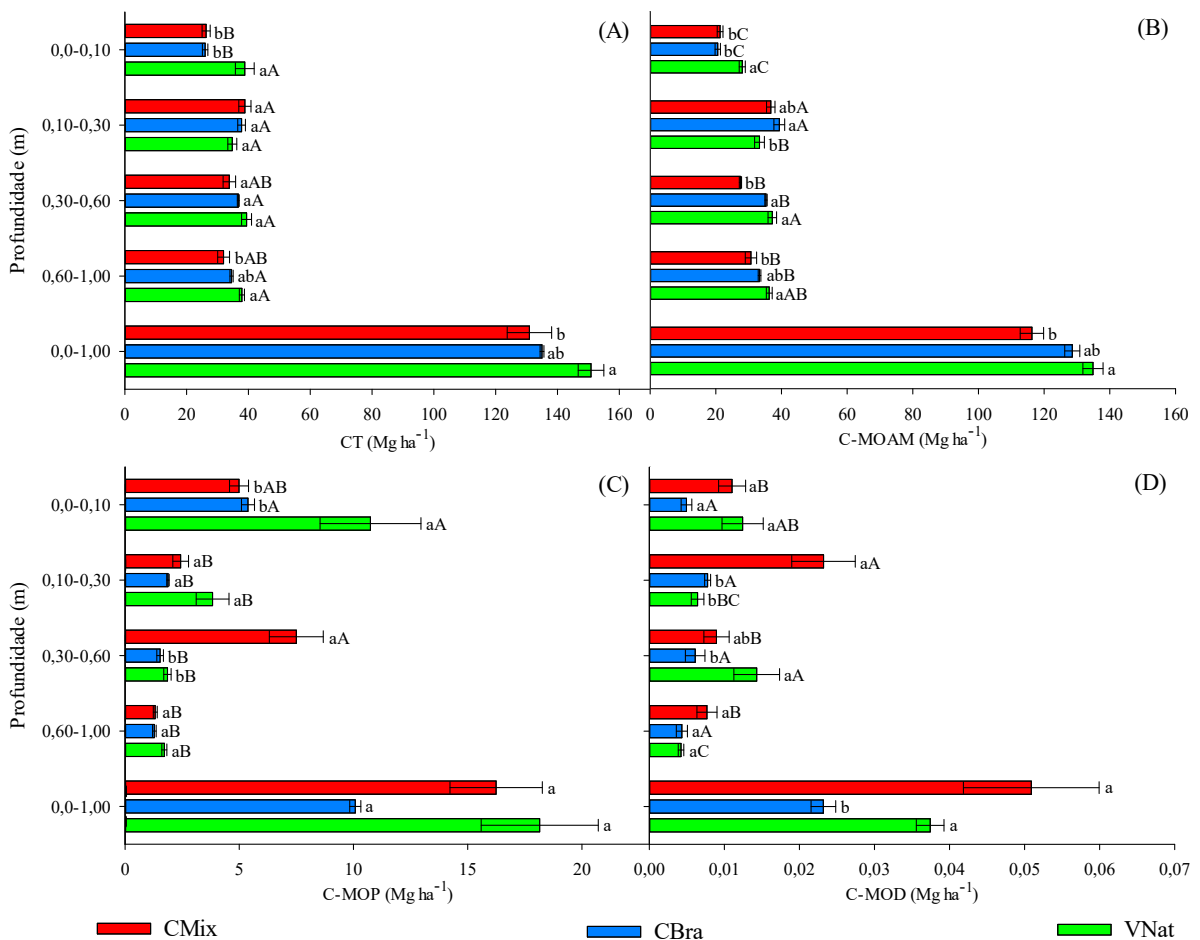
3.4. Estoques de C e N totais e nas frações da MOS

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados das comparações entre estoques de C e N totais e das frações físicas da matéria orgânica do solo das situações de estudo nas profundidades avaliadas, assim como o somatório dos estoques de 0,0-1,00 m.

Os maiores estoques totais de C e N (CT e NT) e da MOAM (C-MOAM e N-MOAM) foram observados em VNat (150,8 e 8,0; 134,9 e 7,0 Mg ha⁻¹, respectivamente) quando considerada a camada de 0,0-1,00 m. Entre os sistemas de cultivo, CMix e CBra, constatou-se os menores ($p < 0,05$) valores destas mesmas variáveis (CT, NT, C-MOAM e N-MOAM) para CMix (130,9 e 6,6; 116,7 e 5,7 Mg ha⁻¹, respectivamente). Contudo, em CBra (134,9 e 7,1; 128,6 e 6,4 Mg ha⁻¹, respectivamente) observou-se valores semelhantes ($p > 0,05$) a CMix para algumas variáveis (CT, NT e C-MOAM), sendo inclusive semelhante a VNat ($p > 0,05$), como N-MOAM ($p > 0,05$), também superior a CMix. Quanto a C-MOP e N-MOP ($\bar{X}_{Gerais} = 15,5$ e 0,8 Mg ha⁻¹, respectivamente) não foram observadas diferenças entre as situações estudadas ($p > 0,05$). Já para C-MOD e N-MOD, constatou-se que VNat (0,037 e 0,093 Mg ha⁻¹, respectivamente) nem sempre apresentou maiores ($p < 0,05$) valores, podendo ter sido

semelhantes ($p>0,05$) a CMix (0,051 e 0,135 Mg ha^{-1} , respectivamente), como no caso de C-MOD, ou menores ($p<0,05$), como em N-MOD, comparativamente a CBra e CMix. CBra (0,023 e 0,170 Mg ha^{-1} , respectivamente) apresentou comportamento distinto para C-MOD e N-MOD, no primeiro caso com os menores valores, enquanto no segundo foram maiores ($p<0,05$).

Figura 7 - Estoques médios de C total (CT) (A), da matéria orgânica associada a minerais (C-MOAM) (B), da matéria orgânica particulada (C-MOP) (C) e da matéria orgânica dissolvida (C-MOD) (D) em Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60; 0,60-1,00 e 0,0-1,00 m, João Pinheiro - MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os maiores ($p<0,05$) estoques de VNat em 0,0-1,00 m, observados para a maioria das situações estudadas, também foram observados em 0,0-0,10 m, especialmente quanto a CT, NT, C-MOAM, N-MOAM e C-MOP (38,8; 2,4; 28,1; 1,8 e 10,7 Mg ha^{-1} , respectivamente), sendo

os demais ($\bar{X}_{Gerais} = 26,1; 1,85; 20,9; 1,5$ e $5,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) semelhantes ($p > 0,05$). Quanto a N-MOP e C-MOD não foram observadas diferenças estatísticas entre os sistemas de manejo ($\bar{X}_{Gerais} = 0,35$ e $0,09 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) enquanto as N-MOD, as diferenças ($p < 0,05$) ocorreram, sendo que CBra ($0,103 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentou os maiores estoques frente a CMix e VNat ($0,062$ e $0,059 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente).

Para 0,10-0,30 m observou-se a não existência de diferenças ($p > 0,05$) entre os estoques nos sistemas de manejo para CT, NT, N-MOAM, C-MOP e N-MOP ($\bar{X}_{Gerais} = 36,5; 2,11; 1,93; 2,61$ e $0,11 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). No caso de C-MOAM, comparativamente a VNat ($33,3 \text{ Mg ha}^{-1}$), constatou-se os maiores ($p < 0,05$) estoques para CBra ($39,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) e CMix ($36,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo estes similares ($p > 0,05$) entre si. Já para C-MOD e N-MOD, CMix ($0,023$ e $0,054 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) se sobressaiu, apresentando os maiores ($p > 0,05$) estoques quando comparado a CBra ($0,008$ e $0,008 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) e VNat ($0,006$ e $0,006 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente).

A camada de 0,30-0,60 m apresentou comportamentos distintos quanto às variáveis estudadas. Os maiores estoques ($p < 0,05$) de VNat em 0,30-0,60 m somente foram observados para C-MOD e NT ($0,014$ e $1,91 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente), não tendo sido observadas diferenças significativas para CT e N-MOD ($\bar{X}_{Gerais} = 36,5$ e $0,011 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). Quanto às demais variáveis, C-MOAM e N-MOAM apresentaram os menores ($p < 0,05$) estoques em CMix ($27,5$ e $1,19 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente), sendo, VNat ($37,2$ e $1,76 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) e CBra ($35,2$ e $1,61 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) superiores e similares ($p > 0,05$) entre si. Contrariamente ao comportamento observado até então nessa profundidade, os estoques de C-MOP e N-MOP foram maiores ($p < 0,05$) em CMix ($7,5$ e $0,37 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente), comparativamente às outras situações de estudo ($\bar{X}_{Gerais} = 1,65$ e $0,108 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente).

De maneira geral, não foram observadas diferenças ($p > 0,05$) entre as situações estudadas na profundidade de 0,60-1,00 m. As exceções observadas ocorreram para os estoques de CT e C-MOAM, com os maiores ($p < 0,05$) estoques encontrados em VNat ($37,9$ e $36,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente), intermediários em CBra ($34,5$ e $33,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). CT e C-MOAM apresentaram estoques semelhantes ($p > 0,05$) em CBra e CMix, sendo que CMix ($31,9$ e $30,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) apresentou os menores estoques.

Nas comparações entre profundidades, deve-se destacar os maiores ($p < 0,05$) valores de estoques em 0,10-0,30 m para CT e NT e C-MOAM e N-MOAM nas três situações estudadas (CMix, CBra e VNat), comparativamente a 0,0-0,10 m e aquelas profundidades maiores que 0,30 m, as quais foram semelhantes ($p > 0,05$) entre si (0,30-0,60 m e 0,60-1,00 m) para grande

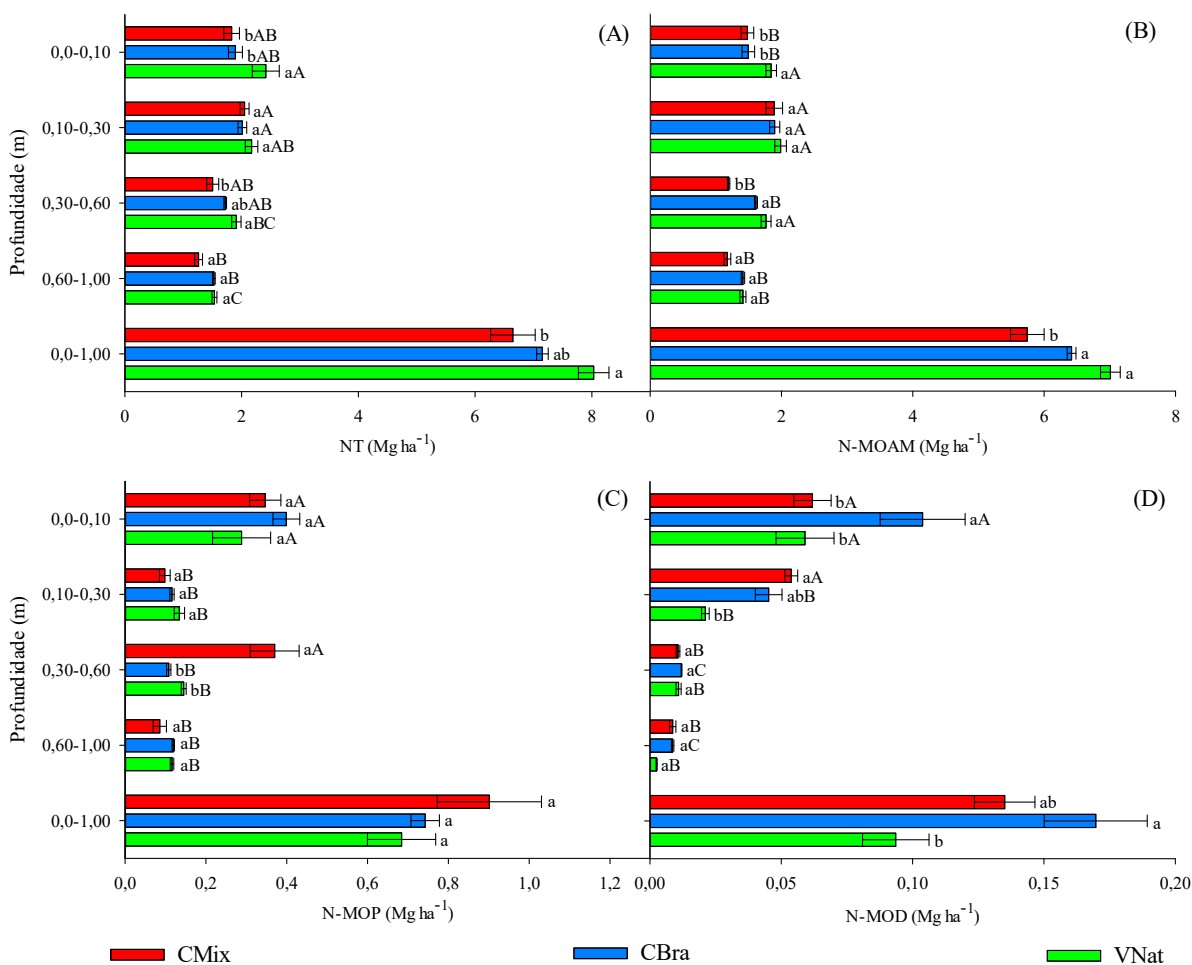
parte das situações. Em todas as situações de estudo, 0,60-1,00 m apresentou os menores estoques de NT.

Observou-se comportamento distinto do observado anteriormente somente em VNat, quando CT foi semelhante ($p > 0,05$) entre todas as profundidades avaliadas, C-MOAM foi maior em 0,30-0,60 m e NT maior em 0,0-0,10 m ($0,0-0,10 \geq 0,10-0,30 \geq 0,30-0,60 \geq 0,60-1,00$ m). N-MOAM apresentou os menores estoques em 0,60-1,00 m, quando as demais profundidades foram semelhantes ($p > 0,05$) entre si.

Quanto a C-MOP e N-MOP, constatou-se os maiores ($p < 0,05$) estoques em 0,0-0,10 m para CBra e VNat, sendo as demais profundidades semelhantes entre si. Já em CMix, este mesmo comportamento não se repete tanto para C-MOP e N-MOP. No primeiro caso, C-MOP apresentou os maiores estoques em 0,10-0,30 m em comparação a 0,0-0,10 m e 0,30-0,60 m, todos superiores a 0,60-1,00 m. Com N-MOP por outro lado, CMix apresenta os maiores estoques em 0,0-0,10 m e 0,30-0,60 m, sendo esses superiores a 0,10-0,30 m e 0,60-1,00 m.

A matéria orgânica dissolvida (MOD) é a fração da MOS que possui comportamento mais variável, não só em termos de faixas de variação, mas também entre situações de estudo. Não se consegue observar um comportamento comum a todas as estas situações. Em C-MOD, observou-se em CMix a ordem de valores de estoques é $0,10-0,30 > 0,0-0,10 = 0,30-0,60 = 0,60-1,00$ m ($p < 0,05$). CBra não apresentou diferenças entre profundidades ($p > 0,05$) e VNat apresentou os maiores estoques em 0,30-0,60 m, sendo os menores ($p < 0,05$) em 0,60-1,00 m, com as demais profundidades com valores intermediários, as vezes similares, superiores ou inferiores. Quanto a N-MOD observou-se os maiores ($p < 0,05$) estoques nas duas primeiras profundidades (0,0-0,10 m 0,10-0,30 m), especialmente na primeira (0,0-0,10 m) em CBra e VNat, sendo que em CMix os maiores valores acontecem nas duas primeiras (similares entre si, $p > 0,05$), comparativamente às demais. Os menores estoques ocorrem nas duas últimas profundidades também similares ($p < 0,05$) entre si para todas as situações.

Figura 8 - Estoques médios de N total (NT) (A), da matéria orgânica associada a minerais (N-MOAM) (B), da matéria orgânica particulada (N-MOP) (C) e da matéria orgânica dissolvida (N-MOD) (D) em Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60; 0,60-1,00 e 0,0-1,00 m, João Pinheiro - MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5. Atividade de enzimas do solo

A figura 9 apresenta os resultados das comparações entre as atividades de enzimas do solo das situações de estudo, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m.

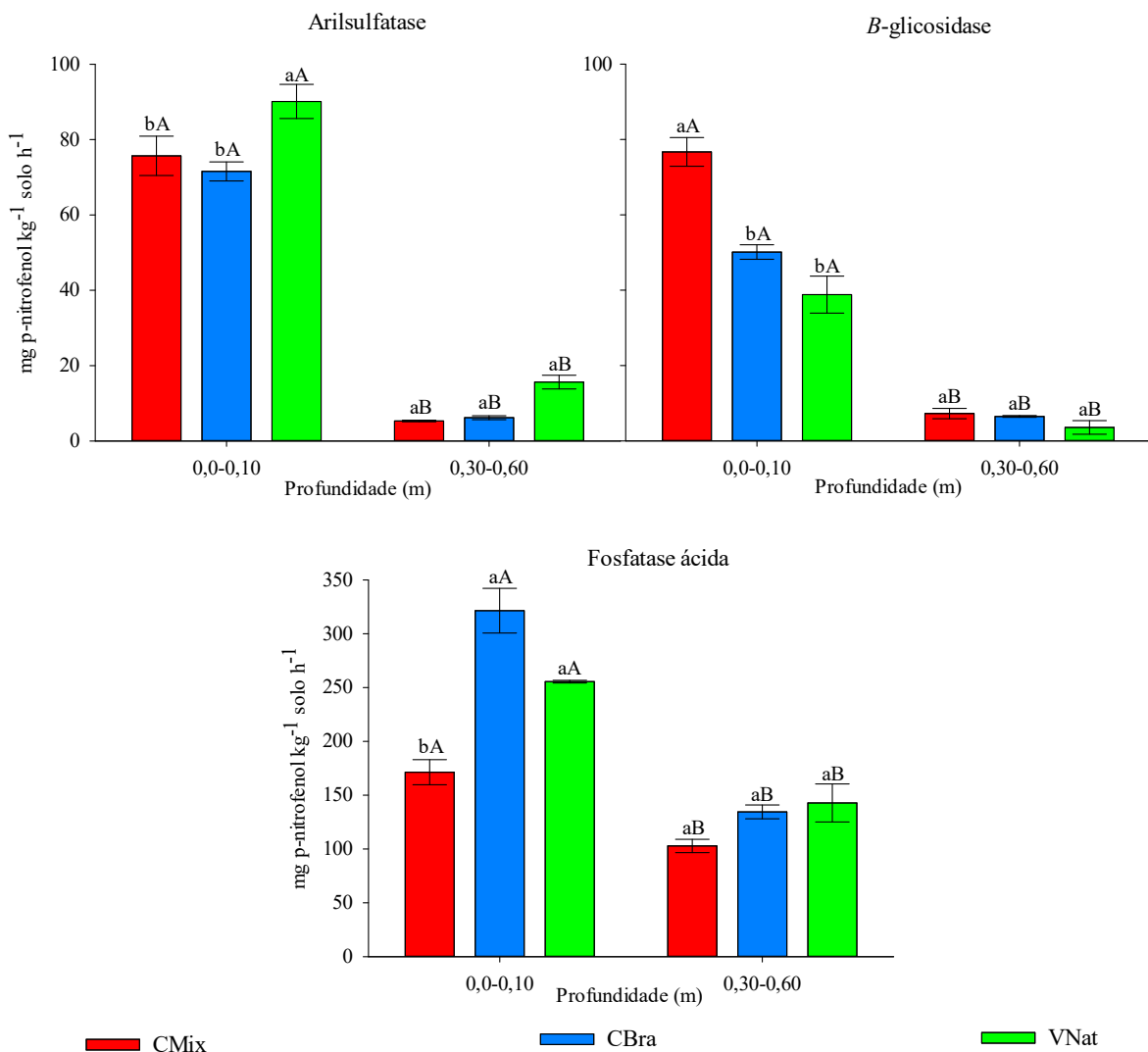
Na profundidade 0,0-0,10 m observou-se as maiores ($p < 0,05$) atividades da arilsulfatase em VNat ($90,1 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), quando comparado a CMix ($75,7 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e CBra ($71,5 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), sendo as últimas semelhantes entre si ($p > 0,05$). Entretanto, para β -glicosidase foi constatado outro comportamento, onde os maiores valores ($p < 0,05$) foram observados em CMix ($76,7 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), comparativamente a CBra ($50,1 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e VNat ($38,8 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), que foram similares ($p > 0,05$) entre si. A atividade da fosfatase ácida teve um comportamento distinto das outras duas enzimas, onde em CBra ($321,4 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e VNat ($255,5 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) foram observados valores similares

($p > 0,05$) de atividade enzimática, ambos superiores ($p < 0,05$) a CMix (171,4 mg *p*-nitrofenol $\text{kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$).

Diferentemente de 0-0-0,10 m, na camada de 0,30-0,60 m os sistemas de uso apresentaram o mesmo comportamento quanto a atividade da arilsulfatase ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 10,5 \text{ mg } p\text{-nitrofenol } \text{kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), β -glicosidase ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 5,6 \text{ mg } p\text{-nitrofenol } \text{kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e fosfatase ácida ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 128,2 \text{ mg } p\text{-nitrofenol } \text{kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), ou seja, não houveram diferenças ($p > 0,05$) entre as situações estudadas.

Nas comparações entre as duas profundidades avaliadas observou-se que a arilsulfatase, β -glicosidase e mesmo a fosfatase ácida, apresentaram atividades maiores ($p < 0,05$) na primeira profundidade (0,0-0,10 m) quando comparado a segunda (0,30-0,60 m).

Figura 9 - Atividades médias de arilsulfatase, β -glicosidase e fosfatase ácida em Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix) e braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m, João Pinheiro – MG



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6. Análise de componentes principais (PCA)

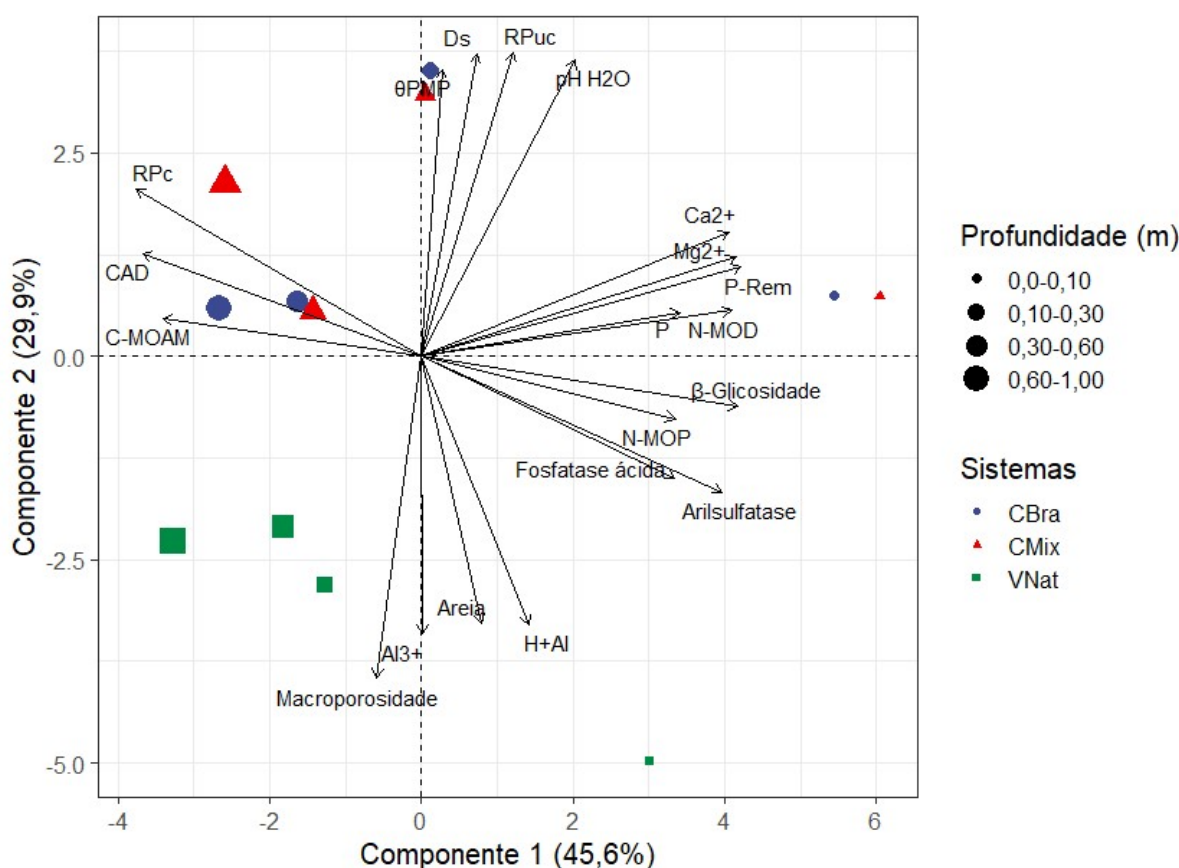
Inicialmente, foram utilizadas as seguintes variáveis para compor a análise de componentes principais (PCA), nas diferentes situações de estudo e nas quatro profundidades avaliadas: areia, argila, argila dispersa em água (ADA), densidade de partículas (Dp), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência à penetração em campo (RP_c), resistência à penetração com umidade corrigida a 10 kPa (RP_{uc}), condutividade hidráulica com solo saturado (CH), umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), capacidade de água disponível (CAD), pH H₂O, fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), acidez potencial (H+Al), fósforo remanescente (P-Rem), carbono total (CT), carbono da matéria orgânica particulada (C-MOP), carbono da matéria orgânica associada a minerais (C-MOAM), carbono da matéria orgânica dissolvida (C-MOD), nitrogênio total (NT), nitrogênio da matéria orgânica particulada (N-MOP), nitrogênio da matéria orgânica associada a minerais (N-MOAM), nitrogênio da matéria orgânica dissolvida (N-MOD), arilsulfatase, β -Glicosidade e fosfatase ácida.

Foram excluídas, sucessivamente, as variáveis que não atingiram autovetores iguais ou superiores a 0,7 ($r \geq 0,7$). A partir disso, os componentes 1 (CP1) e 2 (CP2), explicaram 75,5% da variância total dos dados, em que o CP1 explica 45,6% e o CP2 comporta 29,9% da variância (Figura 10). As variáveis químicas Ca²⁺ ($r = 0,90$), Mg²⁺ ($r = 0,92$), P-Rem ($r = 0,94$) e P ($r = 0,76$) se correlacionaram positivamente com N-MOD ($r = 0,91$) e N-MOP ($r = 0,75$) e as três variáveis biológicas (arilsulfatase, $r = 0,88$; β -glicosidade, $r = 0,93$; fosfatase ácida, $r = 0,74$) e exerceram maior influência em CBra e CMix, correlacionadas positivamente com o CP1. Já as variáveis RP_c ($r = -0,83$), CAD ($r = -0,82$) e C-MOAM ($r = -0,76$) apresentaram forte correlação negativa com N-MOP e as variáveis biológicas, dentro do CP1. O CP2 explica uma menor variância dos dados, onde a Ma ($r = -0,88$), Al³⁺ ($r = -0,76$), areia ($r = -0,73$) e H+Al ($r = -0,74$) se correlacionam negativamente com a Ds ($r = 0,83$), RP_{uc} ($r = 0,83$), θ_{PMP} ($r = 0,79$) e pH H₂O ($r = 0,81$).

Nas quatro profundidades avaliadas, observou-se que as variáveis químicas e N-MOD agruparam a primeira profundidade dos sistemas CMix e CBra, presentes no CP1. A segunda profundidade de CMix e CBra estiveram relacionadas com o CP2, principalmente nas variáveis Ds e θ_{PMP} . As duas últimas profundidades tiveram sua variância explicada por RP_c, CAD e C-

MOAM e tiveram relação com o CP1, agrupando CBra e CMix. A primeira camada em VNat teve sua variância relacionada com as variáveis areia e H+Al, enquanto que as outras profundidades foram agrupadas pela Ma. As variáveis com menor contribuição para a variação dos dados foram P, N-MOP, C-MOAM, Al^{3+} e areia.

Figura 10 - Dispersão gráfica de variáveis físicas (RP_c , RP_{uc} , Ds, CAD, Ma e θ_{PMP}), químicas (C-MOAM, N-MOP, N-MOD, pH H₂O, H+Al, Ca^{2+} , Mg^{2+} , P-Rem e P) e biológicas (arilsulfatase, β -glicosidade e fosfatase ácida) em Latossolo Vermelho cultivado com café utilizando plantas de cobertura diversas (CMix), braquiária nas entrelinhas (CBra) e área de vegetação natural (VNat), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, João Pinheiro - MG



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. DISCUSSÃO

4.1. Atributos físicos

Atributos físicos do solo são bons preditores sobre sua qualidade. Mas há uma vasta gama de atributos, e relacioná-los com a agricultura e diferentes usos do solo é uma atividade complexa, que geralmente requer o uso de metodologias estatísticas adequadas. Os atributos relacionados ao arranjo estrutural das partículas sólidas, de forma direta (Ds, Ma, Mi, PT) ou

indireta (RP), ao movimento de água (CH) e armazenamento (CAD) no perfil do solo podem identificar camadas restritivas ao desenvolvimento do café (EFFGEN et al., 2012), além de demonstrar problemas relacionados a camadas compactadas no solo (LIMA et al., 2013).

De maneira geral, esses atributos confluem para um comportamento comum, em que determinada camada apresenta valores de Ds maiores, enquanto que apresenta valores de CH, Ma e PT menores, além de apresentar maiores valores de RP. Tais comportamentos foram observados nas áreas de CBra e CMix, que serão apresentados abaixo. Cabe destacar a importância de se manter o solo coberto para evitar que o impacto das gotas de chuva inicie pontos de erosão hídrica (CARDOSO et al. 2012), demonstrando a importância da mudança de manejo das entrelinhas nas áreas cultivadas com café do presente estudo.

A densidade do solo (Ds) (Figura 2) apresentou um comportamento comum e já esperado, em que os valores da área de VNat foram menores que as áreas cultivadas (CBra e CMix) em quase todas as profundidades, e os sistemas manejados com café não apresentaram diferenças estatísticas entre o uso de braquiária nas entrelinhas e a mistura de plantas de cobertura. Isso acontece, pois, a área de vegetação natural não recebe manejo intenso e trânsito de máquinas agrícolas, servindo como um bom indicador de qualidade e referência de como eram as condições físicas anteriores dos solos cultivados em área próxima (ARAÚJO et al., 2007). Os valores de Ds observados nas primeiras camadas das áreas de cultivo com café (acima de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$) são superiores aos observados em outros trabalhos, como em Rocha et al. (2014), com valores abaixo de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$. As maiores cargas de pressão oriundas de operações mecanizadas (JORGE et al., 2012) são a principal razão os maiores valores de Ds, especialmente no período chuvoso quando o solo está úmido, quando as forças de adesão e coesão podem ser mínimas, o que não acontece no período seco. Outro efeito constatado por Marchão et al. (2007) é o de maiores valores de Ds nas primeiras camadas quando se faz o uso de braquiária sob plantio direto, estando relacionado às pressões proporcionadas pelo trânsito de máquinas e o manejo. Isso é observado na área de CBra, que apresentou resultados de Ds maiores na camada 0,10-0,30 m quando comparado com a última (0,60-1,00 m), comportamento que não foi observado em CMix e VNat. O fato de não haver diferenças de densidade do solo entre camadas para CMix pode estar relacionado à contribuição das raízes de diferentes espécies, formando uma malha mais resistente às pressões exercidas pelo trânsito de máquinas (RODRIGUES et al., 2012), além de um maior afrouxamento superficial do solo pelo preparo recente realizado na implantação das plantas de cobertura.

Com relação a CH, foram observados valores considerados moderadamente lentos ($5 \text{ a } 20 \text{ mm h}^{-1}$) na segunda profundidade para CBra (Figura 3), conforme a classificação de Freire

et al. (2003). Também foram observados valores moderados de CH (20 a 62,5 mm h⁻¹) na primeira camada para essa mesma área, fazendo com que se distinguísse das outras áreas, principalmente quando comparado a CMix, que apresentou valores moderadamente rápidos (62,5 a 125 mm h⁻¹) em 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m e rápidos (125 a 250 mm h⁻¹) em 0,10-0,30 e 0,60-1,00 m. VNat apresentou valores de CH rápidos e muito rápidos (acima de 250 mm h⁻¹), como esperado. Nota-se que há uma restrição de CH na primeira e segunda profundidade em CBra, caracterizando uma compactação nestas camadas. Essas diferenças entre as camadas, com menores valores de CH nas primeiras demonstram que as pressões do trânsito de máquinas influenciam mais tais camadas, mesmo com a formação dos bioporos pelo sistema radicular da braquiária. Essas camadas compactadas favorecem o escoamento superficial e podem facilitar o início de erosão laminar, principalmente em áreas de maior declividade (JORGE et al., 2012). Nas áreas de estudo em questão, esse efeito da compactação leva a uma diminuição da infiltração de água superficialmente nas entrelinhas, que escoam e certamente infiltra nas linhas do cafeeiro, que pode mitigar os efeitos degenerativos a curto e médio prazo, mas que deve ser monitorado.

Os valores de Ma, Mi e PT (Figura 4) demonstram um comportamento relacionado com os valores de CH, em que VNat apresentou os maiores valores de Ma em todas as camadas avaliadas. CBra apresentou os menores valores de Ma na camada 0,10-0,30 m (0,06 m³ m⁻³), se relacionando aos menores valores de CH e maiores valores de Ds nessa camada, confirmando que há uma camada compactada (PAGLIAI et al., 2004). Stepniewski et al. (2002) citam que uma boa aeração no solo corresponde a um volume de macroporos de 0,25 m³ m⁻³, uma troca gasosa limitada entre 0,10 e 0,25 m³ m⁻³, e uma aeração deficiente abaixo de 0,10 m³ m⁻³. Esses valores demonstram que a área de CMix apresentou em todas as camadas valores de trocas gasosas limitadas, mas que não se apresentaram deficientes, como o observado apenas na camada de 0,10-0,30 m em CBra. Essa camada com trocas gasosas limitadas tem influência no crescimento de raízes, diminuindo a quantidade de raízes nessa camada e também a atividade de microrganismos (CHAMEN et al., 2015). CMix apresentou maiores valores de Mi (0,41 m³ m⁻³), principalmente na primeira profundidade, provavelmente associada à diminuição da Ma nesta camada, que sofre o primeiro impacto das pressões oriundas do trânsito de máquinas, mas que não influenciou nos valores de PT. Os valores de PT foram maiores em VNat em todas as camadas, mostrando a importância da contribuição da Ma no somatório dessa variável. Nota-se que na segunda camada, CMix e CBra não diferiram (p<0,05) nos valores de PT, e que, em 0,60-1,00 m, CBra (0,52 m³ m⁻³) apresentou valores maiores que CMix (0,45 m³ m⁻³), podendo demonstrar a contribuição das raízes da braquiária com maior tempo de implantação quando

comparado a outras plantas de cobertura. Apesar de não haver diferenças para PT na segunda profundidade, CMix apresentou maiores valores de Ma e menores de Mi que CBra, demonstrando que a relação inversamente proporcional entre Ma e Mi (RODRIGUES et al., 2011) nem sempre reflete em diferenças na PT, sendo mais importante a distribuição do tamanho de poros na avaliação da qualidade da estrutura do solo (BONINI et al., 2017).

Os valores de RP (Figura 5) seguiram o mesmo comportamento apresentado nos outros atributos físicos, em que VNat apresentou os menores valores em ambas variáveis (RP_c e RP_{uc}). Os valores de umidade do solo não influenciaram os valores de RP_c quando comparados os sistemas de uso em cada profundidade (Figura 5 - C). Mas, como demonstrado no coeficiente de correlação de Pearson, a RP_c sofre influência da umidade do solo, apresentando alta correlação negativa com a mesma (SILVEIRA et al., 2010). Apesar de um pouco superior em CMix quando comparado a CBra, os valores de RP_c não ultrapassaram 2,5 MPa, sendo esse valor considerado como não limitante ao crescimento radicular, segundo alguns autores (TAYLOR et al., 1966; CANARACHE, 1991; MEROTO; MUNDSTOCK, 1999), ainda mais quando considerados os valores de RP_{uc} , que não ultrapassaram os valores de 1,59 MPa, como observado na profundidade 0,10-0,30 m em CMix. Valores limitantes de resistência mecânica do solo à penetração são pautados por incertezas, principalmente pela heterogeneidade de tipos de sistemas radiculares, e pela necessidade de relacionar com a presença de bioporos no solo, que se mostra de suma importância para o crescimento de raízes em solos compactados (REICHERT et al., 2007).

A equação de van Genuchten se mostra satisfatória na estimativa da curva de retenção de água (CRA) para a grande maioria dos solos (SHARMA et al., 2006). No trabalho desenvolvido, visando evitar erros na determinação da macroporosidade e porosidade total, decidiu-se por determinar apenas os valores de microporosidade a partir do modelo de van Genuchten (1980), pois este mostra-se instável numericamente nas faixas de tensão matricial muito baixas (SCHAAP; VAN GENUCHTEN, 2005). Os valores de umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) se foram imprescindíveis para a determinação da água disponível para as plantas em cada profundidade e até 1,00 m, sendo possível determinar a capacidade de água disponível (CAD) para cada sistema de uso. A CAD (Figura 6) representa todo o volume de água disponível às culturas a uma dada camada (BARRETO et al., 2011), e é uma ferramenta necessária no manejo de água do solo em agricultura irrigada (SOUZA; REICHARDT, 1996), podendo ser influenciada e aumentada com o aumento da densidade, principalmente quando se tratam de solos com textura argilosa e forte agregação, como encontrado nos Latossolos dessa região. Tal condição demonstra que,

até certo ponto, o aumento da densidade nesse tipo de solo é benéfico no sentido de aumentar os microporos e favorecer o armazenamento de água para as plantas, mas, pode estar relacionado à diminuição da Ma e PT, como observado por Souza et al. (2014). O manejo com plantas de cobertura diversas (mix), apesar de ter o mesmo trânsito de máquinas que em CBra, apresentou maiores valores de CAD até 1,00 m de profundidade, podendo estar relacionado a maior densidade na camada 0,60-1,00 m (de maior espessura) e menores valores de PT nas duas últimas camadas (0,30-0,60 e 0,60-1,00 m). Esses resultados favorecem a tomada de decisão para o manejo da irrigação das áreas, podendo-se economizar água e energia, além de aumentar a produtividade do café (BONOMO et al., 2013). Tal resultado é de grande valia para o manejo da irrigação, já que com uma maior quantidade de água no perfil do solo, estando esta disponível para as plantas, o manejo da irrigação pode ser otimizado e diferente para cada talhão, podendo-se diminuir a lâmina de irrigação ou o turno de rega da área de CMix em comparação a CBra.

De acordo com a hipótese levantada neste trabalho, o uso de braquiária e mix de plantas de cobertura atendem os objetivos de melhoria nos atributos físicos, sendo necessário um certo cuidado com problemas de compactação oriundos do tráfego de máquinas agrícolas em momentos de maior umidade do solo. Em CBra há uma camada compactada (0,10-0,30 m) que refletiu na piora substancial dos valores de Ma e CH. Mas, em profundidades maiores (0,30-1,00 m) há benefícios no uso das plantas de cobertura, com foco na maior contribuição da braquiária para a Ma. O sistema de uso de mix de plantas de cobertura (CMix) apresentou uma maior estabilidade nos atributos físicos, mas carece de um maior tempo de permanência para demonstrar todos os benefícios desse tipo de manejo. O sistema cultivado com mistura de plantas de cobertura apresentou maiores valores de CAD quando comparado aos outros sistemas, demonstrando que os Latossolos, como o utilizado no presente estudo, podem ser favorecidos com maior armazenamento de água, se apresentarem densidades um pouco maiores que a condição natural.

4.2. Estoques de C e N nas frações da MOS

Sistemas agrícolas geralmente apresentam estoques de C e N menores que em área de vegetação natural, fato decorrente da conversão dessas áreas em cultivos (MENEZES et al., 2021) e perdas dos estoques por longo prazo até a estabilidade do sistema (MEDEIROS; SANTOS; MAIA, 2022). Sistemas conservacionistas apresentam-se como uma boa opção de aumento nos estoques de C e N em áreas de cultivo intenso, especialmente em camadas superficiais (SÁNCHEZ-NAVARRO et al., 2019). O presente estudo fornece bons resultados acerca da possibilidade de uso da braquiária visando o aumento dos estoques de C e N, atingindo

valores de estoques estatisticamente iguais à área de VNat de 0,0-1,00 m na fração de maior contribuição (C-MOAM e N-MOAM), assim como para os estoques totais (CT e NT). A fração com comportamento distinto do anterior não mostrou diferenças estatísticas nos estoques, como C-MOP e N-MOP. A MOD apresentou comportamento diferenciado para C e N, onde o C-MOD foi superior em CMix quando comparado a CBra, podendo estar relacionado ao uso de diferentes espécies como adubação verde nessa área, incluindo plantas leguminosas (ZHAO et al., 2018). Tal fato não aconteceu para N-MOD, em que os estoques não se diferiram (Figuras 7 e 8).

Os maiores estoques de N-MOD em CBra quando comparado aos outros sistemas na camada de 0,0-0,10 m (Figura 8) pode estar associado a uma maior disponibilidade de N superficialmente oriundo de fertilizante nitrogenado aplicado na linha e entrelinha, além de maior ciclagem desse nutriente nessa camada (SÁ et al., 2001). Essa disponibilidade também está demonstrada na camada de 0,10-0,30 m, que apresentou os maiores valores de estoques nas áreas cultivadas com café. Na mesma camada, para C-MOD, é observado que os maiores estoques aparecem em CMix, ressaltando a influência das diferentes espécies em mix na formação da MOD (BARTOS; SZYMAŃSKI; KLIMEK, 2020), e os estoques nessa profundidade sendo associados a maior abundância de exsudados radiculares e fixação de N (YE et al., 2020).

Embora a vegetação natural (VNat) apresente maiores estoques somados de CT e NT que os sistemas agrícolas nas camadas superficiais do solo (0,0-0,30 m), o sistema CBra apresentou maiores estoques de C-MOAM que VNat em 0,10-0,30 m (Figura 7). O sistema radicular da braquiária nessa profundidade é abundante e corresponde a grande atividade (LIU; MA; BOMKE, 2005), o que resulta em liberação de rizodepósitos que ocasionam na formação de C-MOAM nesta camada, apesar da taxa de mineralização do C no subsolo ser lenta (BALESDENT et al., 2018).

Apesar de apresentar os menores estoques de C-MOAM e N-MOAM em 0,30-0,60 m (Figuras 7 e 8), CMix apresentou resultados inversos para C-MOP e N-MOP, sendo bem superiores ($p < 0,05$) aos encontrados em VNat e CBra. Um efeito sinérgico entre diferentes plantas de cobertura favorece um enraizamento mais profundo e com raízes mais grossas, além da existência de bioporos deixados pelas plantas de braquiária previamente dessecadas, podendo favorecer a formação da MOP nessa situação, que possui características bioquímicas que tem relação com materiais orgânicos parcialmente decompostos, como fragmentos de plantas e raízes mortas (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Essa fração geralmente possui menor tempo de permanência no solo que a MOAM, devido à ausência de proteção química,

por não se encontrar ligada aos minerais, tendo sua proteção predominantemente física por oclusão em agregados (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020).

Os menores estoques de CT e C-MOAM nas camadas mais profundas (0,60-1,00 m) observados em CMix (Figuras 7 e 8), quando comparado a VNat, demonstram possíveis limitações de crescimento radicular das plantas de cobertura em mix até essa profundidade, podendo estar associado ao curto tempo de implantação e ao fato de a braquiária existente anteriormente ter sido dessecada, e suas raízes em profundidade senescido (vide histórico de uso). Diferentemente do observado em CMix, CBra apresentou valores de CT e C-MOAM similares aos encontrados em VNat, provavelmente estando relacionados a um maior tempo de implantação da braquiária e uma possível contribuição das raízes que atingiram tal profundidade e se mantiveram ativas por mais tempo, contribuindo para o aumento dos estoques de C-MOAM, que se trata de uma fração mais estável em termos de mudanças de uso do solo (COTRUFO et al., 2015).

A hipótese de que sistemas conservacionistas usando plantas de cobertura aumentam os estoques de C e N das frações da MOS é atendida nesse estudo. As frações de maior contribuição (C-MOAM e N-MOAM) e os estoques de CT e NT apresentados em CBra são estatisticamente iguais a área de referência (VNat). Outro aspecto importante é a contribuição dos sistemas radiculares da braquiária (CBra) e culturas diversas em mix (CMix), com a primeira contribuindo superficialmente (0,10-0,30 m) nos maiores estoques de C-MOAM, e segunda contribuindo para os estoques de C-MOP e N-MOP em 0,30-0,60 m. A importância da diversidade de plantas de cobertura foi expressada pelos valores de C-MOD e N-MOD nas primeiras camadas. É necessário um maior tempo de permanência das culturas em mix para verificar a real contribuição destas para a formação da MOS em profundidade, como observado no sistema de uso com braquiária.

4.3. Atividade de enzimas do solo

Os processos de decomposição dos materiais orgânicos do solo são mediados majoritariamente por enzimas, que são produzidas principalmente por microrganismos do solo e também por alguns vegetais. Sua principal função é a despolimerização e a mineralização dos compostos orgânicos do solo, fornecendo, assim, os nutrientes oriundos do processo de decomposição aos organismos que as sintetizam (STOTT et al., 2010). Os resultados obtidos no presente estudo corroboram uma condição já esperada, ou seja, maiores atividades da enzima arilsulfatase foram observadas na área de VNat (Figura 9). Tal fato reforça que a maior atividade dessa enzima indica a maior presença de fungos no solo, uma vez que somente fungos

conseguem produzir ésteres de sulfatos, o substrato para atividade desta enzima (BANDICK; DICK, 1999). Os valores de atividade encontrados nas áreas de CMix e CBra (75,7 e 71,5 mg *p*-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente) são bem superiores aos encontrados no trabalho de Balota et al. (2010). Estes autores avaliaram a atividade da arilsulfatase em solo cultivado com diferentes espécies de leguminosas cultivadas nas entrelinhas de café arábica, encontrando valores entre 10,6 e 14,9 mg *p*-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹, refletindo os benefícios de uso da braquiária e consórcios.

A atividade da enzima β -glicosidase tem se mostrado eficaz ao indicar as mudanças no manejo do solo de forma rápida, devido a sua alta sensibilidade para identificar essas alterações. Está associada ao ciclo do C e a quantidade e qualidade da matéria orgânica influencia na sua atividade (MARTINEZ; TABATABAI, 1997; STOTT et al., 2010). Os maiores valores de atividade (Figura 9) observados em CMix, em detrimento às outras situações de estudo, reforçam isso, principalmente quando são comparados com os resultados de estoques de C-MOD nas primeiras camadas, mostrando o benefício das plantas de cobertura diversas no aporte mais rápido de C para os microrganismos.

As fosfomonoesterases, ou genericamente chamadas de fosfatases, são de grande importância para a produção de fósforo solúvel no solo a partir da hidrólise de compostos orgânicos fosfatados (TABATABAI, 1994; MARTINEZ; TABATABAI, 1997). A atividade da fosfatase ácida é maior em solos com pH até 6,5 e sua dinâmica é afetada pelo tipo de adubação e cultivo, sendo que as plantas gramíneas são as principais responsáveis por secretar essa enzima (DINKELAKER; MARSCHNER, 1992). Os resultados encontrados para a atividade dessa enzima (Figura 9) comprovam isso, em que CBra apresentou as maiores atividades, juntamente com VNat, quando comparado a CMix. O uso de braquiária nas entrelinhas do café e um maior tempo de implantação corroboram os maiores valores de atividade. Aliado a isso, na área de CMix há teores maiores de fósforo inorgânico quando comparado a CBra, provavelmente remanescentes da adubação de plantio e estabelecimento do cafeeiro (Tabela 1). A aplicação de fontes de fósforo inorgânico pode inibir a síntese de fosfomonoesterases (SPEIR; COWLING, 1991; LIMA et al., 1996; MOSCATELLI et al., 2005).

Os menores valores de atividade nas três enzimas encontrados em 0,30-0,60 m já são observados na literatura (ACOSTA-MARTINEZ et al., 2003; WANG; LU, 2006; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007), em vista que há uma diminuição da atividade biológica do solo e quantidade de microrganismos.

A hipótese que as plantas de cobertura favorecem a atividade das enzimas relacionadas aos ciclos do C, P e S em superfície e profundidade é atendida neste trabalho somente quando considerada a camada superficial. A atividade da arilsulfatase (S) não foi aumentada nas áreas com plantas de cobertura (CMix e CBra) quando comparado a área de referência (VNat), tanto em superfície, quanto em profundidade. O uso de plantas de cobertura diversas traz benefícios e aumentou a atividade da β -glicosidase (C) em superfície, mostrando o potencial de melhoria da qualidade e quantidade de MOS com esse tipo de manejo, apesar do pouco tempo de permanência no sistema. Os resultados da fosfatase ácida (P) podem ter sido influenciados pelo uso de fontes inorgânicas de fósforo como adubo, não sendo possível afirmar se o manejo com culturas diversas favorece a atividade dessa enzima. Mas, nota-se que é favorável o uso de braquiária nas entrelinhas visando o aumento da atividade desta enzima, que se assemelhou a área de vegetação natural.

4.4. Análise de componentes principais (PCA)

Métodos estatísticos multivariados tem sido utilizados como uma boa forma de agrupar e explicar comportamentos envolvendo diferentes atributos e índices de qualidade do solo (SILVA et al., 2015). No presente trabalho, em vista da dificuldade de relacionar variáveis químicas, físicas e biológicas no entendimento da contribuição das plantas de cobertura para sistemas altamente produtivos e dinâmicos, a análise de componentes principais (PCA) conseguiu compilar e sintetizar bem os principais resultados (Figura 10).

Percebe-se, assim como constatado nos resultados dos atributos físicos, que a Ma (muito relacionada a VNat) se correlaciona negativamente com os valores de D_s e RP_{uc} , além da θ_{PMP} (relacionada a segunda profundidade em CBra e CMix), o que é observado por outros autores também (TORRES et al., 2015). As variáveis C-MOAM, CAD e RP_c (relacionadas à segunda e terceira profundidade de CBra e CMix) mostraram estar associadas a uma maior microporosidade, mesmo que esta variável não tenha atingido um valor ($r \geq 0,7$) de autovetor. O aumento da microporosidade esteve relacionada com os maiores valores de CAD e de RP_c , e em parte com os valores de C-MOAM nas profundidades 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, apesar desta (C-MOAM) ter sido uma variável que contribuiu pouco para a variação dos dados. O C-MOAM se correlacionou negativamente com N-MOP e a enzima β -glicosidase, o que pode ser constatado quando se observou os valores dessas últimas variáveis, sendo maiores em CMix quando comparado a CBra e VNat, e o contrário ocorrendo para C-MOAM, com esta apresentando os maiores valores em CBra e VNat em detrimento de CMix. Percebe-se que as variáveis N-MOP, N-MOD, variáveis químicas (Ca^{2+} , Mg^{2+} , P-Rem e P) e atividades

enzimáticas possuem forte correlação positiva e explicam as variações na primeira profundidade (0,0-0,10 m), devido a maior concentração de microrganismos nesta camada, e conseqüentemente, maiores atividades das enzimas avaliadas. Isso demonstra a importância do uso de plantas de cobertura com a finalidade de conservação do solo, e conseqüente, aporte de N em superfície (SÁNCHEZ-NAVARRO et al., 2019), favorecendo e tendo efeito positivo nos atributos e qualidade do solo.

5. CONCLUSÃO

As plantas de cobertura contribuíram para a melhora dos atributos físicos do solo, principalmente em maiores profundidades, demonstrando a contribuição das raízes de braquiária e de plantas de cobertura diversas. Apesar disso, o trânsito acumulado ocasionou a presença de uma camada compactada (0,10-0,30 m), se apresentando de forma mais acentuada em CBra, com aumento dos valores de Ds e diminuição dos valores de CH e Ma. Em CMix, o aumento da Ds e diminuição da PT em profundidade favoreceu um maior armazenamento e capacidade de água disponível do solo até um metro de profundidade, quando comparado às áreas de CBra e VNat.

A braquiária proporcionou valores de estoques totais de C e N similares aos encontrados na área de vegetação natural até um metro de profundidade, refletindo nos valores dos estoques da MOAM, que também foram similares à área de referência (VNat). O uso de plantas de cobertura diversas proporcionou um aumento significativo nos estoques da MOP, especialmente na camada 0,30-0,60 m, e essa diversidade também refletiu nos valores dos estoques da MOD nas primeiras profundidades.

A atividade de arilsulfatase não aumentou nos sistemas com uso de plantas de cobertura, comparativamente a área de referência. Foi constatado que as plantas de cobertura em mix aumentaram a atividade da β -glicosidase, mostrando o potencial de melhora da microbiota e qualidade da MOS com esse tipo de manejo. Os resultados da fosfatase ácida (P) foram superiores nas áreas com uso de braquiária nas entrelinhas, e podem ter sido influenciados pelo uso de fontes inorgânicas de fósforo como adubo, não sendo possível afirmar se o manejo com culturas diversas favorece a atividade dessa enzima, de acordo com os resultados do presente estudo.

Os sistemas de cultivo de café estudados apresentam características regenerativas de uso do solo, principalmente em aspectos relacionados ao aumento de matéria orgânica do solo e atividade de microrganismos, expressas pela atividade de enzimas. Em vários aspectos tais áreas se assemelharam à área de vegetação natural, mas é necessário um cuidado maior com

relação aos atributos físicos do solo, que, em sua maioria foram influenciados negativamente pelo trânsito acumulado de maquinário agrícola.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; KLOSE, S.; ZOBECK, T. M. Enzyme activities in semiarid soils under conservation reserve program, native rangeland, and cropland. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, n. 6, p. 699–707, dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200321215>
- ALCÂNTRA, E.N; FERREIRA, M.M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, ed. 24, p. 711-721, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400003>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: [10.1127/0941-2948/2013/0507](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507).
- ALVAREZ, V. H. V.; NOVAISS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, 2000.
- ALVAREZ, V. V. H.; ALVAREZ, G. A. M. Reflexões sobre a utilização de estatística para pesquisa em ciência do solo. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 28 – 35, 2013.
- ARAÚJO, A. S. F; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, p. 66-75. 2007. DOI: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6684>
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 31, p. 1099-1108, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500025>
- BALESDENT, J.; BASILE-DOELSCH, I.; CHADOEUF, J.; CORNU, S.; DERRIEN, D.; FEKIACOVA, Z.; HATTÉ, C. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 599-602, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>
- BALOTA, E. L.; CHAVES, J. C. D. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1573-1583, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500010>
- BANDICK, A.K.; DICK, R.P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology Biochemistry**, v.31, p.1471-1479, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6)
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104383, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>

- BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; FREIRE, F. G. C.; de OLIVEIRA SANTOS, W.; COSTA, F. G. B. Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do perímetro irrigado Gorutuba, em Janaúba, MG. **Revista Verde**, Mossoró, v. 6, n. 5, p. 189-192, 2011.
- BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; FONSECA, S. Atividade, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.611-619, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200016>
- BARTOS, A.; SZYMAŃSKI, W.; KLIMEK, M. Impact of conventional agriculture on the concentration and quality of water-extractable organic matter (WEOM) in the surface horizons of Retisols: A case study from the Carpathian Foothills in Poland. **Soil and Tillage Research**, v. 204, n. May, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2020.104750.
- BONINI, C. S. B.; HEINRICHS, R.; COSTA, N. R.; MEIRELLES, G. C. Estado da arte e fatores intrínsecos na física de solos no manejo de pastagens. In: Reges Heinrichs; Cecilio Viegas Soares Filho; Carolina dos Santos Batista Bonini. (Org.). Simpósio de Adubação e Manejo de Pastagens / Simpósio de Produção Animal a Pasto. 1ed.São Paulo: **Cultura Acadêmica**, 2017, v. 1, p. 58-75.
- BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; DE SOUZA, J. M.; MAGIERO, M. Desenvolvimento vegetativo do cafeeiro Conilon submetido a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 2, p. 157-169, 2013.
- CALZADA BENZA, J. **Metodos estadísticos para la investigacion**. 1. ed. Lima, 1964.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.
- CANARACHE, A. Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, 19:145-164, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90083-A](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90083-A)
- CARDOSO, D.; SILVA, M.; CARVALHO, G.; FREITAS, D.; AVANZI, J.; Plantas de cobertura no controle das perdas de solo água e nutrientes por erosão hídrica, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 16, n.6, p. 632-638, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000600007>
- CHAMEN, W. T.; MOXEY, A. P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P. D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, 146, 10-25, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.011>
- CHANTIGNY, M. H.; ANGERS, D. A.; KAISER, K.; KALBITZ, K. Extraction and Characterization of Dissolved Organic Matter. *Em*: M.R., Carter; E.G., Gregorich (org.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed.: CRC Press, 2007. p. 1264. DOI: 10.1201/9781420005271.ch48.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra

brasileira café: primeiro levantamento, janeiro/2022. **Brasília**, 2022. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CORDEIRO, C. F. S.; RODRIGUES, D. R.; SILVA, G. F.; ECHER, F. R.; CALONEGO, J. C. Soil organic carbon stock is improved by cover crops in a tropical sandy soil. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1546–1556, 2022. DOI: 10.1002/agj2.21019.

COTRUFO, M. F.; SOONG, J. L.; HORTON, A. J.; CAMPBELL, E. E.; HADDIX, M. L.; WALL, D. H.; PARTON, W. J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776–779, 2015. DOI: 10.1038/ngeo2520.

DINKELAKER, B.; MARSCHNER, H. In vivo demonstration of acid phosphatase activity in the rhizosphere of soil-grown plants. **Plant Soil**, v.144, p.199–205, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00012876>

EFFGEN, T. A. M.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; LIMA, J. S. D. S.; REIS, E. F. D.; BORGES, E. N. Physical soil properties as a function of management in crops of conilon coffee. **Revista Ceres**, v. 59, p. 414-421, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300018>

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529–538, 1995. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

EMATER. Geoportal do Café. 2021. Disponível em: <<http://portaldocafedeminas.emater.mg.gov.br/>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

FARIAS, L.; BOMFIM-SILVA, E.; PIETRO, VILARINHO, M.; SILVA, J.A.; GUIMARÃES, S.; Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n.5, p.497-503, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500005>

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Pacote Experimental Designs** (Português). 2022.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. **Soil Scientific Society American Journal**, 59:460-466, 1995. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020027x>

FREIRE, M. B. D. S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ V, V. H.; FREIRE, F. J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 45-52, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100008>

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMARODRIGUES, A.C.; SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.393-901, 2005. DOI:

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600007>

GOMES, L. C.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M., Fernandes; R. B. A.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHULTE, R. P. O. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 294, p. 106858, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>

GUEDES, H. M.; RESCK, M. V. S.; PERREIRA, I. S.; SILVA, J. E. D.; CASTRO, L. H. R. Caracterização da distribuição do tamanho de agregados de diferentes sistemas de manejo e seu conteúdo de carbono em Latossolo Vermelho-escuro na região dos Cerrados, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília. anais... Planaltina: **EMBRAPA-CPAC**, 1996. p. 329-333. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000600007>.

JORGE, R. F.; ALMEIDA, C. X.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R. Distribuição de poros e densidade de latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 159169, 2012. DOI: <http://hdl.handle.net/11449/41811>

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1979. 364 p.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020. DOI: 10.1111/gCBra.14859.

LIMA, J. A.; NAHAS, E.; GOMES, A. C. Microbial populations and activities in sewage sludge and phosphate fertilizer-amended soil. **Applied Soil Ecology**, v.4, p.75–82, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00094-7](https://doi.org/10.1016/0929-1393(96)00094-7)

LIMA, R.P; SILVA, A.R; APARECIDA, J. Importância de atributos físicos do solo na identificação da compactação. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 13, 2013.

LIU, A.; MA, B. L.; BOMKE, A. A. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 2, p.2041-2048, 2005. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0032>

LYNCH, J.P.; WOJCIECHOWSKI, T. Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 8, p. 2199-2210, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru508>

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M. D.; SANTOS JUNIOR, J. D. D. G. D.; SÁ, M. A. C. D.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 873-882, jun. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600015>

MARTINEZ, C., TABATABAI, M. Decomposition of biotechnology by-products in soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, p.625-632, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030006x>

MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; MAIA, S. M. F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 219, p. 105336, 2022. DOI: 10.1016/j.still.2022.105336.

MENEZES, R. S. C.; SALES, A. T.; PRIMO, D. C.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; DE JESUS, K. N.; PAREYN, F. G. C.; SAMPAIO, E. V. D. S. B. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.114943.

MEROTO Jr. A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:197- 202, 1999. DOI: <http://hdl.handle.net/10183/119149>

MOSCATELLI, M. C.; LAGOMARSINO, A.; DE ANGELIS, O.; GREGO, S. Seasonality of soil biological properties in a poplar plantation growing under elevated atmospheric CO₂. **Applied Soil Ecology**, v.30, p.162–173, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.008>

OZPINAR, S.; OZPINAR, A.; CAY, A. Soil management effect on soil properties in traditional and mechanized vineyards under a semiarid Mediterranean environment. **Soil and Tillage Research**, v. 178, p. 198-208, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.004>

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 131-143, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.03.002>

PERECIN, D.; CARGNELUTTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 68-72, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000100010>

PEREIRA, A. P.; SCHOFFEL, A.; KOEFENDER, J.; CAMERA, J. N.; GOLLE, D. P.; HORN, R. C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 120-129, 2017. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA17065>

QUEIROZ, E.; STONE, L.; ALVES, J. A.; BRITO, E. P.; DIDONET, A. D.; MOZENA, E.; Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho nos atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p. 589-602, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200028>.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora** v. 2. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. 876 p.

ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; RAMOS, M. L. G.; DA SILVA OLIVEIRA, A.; BARTHOLO, G. F. Qualidade físico-hídrica de um latossolo sob irrigação e braquiária em lavoura de café no cerrado. **Coffee Science**. ISSN 1984-3909, v. 9, n. 4, p. 516-526, 2014.

RODRIGUES, G. B.; SÁ, M. E. D.; VALÉRIO FILHO, W. V.; BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; PINA, T. P. Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivo e consorciado. **Revista Ceres**, 59(3),380-385, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300013>

RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 105-114, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100010>

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1486–1499, 2001. DOI: [10.2136/sssaj2001.6551486x](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551486x).

SÁNCHEZ-NAVARRO, V.; ZORNOZA, R.; FAZ, Á.; FERNÁNDEZ, J. A. Comparing legumes for use in multiple cropping to enhance soil organic carbon, soil fertility, aggregates stability and vegetables yields under semi-arid conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 246, p. 835–841, 2019. DOI: [10.1016/j.scienta.2018.11.065](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.065).

SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. **Vadose Zone Journal**, 5:27-34. 2005. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0005>

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M. T. Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. **J. Hydrol. Hydromech.** 71(1): 22-34. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039>

SHAW, R. J.; YULE, D. F. The assessment of soils for irrigation, Emerald, Queensland. Brisbane: **Queensland Department of Primary Industries**, 1978.

SHARMA, S. K.; MOHANTY, B. P.; ZHU, J. Including Topography and Vegetation Attributes for Developing Pedotransfer Functions. **Soil Scientific Society American Journal**. 70:1430-1440. 2006. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0087>

SILVA, A. L.; FARIA, M. A.; REIS, R. P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 37-44, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100007>

SILVA, E. N. S. D.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 598-607, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140429>

SILVEIRA, A. P. D.; ABREU, M. F.; CANTARELLA, H.; ZAMBROSI, F. C. B. **Determinação da atividade de enzimas em solos**. 2022.

SILVEIRA, D. D. C.; MELO FILHO, J. F. D.; SACRAMENTO, J. A. A. S. D.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocóeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, p. 659-667, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo, em lavoura de café conilon submetida à subsolagem. **Coffee Science**. ISSN 1984-3909, v. 9, n. 2, p. 226-236, 2014.

SOUZA, L. D.; REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.183-189, 1996.

SPEIR, T. W.; COWLING, J. C. Phosphatase activities of pasture plants and soils: relationship with plant productivity and P fertility indices. **Biology and Fertility of Soils**, v.12, 189– 194, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00337200>

STEPNIEWSKI, W.; HORN, R.; MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, San Francisco, v. 88, n. 2, p. 175-181, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00255-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00255-9)

STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. **Soil Biology & Biochemistry**, v.74, p.107-119, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>

TABATABAI, M. A. Enzymes. In: WEAVER, R.W.; AUGLE, S.; BOTTOMLY, P.J.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A., (eds). Methods of soil analysis. Microbial and biochemical properties. Madison, **Soil Science Society of America**, 1994. Part 2. p.775-833. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JUNIOR, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, 102:18-22, 1966.

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

THORUP-KRISTENSEN, K.; HALBERG, N.; NICOLAISEN, M.; OLESEN, J. E.; CREWS, T. E.; HINSINGER, P.; KIRKEGAARD, J.; PIERRET, A.; DRESBØLL, D. B. Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting. **Trends in Plant Science**, v. 25, n. 4, p. 406–417, 2020. DOI: [10.1016/j.tplants.2019.12.007](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.007)

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L. D.; SOUZA, Z. M. D. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 428-437, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140597>

USDA- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. United States Department of Agriculture. **Produção, suprimento e distribuição**, 2020.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, V. 44, pp. 891-898. 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

WANG, X. C.; LU, Q. Beta-Glucosidase Activity in Paddy Soils of the Taihu Lake Region, China. **Pedosphere**, v. 16, n. 1, p. 118–124, fev. 2006. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60033-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60033-7)

WUTKE, E.B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. do P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para uso. In: LIMA FILHO, O.F. de; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D. (Ed.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília: **Embrapa**, 2014. v.1, p.59-168.

YE, Q.; WANG, Y. H.; ZHANG, Z. T.; HUANG, W. L.; LI, L. P.; LI, J.; WANG, J. J. Dissolved organic matter characteristics in soils of tropical legume and non-legume tree plantations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 148, n. May, p. 107880, 2020. DOI: [10.1016/j.soilbio.2020.107880](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107880).

ZHANG, Z.; KAYE, J. P.; BRADLEY, B. A.; AMSILI, J. P.; SUSEELA, V. Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. **Global Change Biology**, v. 28, n. 19, p. 5831–5848, 2022. DOI: [10.1111/gCBra.16296](https://doi.org/10.1111/gCBra.16296).

ZHAO, H.; SHAR, A. G.; LI, S.; CHEN, Y.; SHI, J.; ZHANG, X.; TIAN, X. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 178–186, 2018. DOI: [10.1016/j.still.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.012).

CAPÍTULO II: QUALIDADE DO SOLO NO CULTIVO DE CEREAIS PÓS-SUCESSÃO COM BRAQUIÁRIA (*Urochloa brizantha*) EM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO

RESUMO

MOREIRA, Siro Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Qualidade do solo no cultivo de cereais pós-sucessão com braquiária (*Urochloa brizantha*) em diferentes tempos de implantação.** Orientador: Teogenes Senna de Oliveira. Coorientador: Rafael da Silva Teixeira.

Os cereais são essenciais para alimentação humana e animal. Os cultivos mecanizados na região do Alto Paranaíba-MG são favorecidos pelo relevo e tipo de solo predominantes, mas causam impactos nos atributos físicos, químicos e biológicos. O uso de plantas com sistema radicular agressivo e vigoroso como as do gênero braquiária tem se tornado uma estratégia de baixo custo para mitigar os impactos do trânsito de máquinas. Objetivou-se avaliar atributos físicos do solo, os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) totais e nas frações físicas da matéria orgânica do solo (MOS) e a atividade de enzimas associadas aos ciclos de C, N e P em cultivos de cereais sem uso prévio de braquiária em sucessão (SBra) e com braquiária implantada há 24 meses (B24m), seis meses e dessecada (B6m) e há dois meses e ainda viva (B2m), em diferentes profundidades. A braquiária, após ser dessecada, favoreceu a melhoria de alguns atributos físicos do solo, como macroporosidade e condutividade hidráulica. Mas, deve-se atentar para o manejo adequado desta, onde a macroporosidade e a condutividade hidráulica reduziram, e a resistência à penetração aumentou nas camadas superficiais quando houve um trânsito recente de maquinário agrícola. Os maiores valores de capacidade de água disponível foram mais influenciados pelos teores de argila dos solos, não sendo influenciada pelo uso da braquiária. A braquiária em sucessão não foi responsável pelo aumento dos estoques de C e N totais e nas frações da MOS, sendo estes mais influenciados pelos teores de argila. Mas foi observado um aumento nos estoques N-MOP em profundidade com a braquiária há seis meses na sucessão. A atividade de arilsulfatase foi favorecida pela presença da grande quantidade de palhada de braquiária na área recém dessecada. A atividade da β -glicosidase provavelmente foi mais favorecida pelo aporte de material particulado e pelo C prontamente disponível aos microrganismos, observado pelos estoques de C-MOD, e foi prejudicada pela compactação superficial. Os resultados da fosfatase ácida podem ter sido influenciados pelo uso de fontes inorgânicas de fósforo como adubo.

Palavras-chave: Cultivo mínimo. Bioporos. Cobertura vegetal. Textura do solo.

CHAPTER II: SOIL QUALITY IN POST-SUCCESSION CEREALS WITH BRACHIARIA (*Urochloa brizantha*) IN DIFFERENT IMPLEMENTATION TIMES

ABSTRACT

MOREIRA, Siro Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2023. **Soil quality in post-succession cereals with brachiaria (*Urochloa brizantha*) in different implementation times.** Advisor: Teogenes Senna de Oliveira. Co-advisor: Rafael da Silva Teixeira.

Cereals are essential for human and animal nutrition. Mechanized cultivations in the Alto Paranaíba-MG region are favored by the predominant relief and soil type, but cause impacts on physical, chemical and biological attributes. The use of plants with an aggressive and vigorous root system, such as those of the Brachiaria genus, has become a low-cost strategy to mitigate the impacts of machine traffic. The objective was to evaluate soil physical attributes, total carbon (C) and nitrogen (N) stocks and physical fractions of soil organic matter (SOM) and the activity of enzymes associated with the cycles of C, N and P in crops of cereals without previous use of brachiaria in succession (SBra) and with brachiaria implanted 24 months ago (B24m), six months and desiccated (B6m) and two months ago and still alive (B2m), at different depths. Brachiaria, after being desiccated, favored the improvement of some soil physical attributes, such as macroporosity and hydraulic conductivity. However, attention should be paid to its proper handling, where macroporosity and hydraulic conductivity are reduced, and resistance to penetration has increased in the surface layers when there has been a recent transit of agricultural machinery. The highest values of available water capacity were more influenced by the clay content of the soils, not being influenced by the use of brachiaria. Brachiaria in succession was not responsible for the increase in total C and N stocks and in SOM fractions, which were more influenced by clay content. But an increase in N-MOP stocks was observed in depth with brachiaria six months in succession. The arylsulfatase activity was favored by the presence of a large amount of brachiaria straw in the recently desiccated area. The β -glucosidase activity was probably more favored by the input of particulate matter and by the C readily available to the microorganisms, observed by the C-MOD stocks, and was impaired by surface compaction. The acid phosphatase results may have been influenced by the use of inorganic sources of phosphorus as fertilizer.

Keywords: Minimum cultivation. Biopores. Vegetal cover. Soil texture.

6. INTRODUÇÃO

Os cereais e fibras são essenciais para sobrevivência humana e tal relevância se deve aos vários produtos e subprodutos gerados pela sua produção (WRIGLEY, 2017). Dentre as culturas de cereais e fibras, a produção da soja, do milho e do algodão possuem grande destaque, ocupando aproximadamente 85% das áreas destinadas ao plantio no Brasil (CEPEA, 2022). A região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais, vem se destacando na produção destes cereais e fibras, principalmente devido aos avanços tecnológicos, advindo de cultivares modernas e com ciclo precoce (BORGHI et al., 2016). Segundo dados da CONAB (2022), a produção nacional na safra 2021/22 para a soja, milho e algodão foi de 124,1; 115,6 e 2.787,2 milhões de toneladas, respectivamente.

A região do Alto Paranaíba encontra-se localizada dentro do bioma Cerrado, o qual é representante de 25% do território brasileiro, possuindo uma área de 185 milhões de hectares destinados ao uso agrícola. No entanto, tem como principal fator limitante a baixa disponibilidade hídrica (SANTOS et al., 2020), comum mundialmente a várias áreas agrícolas, além das restrições químicas amplamente estudadas. O uso da irrigação permitiu o aumento da produtividade agrícola (FLORES, 2014), porém, aliado à mecanização agrícola, outras preocupações surgiram, como as mudanças na estrutura do solo (CUNHA et al., 2009), principalmente pelo uso nem sempre racional de máquinas agrícolas nas áreas de cultivo. As pressões exercidas pelos maquinários e implementos (CORTEZ et al., 2017; FERRARI et al., 2018), geram grandes impactos a qualidade física dos solos (VALADÃO et al., 2015, VALADÃO et al., 2017).

No entanto, as alterações no solo avindas dessas condições implicam em interações físico-químicas também modificadas que se refletem na absorção de nutrientes e água pelas plantas, repercutindo na produtividade. Em solos de textura arenosa, considerados ecologicamente frágeis por apresentarem baixa capacidade de retenção de água e nutrientes para as plantas (ZUO et al., 2008), além de elevada erodibilidade (FREITAS, et al., 2012), esses fenômenos não são ainda bem conhecidos.

Alternativas para minimizar os riscos de degradação e de melhoria na produtividade dos sistemas agrícolas buscam novas estratégias de cultivos (DU et al., 2021), como sistemas agroflorestais, o cultivo mínimo, o plantio direto, entre outras (STOTT; MOEBIUS-CLUNE, 2017), sendo positivos para todos os tipos de solo. Também a sucessão por plantas com características vegetativas de produção de elevada biomassa aliado a efetiva cobertura da

superfície e sistemas radiculares abundantes e vigorosos parecem ser uma boa alternativa e bastante adaptável a sistemas de cultivo contínuo de cereais e/ou fibras anuais.

Além de favorecer a diversificação do sistema de cultivo (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009), essa prática propicia a melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, contribuindo para maiores produtividades e a mitigação de problemas com plantas espontâneas, compactação, erosão e lixiviação (ARAÚJO et al., 2015). A cobertura morta formada sobre o solo favorece a sustentabilidade do sistema (ANSELMO; COSTA; SÁ, 2013), por gerar quantidades de matéria seca suficientes para manter o solo coberto, aumentar os teores de matéria orgânica, reduzir a energia do impacto das gotas de chuva, diminuir a evapotranspiração (GIONGO et al., 2011) e garantir boas condições físicas e químicas para a próxima cultura (NAKAO et al., 2015).

A semeadura de cereais e fibras sobre braquiária dessecada tem ganhado destaque como alternativa sustentável de uso do solo, pois essa espécie vegetal apresenta excelente cobertura, podendo contribuir para o aumento da matéria orgânica do solo e permitir a rotação de culturas (CHIODEROLI et al., 2012). A espécie *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A.Rich.) R.D.Webster tem ampla utilização no Brasil, participando com mais de 90% das sementes de gramíneas comercializadas para pastagens. As vantagens dessa espécie correspondem a grande produtividade de matéria seca, tanto da parte aérea quanto radicular, boa cobertura do solo, sistema radicular profundo, custo relativamente baixo de sementes, melhoria nas propriedades físicas do solo, além do eficiente controle de plantas espontâneas (BORGHI et al., 2006; BORGHI; CRUSCIOL, 2007).

O presente estudo avaliou a mudança do manejo do solo considerando a inserção da braquiária na sucessão aos cultivos de cereais e/ou fibras, implantada em diferentes épocas. As hipóteses levantadas foram: (i) o uso de braquiária em sucessão melhora os atributos físicos do solo em sistemas de cultivo intensivo de cereais e/ou fibras, reduzindo camadas compactadas em superfície e em profundidade, favorecendo o aumento da porosidade do solo e o fluxo e armazenamento de água do solo; (ii) sistemas de uso com braquiária, em sucessão de cereais e/ou fibras, são capazes de aumentar os estoques de C e N totais e das frações orgânicas da MOS em superfície e profundidade; (iii) sistemas de uso do solo com braquiária em sucessão favorece a atividade de enzimas relacionadas aos ciclos do C, P e S em superfície e profundidade; e (iv) os reflexos do uso da braquiária em sucessão sobre os atributos do solo são imediatos e de médio prazo (seis meses).

Nesse sentido, os objetivos do presente trabalho consistiram em avaliar: (i) atributos físicos do solo em cultivos de cereais e/ou fibras com braquiária (*Urochloa brizantha*) em

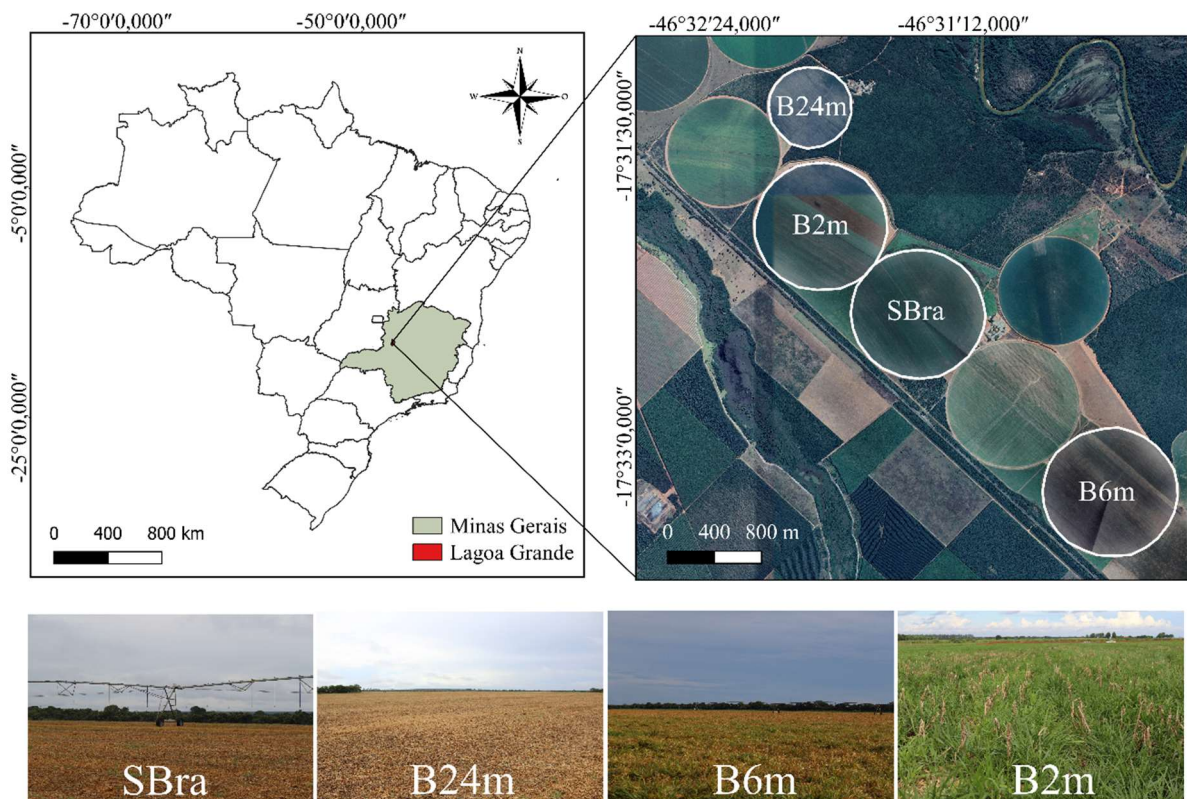
diferentes épocas de implantação, em diferentes profundidades; (ii) a influência de sistemas de uso do solo com diferentes épocas de implantação da braquiária nos estoques de C e N das frações da matéria orgânica do solo, em diferentes profundidades; (iii) a atividade enzimática associada aos ciclos de C, P e S em cultivos de cereais e/ou fibras com braquiária em diferentes épocas de implantação.

7. MATERIAL E MÉTODOS

7.1. Descrição das áreas de estudo e histórico de uso

Os sistemas de uso do solo selecionados para o presente estudo estão localizados no município de Lagoa Grande - MG, Brasil ($17^{\circ}31'59''$ S, $46^{\circ}31'43''$ W). O clima é, segundo a classificação de Köppen, tropical chuvoso com inverno seco (Aw), precipitação e temperatura médias anuais de 1.470 mm e 22°C , respectivamente. O período do ano com maiores precipitações e temperaturas está entre novembro a abril, com nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (ALVARES et al., 2013). A altitude média das áreas de coleta é de 550 m (Figura 11).

Figura 11 - Localização das áreas de estudo: sem braquiária (SBra); braquiária há 24 meses (B24m); braquiária há seis meses (B6m) e braquiária há dois meses (B2m), no município de Lagoa Grande - MG, Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor.

Há dois tipos de solos nas áreas de estudo: Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico em B24m e B6m, e Latossolo Vermelho-Amarelo em SBra e B2m. Na fazenda predominam solos de textura arenosa a média (teor de argila entre 10 e 24%) (Tabela 4). As áreas de cereais e fibras são irrigadas por pivô central, sendo totalmente mecanizadas.

Quatro áreas de cultivo de cereais e/ou fibras foram selecionadas para o presente estudo, sendo: (i) uma área de cultivo em que não houve o uso de braquiária previamente (SBra, 102 ha); (ii) uma área de cultivo em que a braquiária (*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A.Rich.) R.D.Webster) foi implantada em área total 24 meses antes (B24m, 40 ha); (iii) uma área de cultivo em que a braquiária foi implantada em área total seis meses antes (B6m, 103 ha); e (iv) outra área de cultivo em que a braquiária foi implantada em área total dois meses antes (B2m, 100 ha) e que se encontrava viva no momento das coletas (Figura 11).

As áreas de estudo estão localizadas na fazenda Pontal (800 ha), a qual produz cereais e algodão desde 2005. A fazenda foi implantada em 2005, juntamente com os sistemas de irrigação, todos por pivô central. Cada área escolhida (SBra, B24m, B6m e B2m) corresponde a um dos pivôs centrais, com diferentes épocas de implantação de cada pivô. Anteriormente à implantação da fazenda, a área era ocupada por vegetação natural característica do local, denominada Cerrado sentido restrito (RIBEIRO et al., 2008). Ao longo do tempo essa vegetação foi sendo desmatada e se tornou pastagem, com algumas plantas ainda remanescentes, sendo denominado popularmente de “pasto sujo”, correspondendo à fitofisionomia Cerrado ralo (RIBEIRO et al., 2008). Antes do uso de braquiária em sucessão nas áreas cultivadas, a fazenda adotava o plantio convencional, fazendo uso de revolvimento do solo e manejo da adubação de acordo com as recomendações para cada cultura. Com o início do cultivo de braquiária (2020/20), passou-se a adotar o cultivo mínimo, em que se priorizou o não revolvimento, visando uma maior conservação do solo e nutrientes na fazenda (DOS SANTOS FERNANDES, et al., 2019). Todos os cultivos, desde a implantação da fazenda, seguiram as recomendações de aplicação de corretivos e adubação de plantio e cobertura, conforme Ribeiro et al. (1999), e a irrigação é realizada conforme o balanço hídrico e as necessidades de cada cultura. As espécies cultivadas, além da braquiária, nas áreas de estudo foram: Soja (*Glycine max* (L.) Merr.); milho (*Zea mays* L.); algodão (*Gossypium* sp. L.) e crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth). Segundo os técnicos da fazenda, as safras cultivadas com crotalária visaram seu uso em sucessão, porém não houve êxito devido à não cobertura total do solo e a baixa produção de biomassa, especificamente na safra 2015/16 em B24m e 2017/18 em SBra e B2m.

Tabela 4 – Propriedades físicas e químicas de sistemas de cultivo de cereais em solos sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e sistema com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), no município de Lagoa Grande - MG, Brasil

	SBra				B24m				B6m				B2m			
	0,0- 0,10	0,10- 0,30	0,30- 0,60	0,60- 1,00	0,0- 0,10	0,10- 0,30	0,30- 0,60	0,60- 1,00	0,0- 0,10	0,10- 0,30	0,30- 0,60	0,60- 1,00	0,0- 0,10	0,10- 0,30	0,30- 0,60	0,60- 1,00
pH H ₂ O (1:2,5)	6,69	6,41	6,14	5,09	6,29	5,83	5,62	5,02	6,34	6,57	6,10	5,79	6,55	6,46	6,73	6,53
P (mg dm ⁻³)	55,90	63,90	6,00	0,40	28,30	28,80	0,70	2,50	28,50	48,90	14,40	0,60	50,00	31,90	0,90	0,60
P-rem (mg L ⁻¹)	49,40	48,50	40,70	32,40	49,70	48,90	41,50	39,80	51,80	51,10	48,70	42,30	47,20	43,20	37,90	33,80
K (mg dm ⁻³)	101,00	57,00	53,00	9,00	77,00	43,00	69,00	41,00	174,00	65,00	11,00	5,00	69,00	111,00	73,00	47,00
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	3,94	2,35	0,95	0,44	3,27	1,95	0,53	0,37	2,35	2,16	0,90	0,81	3,61	2,21	1,37	1,12
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,97	0,64	0,18	0,05	0,68	0,38	0,00	0,00	0,83	0,41	0,07	0,03	0,80	0,43	0,23	0,19
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,20	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0,80	1,30	1,10	1,90	1,10	1,80	1,60	1,80	1,30	1,00	1,10	0,80	1,30	1,80	1,00	1,00
SB (cmol _c dm ⁻³)	5,17	3,14	1,27	0,51	4,15	2,44	0,71	0,48	3,63	2,74	1,00	0,85	4,59	2,92	1,79	1,43
t (cmol _c dm ⁻³)	5,17	3,14	1,27	0,90	4,15	2,44	0,91	0,77	3,63	2,74	1,00	0,85	4,59	2,92	1,79	1,43
T _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	5,97	4,44	2,37	2,41	5,25	4,24	2,31	2,28	4,93	3,74	2,10	1,65	5,89	4,72	2,79	2,43
V (%)	86,60	70,70	53,60	21,20	79,00	57,50	30,70	21,10	73,60	73,30	47,60	51,50	77,90	61,90	64,20	58,80
m (%)	0,00	0,00	0,00	43,30	0,00	0,00	22,00	37,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dp (g cm ⁻³)	2,67	2,63	2,60	2,67	2,70	2,74	2,70	2,70	2,70	2,82	2,78	2,74	2,60	2,67	2,67	2,60
ADA (kg kg ⁻¹)	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,06
Areia grossa (kg kg ⁻¹)	0,52	0,51	0,46	0,48	0,63	0,65	0,66	0,65	0,74	0,78	0,71	0,73	0,58	0,52	0,59	0,53
Areia fina (kg kg ⁻¹)	0,29	0,28	0,31	0,28	0,23	0,21	0,17	0,18	0,15	0,11	0,15	0,12	0,20	0,22	0,14	0,20
Silte (kg kg ⁻¹)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,03	0,04	0,03
Argila (kg kg ⁻¹)	0,17	0,18	0,20	0,21	0,12	0,12	0,15	0,15	0,10	0,10	0,12	0,13	0,19	0,23	0,22	0,24

Obs.: Potencial hidrogeniônico (pH) em água: determinado em solução 1:2,5 (solo-solução) por potenciometria; P-Rem: Fósforo remanescente extraído por CaCl₂ e determinado por absorção molecular; K e o P disponíveis: extraídos com solução de Mehlich-1; Ca²⁺, Al³⁺ e Mg²⁺ extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; H+Al: extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, a pH 7,0; SB = soma de bases trocáveis (Mg²⁺ + K⁺ + Ca²⁺); T = capacidade de troca catiônica a pH 7,0, que é soma de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Al³⁺ e H⁺; t = capacidade de troca catiônica efetiva, que é a soma de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Al³⁺; V = saturação por bases V(%) = (100*SB)/t; m = saturação por alumínio, em que m = (100*Al³⁺)/(SB+Al³⁺); Densidade de partículas (Dp) determinada pelo método do balão volumétrico; Argila dispersa em água (ADA) determinada pelo método da pipeta; Areia grossa e fina determinadas por peneiramento; Silte e argila determinados pelo método da pipeta + agitação lenta. Metodologias segundo Alvarez et al. (2000) e Teixeira et al. (2017).

Fonte: Elaborado pelo autor.

O histórico de produção das áreas remonta à safra de 2015/16 até a safra 2021/22, que correspondeu ao momento das coletas, em que as culturas produzidas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Sucessões de cultivos nas áreas selecionadas sem braquiária (SBra) e com braquiária cultivada em sucessão há 24 meses (B24m), seis meses (B6m) e dois meses (B2m) entre as safras 2015/2016 e 2021/2022, Lagoa Grande - MG, Brasil

Safra	Sistema de cultivo			
	SBra	B24m	B6m	B2m
2015/16	Soja	Crotalária	Milho	Soja
2016/16	Milho	Milho	Algodão	Milho
2016/17	Soja	Soja	Soja	Soja
2017/17	Algodão	Algodão	Milho	Milho
2017/18	Crotalária	Soja	Soja	Crotalária
2018/18	Algodão	Milho	Milho	Algodão
2018/19	Soja	Soja	Soja	Soja
2019/19	Milho	Algodão	Algodão	Milho
2019/20	Soja	Algodão	Soja	Soja
2020/20	Milho + braquiária	Braquiária	Milho + braquiária	Milho + braquiária
2020/21	Soja	Braquiária	Soja	Soja
2021/21	Algodão	Algodão	Milho + braquiária	Algodão
2021/22	Soja	Soja	Braquiária	Milho + braquiária

Fonte: Dados do produtor.

A área sem uso de braquiária em sucessão (SBra) foi implantada em 2007 e consistia no cultivo de cereais e/ou fibras, com o uso de práticas de manejo convencional. Percebeu-se que na safra 2020/20 houve o cultivo de milho com a braquiária suprimida, mas que esta não foi utilizada em sucessão após a colheita do milho, e foi logo dessecada para o semeio de soja na safra 2020/21. A partir da safra 2020/21 foi adotado o cultivo mínimo na área. No momento das coletas havia resteva (restos culturais) de soja sobre o solo.

A área utilizando braquiária plantada há 24 meses (B24m) foi implantada em 2012. Na safra 2020/20, após o estabelecimento da braquiária, foi realizada uma adubação nitrogenada e o pasto foi utilizado para pastejo de bovinos (cria de vacas e novilhas), conforme a categoria animal e altura final de pastejo, totalizando, em média, sete unidades animais por hectare (UA ha⁻¹) com tempo de permanência de um ano. A partir da safra 2021/21 foi adotado o cultivo mínimo na área. No momento das coletas havia resteva de soja sobre o solo.

A área com braquiária há seis meses (B6m) foi implantada em 2007. Também na safra 2020/20 houve o cultivo de milho com a braquiária, que, logo após a colheita do milho, foi

dessecada para o semeio de soja na safra seguinte, já sendo adotado o cultivo mínimo. Na safra 2021/21 foi novamente cultivado milho com a braquiária suprimida, mas dessa vez, após a colheita do milho, a braquiária permaneceu e foi utilizada como pasto para gado após a adubação nitrogenada, totalizando também uma média de sete UA ha⁻¹ (cria de vacas e novilhas), com tempo de permanência de seis meses. No momento das coletas, o gado já havia sido retirado da área e a braquiária encontrava-se dessecada por herbicida.

A área com braquiária há dois meses (B2m) também foi implantada em 2007. Assim como em B24m e B6m, na safra 2020/20 foi semeado milho com braquiária, que foi dessecada após a colheita do milho para o semeio de soja na safra 2020/21, adotando o cultivo mínimo na área. Na safra 2021/22 foi novamente cultivado milho com a braquiária suprimida, mas dessa vez, após a recente colheita do milho, a braquiária permaneceu e estava com cerca de dois meses, mas ainda não havia sido colocado gado na área.

7.2. Amostragem de solo

Durante o mês de março de 2022, no final do período chuvoso na região, em cada uma das quatro áreas de estudo escolhidas, foram abertas quatro trincheiras, com comprimento aproximado de 1 x 1 m de profundidade, totalizando 16 trincheiras. As amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, sendo as amostras indeformadas coletadas no centro de cada camada avaliada. As camadas foram definidas após abertura de todas as trincheiras e avaliação de critérios morfológicos como cor, estrutura e exame tátil-visual com uso de faca. As amostras de solo foram coletadas e, dependendo das análises realizadas, foram secas ao ar e peneiradas (< 2 mm) ou refrigeradas (~ 4°C) ainda no campo, tendo sido ambas armazenadas para posteriores análises.

7.3. Análises físicas

A umidade do solo foi determinada gravimetricamente em amostras deformadas em estufa de circulação de ar a 105 °C, até atingirem peso constante, cerca de 24 horas (TEIXEIRA et al., 2017).

A densidade do solo (D_s) e de partículas (D_p) foram determinadas pelos métodos do anel e do balão volumétricos, respectivamente (TEIXEIRA et al., 2017), possibilitando a estimativa da porosidade total (PT) de acordo com fórmula:

$$PT = (1 - D_s/D_p) \quad (8)$$

em que: PT é a porosidade total de cada camada avaliada ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds é a densidade do solo da camada avaliada (Mg m^{-3}); e Dp é a densidade de partículas da camada avaliada (Mg m^{-3}).

A microporosidade (Mi) foi determinada em amostras indeformadas equilibrando a umidade em mesa de tensão a 6 kPa, sendo a macroporosidade obtida por diferença entre PT e Mi (TEIXEIRA et al., 2017). A condutividade hidráulica do solo em meio saturado (CH) foi realizada em anéis volumétricos, com tempo de estabilização de 60 minutos e altura de coluna de água de 2,0 cm com carga constante, e o volume de água medido em provetas (TEIXEIRA et al., 2017).

Avaliações da resistência à penetração (RP_c) também foram realizadas ainda durante as coletas de campo, utilizando o equipamento penetrômetro digital Falker, modelo PenetroLOG2040, com diâmetro de cone de 12,83 mm, haste com profundidade máxima de penetração de 60 cm e velocidade de inserção máxima de 5 cm s^{-1} . Foram feitas 10 medições de resistência a penetração no entorno de cada trincheira (transecto) de forma aleatória, completando um total de 40 medições para cada sistema de uso do solo. Foi utilizada a média de cada transecto para compor a média dos resultados de cada sistema.

A resistência à penetração com umidade corrigida (RP_{uc}), medida no penetrômetro digital em bancada, modelo TE-096 do Laboratório de Física do Solo do Departamento de solos (DPS), foi avaliada em ponto central de cada amostra indeformada, em amostras com umidade equilibrada a 10 kPa, tensão que caracteriza a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}).

A umidade nas tensões estabelecidas para a obtenção da curva de retenção de água no solo (CRA) foi obtida pelo equilíbrio de amostras indeformadas nas tensões de 1, 6, e 10 kPa em mesa de tensão. Amostras deformadas foram utilizadas para as tensões de 100, 300 e 1500 kPa, utilizando câmaras de Richards (TEIXEIRA et al., 2017). No entanto, devido à quantidade de CRA's geradas, procedeu-se pela análise estatística dos parâmetros de ajuste da equação de van Genutchen ("θ_r", "θ_s", "α" e "n") (SEKI et al., 2023), além da comparação das umidades (θ) nas tensões de 10 kPa (Capacidade de campo - θ_{CC}) e 1500 kPa (Ponto de murcha permanente - θ_{PMP}). Com os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foi calculada a capacidade de água disponível (CAD), de acordo com a fórmula adaptada de Kiehl, (1979) e Shaw; Yule, (1981):

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times Ds \times E \times 10 \quad (9)$$

em que: CAD é a capacidade de água disponível da camada avaliada ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$); θ_{CC} é a umidade na capacidade de campo da camada avaliada (g g^{-1}); θ_{PMP} é a umidade no ponto de murcha permanente da camada avaliada (g g^{-1}); Ds é a densidade do solo da camada avaliada (g cm^{-3}); E é a espessura do solo para cada camada (cm); 10 é o fator de conversão de mm para $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

7.4. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS)

Amostras deformadas de solo (< 2 mm) foram utilizadas para o fracionamento físico da matéria orgânica (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), o qual foram separadas as frações: matéria orgânica particulada (MOP), que está associada à fração areia (> 53 μm); e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (silte + argila, < 53 μm). O procedimento consistiu na dispersão de uma subamostra de solo (10 g) com 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) em uma proporção (1:3, m:v) por 15 h em um agitador horizontal. Em seguida, realizou-se o peneiramento úmido com o auxílio de uma peneira com 53 μm de malha. O material retido consiste na MOP e a fração que passou pela peneira, MOAM. Essas frações foram secas em estufa com circulação forçada a uma temperatura de 60 °C até peso constante, e em seguida, moídas e peneiradas com peneira de 250 μm de malha, para determinar seus teores de carbono (C) e nitrogênio (N). Os teores de C da MOP e MOAM foram determinados via combustão seca, utilizando um analisador elementar CHNS, modelo Flash EA 1112 da marca Thermo Finnigan (Milan/Itália).

Para a extração da matéria orgânica dissolvida (MOD, fração $< 0,45$ μm), as amostras, refrigeradas ainda no campo e mantidas a ~ 4 °C, foram acondicionadas em sacos plásticos de cor preta (para evitar foto-oxidação), padronizadas pelo peneiramento em malha de 4 mm, retirando raízes grossas presentes (CHANTIGNY et al., 2007). O solo foi pesado e adicionado água deionizada na proporção 1:1 (m:v), descontando-se a umidade gravimétrica. O uso da água deionizada como extrator objetivou preservar os compostos químicos da MOD. A seguir, as amostras de solo com a água deionizada foram agitadas suavemente com o auxílio de um bastão de vidro durante 3 minutos e, em seguida, centrifugadas a 3450 rpm por 10 min. O sobrenadante foi filtrado utilizando membranas de policarbonato de 0,45 μm de diâmetro de poro, ao abrigo da luz, sendo o volume aferido, seguido do armazenamento em freezer a -18 °C. O filtrado foi armazenado em potes plásticos e posteriormente determinado o C e N da MOD por um analisador de carbono TOC-L (Shimadzu, Kyoto, Japão) com adaptador para determinação de nitrogênio (TN).

7.5. Estoques de C e N das frações MOP, MOAM, MOD e Total

Os estoques de C e N da MOP, MOAM e MOD foram calculados com base na massa específica do solo (ELLERT; BETTANY, 1995). Esse método leva em consideração a massa de solo equivalente das áreas de uso, sendo corrigida a espessura dos sistemas com as mudanças na densidade do solo (Ds), utilizando como referência a densidade média da área de vegetação natural em sua respectiva profundidade. Na ausência de uma área de vegetação natural, foi

utilizada a área com o menor valor de D_s média nas quatro camadas como referência (BALESDENT et al., 1990). A massa do solo em cada profundidade de cada sistema foi determinada pela equação:

$$M_{solo} = E \times ha \times D_s \quad (10)$$

em que: M_{solo} é a massa de solo por hectare em cada camada avaliada (Mg ha^{-1}); E é a espessura do solo para cada camada (m); ha é a área empregada ($1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2$); e D_s é a densidade do solo em cada camada amostrada (g cm^{-3}). Em seguida, a espessura da camada a ser descontada ou acrescida nos sistemas em relação a área de referência foi determinada pela equação:

$$E_{(ad|sub)} = (M_{ref} - M_{solo}) \times fha / D_s \quad (11)$$

em que: $E_{(ad|sub)}$ é a espessura da camada de solo a ser acrescida (+) ou descontada (-) da camada do sistema (m); M_{ref} é a massa equivalente média do tratamento de referência (Mg ha^{-1}); M_{solo} é a massa de solo equivalente de cada sistema (Mg ha^{-1}); fha é o fator de conversão de ha para m^2 ($0,0001 \text{ ha m}^{-2}$); e D_s é a densidade do solo para a área da camada amostrada ($\text{g cm}^{-3} = \text{Mg m}^{-3}$). Após determinar a espessura, os estoques de C e N foram calculados pela seguinte equação:

$$ES = (C \times D_s \times E \pm E_{(ad|sub)}) \times 10 \quad (12)$$

em que: ES o estoque de C ou N nas frações da MOS (Mg ha^{-1}); E é a espessura da camada de solo (m); D_s é a densidade do solo do sistema de cultivo na camada escolhida ($\text{g cm}^{-3} = \text{Mg m}^{-3}$); C ou N são os teores de C ou N na fração da MOS (g kg^{-1}); e 10 é o fator de conversão de kg m^{-2} para Mg ha^{-1} .

Os estoques da área de referência foram calculados apenas pelo produto do teor, densidade e espessura da camada de solo, pela equação:

$$ES = C \times D_s \times E \times 10 \quad (13)$$

em que: ES é o estoque de C ou N nas frações da MOS da área de referência (Mg ha^{-1}); E é a espessura da camada de solo (m); D_s é a densidade do solo do sistema de cultivo na camada escolhida ($\text{g cm}^{-3} = \text{Mg m}^{-3}$); e 10 é o fator de conversão de kg m^{-2} para Mg ha^{-1} .

7.6. Atividade de enzimas do solo

Amostras deformadas de solo ($< 2 \text{ mm}$) foram utilizadas para a determinação das atividades das enzimas arilsulfatase, β -glicosidade e fosfatase ácida (SILVEIRA et al., 2022), nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,30-0,60 m.

Para a determinação da atividade da enzima arilsulfatase pesou-se uma subamostra de solo (1 g) em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), e foram adicionados 4 mL de tampão acetato 0,5 mol L⁻¹ e 1 mL de solução de *p*-nitrofenil sulfato de potássio (PNS). As amostras foram, então, incubadas em estufa a 37 °C por 1 hora e, após a incubação, foram adicionados 1 mL de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ e 4 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ e, no branco, o PNS foi adicionado após a incubação. Agitou-se em agitador do tipo vórtex e a suspensão do solo foi filtrada em papel filtro de filtragem lenta e o filtrado utilizado para a obtenção da absorbância da solução (com coloração amarela), que foi lida em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm. O equipamento foi calibrado de acordo com a curva de calibração da solução padrão diluída de *p*-nitrofenol (PNF), que apresenta coloração amarela.

A determinação da atividade da enzima β-glicosidade foi realizada pesando uma subamostra de solo (1 g) em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), onde foram adicionados 4 mL de solução-estoque do tampão universal modificado (MUB) e 1 mL de solução de *p*-nitrofenil-β-D-glicosídio (PNG), seguido da incubação em estufa a 37 °C por 1 hora. Após a incubação, foram adicionados 1 mL de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ e 4 mL de solução Tris pH 12 0,1 mol L⁻¹. No branco, o PNS foi adicionado após a incubação. Na sequência, agitou-se em agitador do tipo vórtex e a suspensão do solo foi filtrada em papel filtro de filtragem lenta, sendo o filtrado (com coloração amarela) utilizado para determinação da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410 nm. O equipamento foi calibrado de acordo com a curva de calibração da solução padrão diluída de *p*-nitrofenol (PNF), que apresenta coloração amarela.

A atividade da enzima fosfatase ácida foi determinada pesando-se uma subamostra de solo (1 g) em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), e adicionando 4 mL de solução estoque do tampão universal modificado (MUB 2 a pH 6,5) e 1 mL de solução de *p*-nitrofenil fosfato dissódico (P-NPP). Após, as amostras seguiram o mesmo procedimento adotado na determinação da arilsulfatase.

A atividade enzimática é expressa em µg de *p*-nitrofenol por grama de solo por hora (µg de *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹), que corresponde a mg de *p*-nitrofenol por quilograma de solo por hora (mg de *p*-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹). O cálculo da atividade de cada enzima é feito com base na curva de calibração de *p*-nitrofenol. Para expressar a atividade da enzima na massa de solo a partir da curva padrão foi usada a equação:

$$A_E = (C \times V)/(g \times t) \quad (14)$$

em que: A_E é a atividade da enzima ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$); C é a concentração de *p*-nitrofenol na suspensão do solo ($\mu\text{g mL}^{-1}$); V é o volume da suspensão de solo (10 mL); g é a massa do solo seco ao ar (g); e t é o tempo de incubação (1 h).

7.7. Análises estatísticas

Os resultados foram analisados estatisticamente considerando um fatorial 4 x 4 com restrições de aleatorização, em que as trincheiras foram sistematicamente distribuídas dentro das áreas de cultivo SBra, B24m, B6m e B2m, caracterizando um delineamento sistemático (ALVAREZ, V. V. H.; ALVAREZ, 2013; CALZADA BENZA, 1964), sendo as profundidades dispostas em faixas. Utilizou-se quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e o desdobramento das interações sistema de uso x profundidade foi realizado independentemente da significância pelo teste F, até 25% de probabilidade (PERECIN; CARGNELUTTI FILHO, 2008). As médias dos tratamentos em cada profundidade foram comparadas pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade, utilizando-se os erros apropriados para cada tipo de comparação, utilizando o *software* R versão 4.1.2 com o pacote *ExpDes.pt* e função *sis2* (FERREIRA et al., 2022).

Tabela 6 - Quadro de análise de variância (ANOVA) do delineamento sistemático

Fontes de variação	Graus de liberdade
Sistemas	$(i-1) = 3$
Erro A	$(i-1) * (i-1) + (k-1) = (3*3) + (3) = 12$
Profundidade	$j-1 = 3$
Erro B	$(j-1) * (k-1) = 3*3 = 9$
Sistemas * profundidade	$(i-1) * (j-1) = 3*3 = 9$
Erro C	$3*3*3 = 27$
Total	$64 - 1 = 63$

Fonte: Dados da pesquisa.

Também foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) para melhor relacionar as variáveis que comportaram uma maior explicação da variação entre os sistemas e as profundidades. Para tanto, procedeu-se com a avaliação dos autovetores, sendo selecionadas as variáveis com autovetor igual ou superior a 0,7, e assim procedeu-se nova análise, até que todos os parâmetros apresentassem autovetor $\geq 0,7$. Correlação de Pearson também foi realizada entre os valores de RP_c , RP_{uc} e umidade do solo. Ambas análises foram realizadas no *software* R versão 4.1.2.

8. RESULTADOS

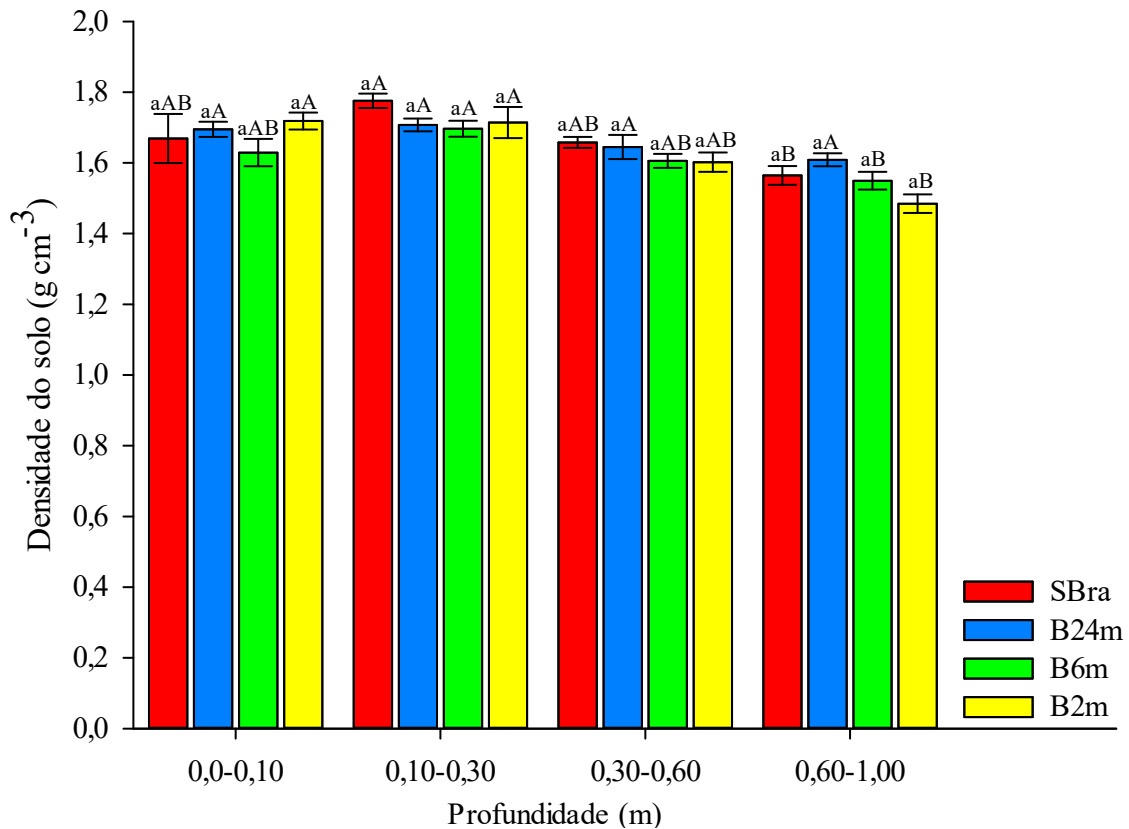
8.1. Densidade do solo, condutividade hidráulica, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam os resultados das comparações entre os valores médios de densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica (CH) com solo saturado, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) das situações de estudo envolvendo os sistemas de manejo sem braquiária (SBra), braquiária há 24 meses (B24m), braquiária há seis meses (B6m) e braquiária há dois meses e ainda viva (B2m), nas quatro profundidades avaliadas.

Não houve diferenças ($p > 0,05$) nos valores de Ds entre as situações de estudo ($\bar{X}_{Geral} = 1,68; 1,72; 1,62$ e $1,55 \text{ g cm}^{-3}$) em cada uma das quatro profundidades avaliadas (0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00, respectivamente).

Nas comparações entre profundidades, em cada sistema de uso, não foram constatadas diferenças ($p > 0,05$) em B2m ($\bar{X}_{Geral} = 1,66 \text{ g cm}^{-3}$). No entanto, para os demais sistemas de uso observaram-se diferenças significativas. Para SBra e B6m houve um comportamento comum, em que 0,10-0,30 m apresentou maiores ($p < 0,05$) valores de densidade do solo (1,77 e $1,69 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente), somente quando comparados a 0,60-1,00 m (1,56 e $1,54 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente), sendo os demais semelhantes estatisticamente. Em B2m, 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m não se diferiram ($p > 0,05$) (1,72 e $1,71 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente), mas apresentaram valores superiores ($p < 0,05$) quando comparados a 0,60-1,00 m (1,60 e $1,48 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente).

Figura 12 - Densidade do solo (Ds) sob sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

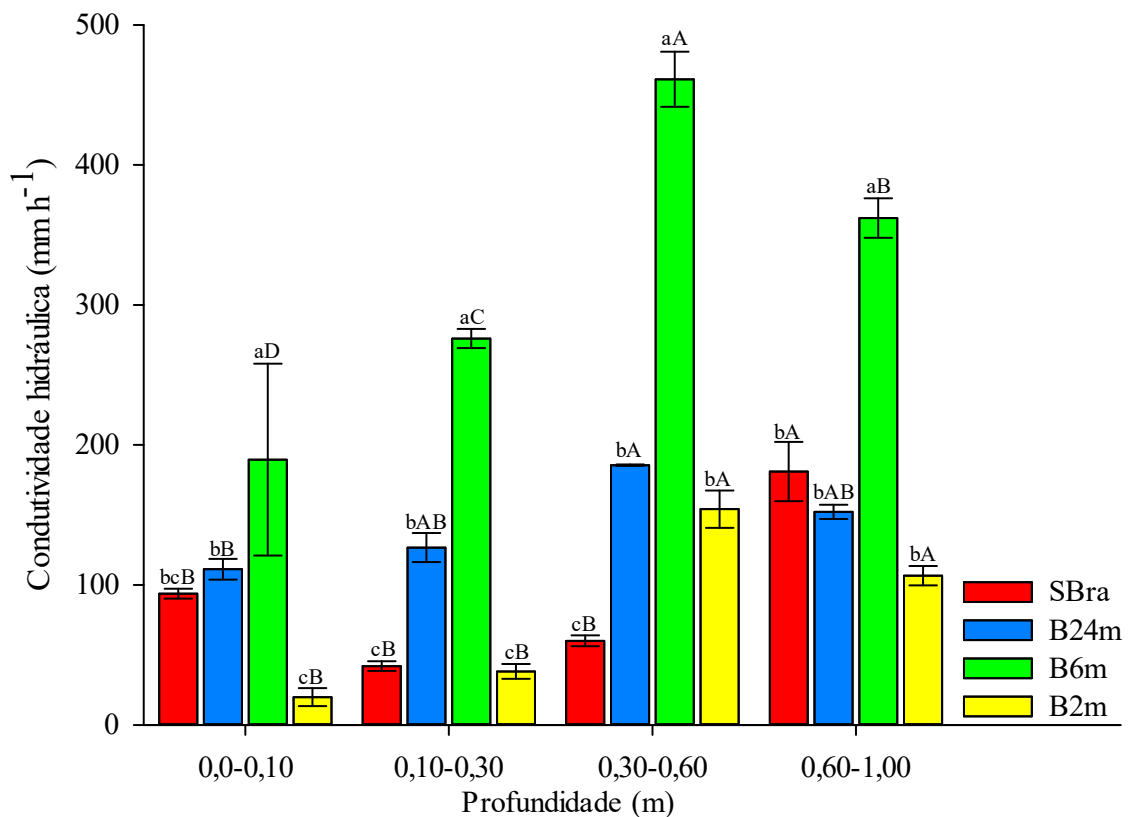
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os maiores ($p < 0,05$) valores de condutividade hidráulica (CH) foram observados em B6m (189,5; 276,0; 462,2 e 362,1 mm h⁻¹) em todas as profundidades avaliadas (0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00, respectivamente). Porém, em relação às demais situações de estudo observaram-se algumas diferenças ao comportamento observado em B6m. Em 0,0-0,10 m, a CH em B24m (111,2 mm h⁻¹) foi similar ($p > 0,05$) a SBra (93,7 mm h⁻¹) e superior ($p < 0,05$) a B2m (19,9 mm h⁻¹). B24m apresentou maiores ($p < 0,05$) valores de CH (126,7 mm h⁻¹) que SBra e B2m (42,0 e 38,2 mm h⁻¹, respectivamente), sendo as últimas semelhantes ($p > 0,05$), na camada de 0,10-0,30 m. Na profundidade 0,30-0,60 m, a CH em B24m e B2m (185,6 e 154,1 mm h⁻¹, respectivamente) não se diferiram ($p > 0,05$) e foram superiores a SBra (60,1 mm h⁻¹). Em 0,60-1,00 m, SBra, B24m e B2m (181,1; 152,2 e 106,6 mm h⁻¹, respectivamente) não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) nos valores de CH.

Nas comparações entre profundidades, 0,60-1,00 m (181,1 mm h⁻¹) apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores em SBra quando comparado às outras camadas (93,7; 42,0 e 60,1 mm h⁻¹, respectivamente), que foram similares ($p > 0,05$) entre si. Em B24m, os maiores ($p < 0,05$) valores encontrados foram em 0,30-0,60 m (185,6 mm h⁻¹) e superiores somente aos

encontrados em 0,0-0,10 m ($111,2 \text{ mm h}^{-1}$). Os maiores ($p < 0,05$) valores de CH encontrados em B6m foram na profundidade 0,30-0,60 m ($462,2 \text{ mm h}^{-1}$), seguido de 0,60-1,00 m ($362,1 \text{ mm h}^{-1}$), 0,10-0,30 m ($276,0 \text{ mm h}^{-1}$) e 0,0-0,10 m ($189,5 \text{ mm h}^{-1}$). Para B2m os maiores ($p < 0,05$) valores de CH foram encontrados em 0,30-0,60 m ($154,1 \text{ mm h}^{-1}$) e 0,60-1,00 m ($106,6 \text{ mm h}^{-1}$), comparativamente a 0,0-0,10 m ($19,9 \text{ mm h}^{-1}$) e 0,10-0,30 m ($38,2 \text{ mm h}^{-1}$).

Figura 13 - Condutividade hidráulica com solo saturado (CH) em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m, observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores de Ma em B6m ($0,24$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) quando comparado às demais situações. SBra e B24m ($0,14$ e $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) foram semelhantes ($p > 0,05$) e superiores ($p < 0,05$) a B2m ($0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na primeira profundidade, enquanto SBra e B2m ($0,08$ e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), por sua vez, foram semelhantes em 0,10-0,30 m, sendo B24m ($0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) intermediário ($p < 0,05$) a estas situações. A Mi apresentou comportamento quase

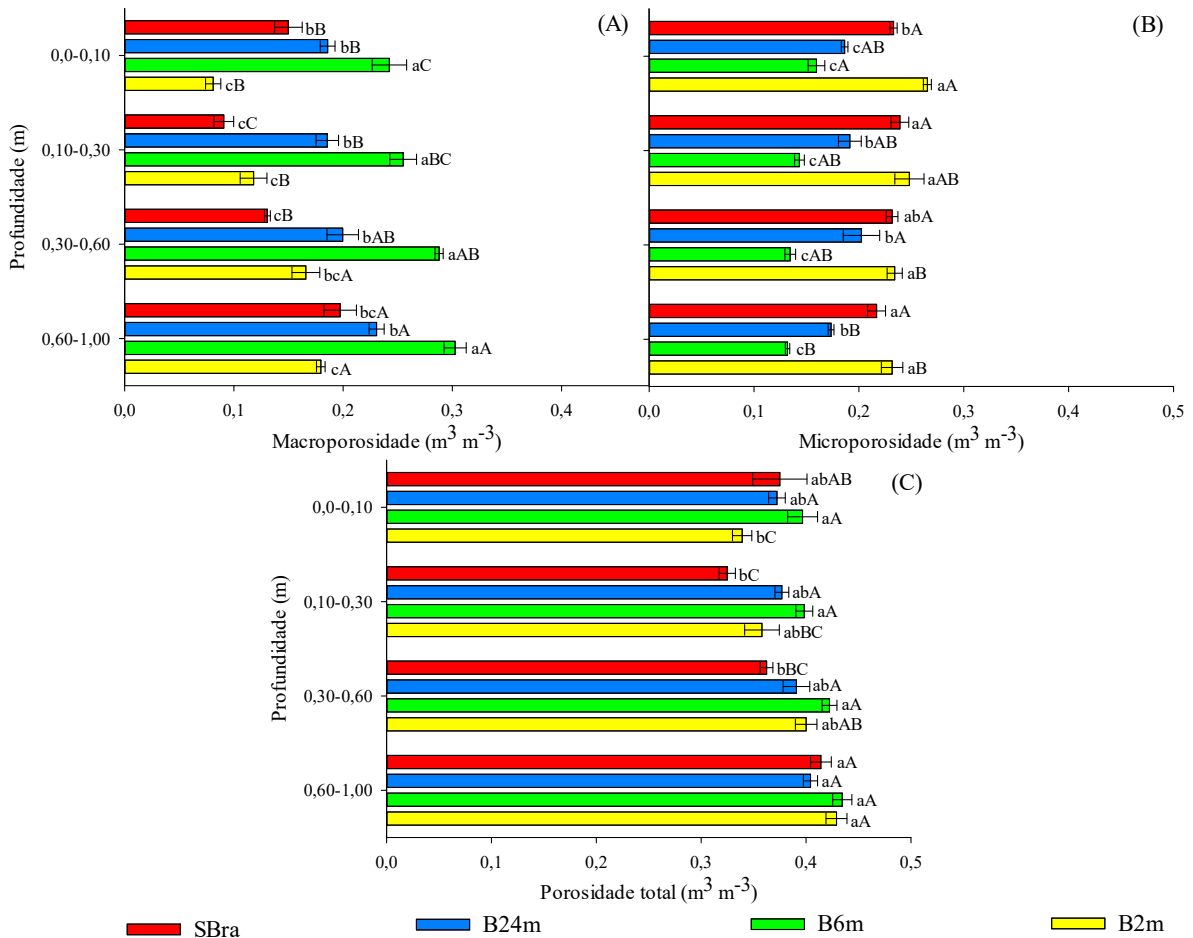
totalmente contrário a Ma, ou seja, geralmente os casos de maiores valores de Ma corresponderam aos menores de Mi. Especificamente para Mi em 0,0-0,10 m, B2m ($0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentou valores superiores ($p < 0,05$) a SBra ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e, estes, por sua vez, foram superiores ($p < 0,05$) a B24m e B6m ($0,19$ e $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), sendo ambos semelhantes ($p > 0,05$). Em 0,10-0,30 m, os maiores ($p < 0,05$) valores de Mi foram observados em SBra e B2m ($0,24$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) quando comparado a B24m e B6m ($0,19$ e $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), com B24m apresentando valores superiores ($p < 0,05$) a B6m. Quanto a PT, B6m, SBra e B24m ($0,40$; $0,37$ e $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) não se diferiram ($p > 0,05$), sendo B6m superior ($p < 0,05$) somente a B2m ($0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em 0,0-0,10 m, enquanto, em 0,10-0,30 m, B6m ($0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores somente quando comparado a SBra ($0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Nas profundidades de 0,30-0,60 m e 0,60-1,00 m, os maiores ($p < 0,05$) valores de Ma foram observados em B6m ($0,29$ e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) quando comparado a B24m ($0,19$ e $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), B2m ($0,16$ e $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) e SBra ($0,13$ e $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente). Para Mi, os maiores ($p < 0,05$) valores foram observados em B2m em 0,30-0,60 m ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), ocorrendo também de 0,60-1,00 m ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), porém incluindo SBra ($0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), quando comparado a B24m e B6m, com B24m ($0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentando valores superiores ($p < 0,05$) a B6m ($0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para porosidade total (PT), o mesmo comportamento observado nas profundidades anteriores também o foi em 0,30-0,60 m, sendo que B6m ($0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores somente quando comparado a SBra ($0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Em 0,60-1,00 m, não foram observadas diferenças ($p > 0,05$) nos valores de PT entre as quatro situações de estudo ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Nas comparações entre profundidades, não foram constatadas diferenças ($p > 0,05$) entre os valores de SBra para Mi, e B24m e B6m para PT. De maneira geral, Ma em 0,60-1,00 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores, sendo que em B24m, B6m e B2m, esta camada foi similar ($p > 0,05$) a 0,30-0,60 m e superior ($p < 0,05$) a 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m. Em SBra, 0,60-1,00 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de Ma quando comparado a 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m, sendo estas duas similares ($p > 0,05$) e com valores superiores ($p < 0,05$) aos encontrados em 0,10-0,30 m. Para PT, B2m apresentou comportamento semelhante ao observado para Ma, sendo que 0,60-1,00 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores quando comparados a 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m e similares ($p > 0,05$) a 0,30-0,60 m. Em SBra, 0,60-1,00 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de PT somente quando comparado a 0,10-0,30 e 0,30-0,60 m. Para Mi, em B6m e B2m os maiores ($p < 0,05$) valores foram encontrados em 0,0-0,10 m, somente quando comparado a 0,60-1,00 m, em B6m, e 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, em B2m. Em B24m, os maiores

($p < 0,05$) valores de M_i foram observados em 0,30-0,60 m somente quando comparado a 0,60-1,00 m.

Figura 14 - Macroporosidade (A), microporosidade (B) e porosidade total (C) do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.2. Resistência à penetração

A Figura 15 apresenta os resultados de resistência à penetração em condições de campo (RP_c), com umidade corrigida para a capacidade de campo (RP_{uc}) e a umidade no momento das coletas, nas profundidades de 0,0-0,60 e 0,0-1,00 m, respectivamente.

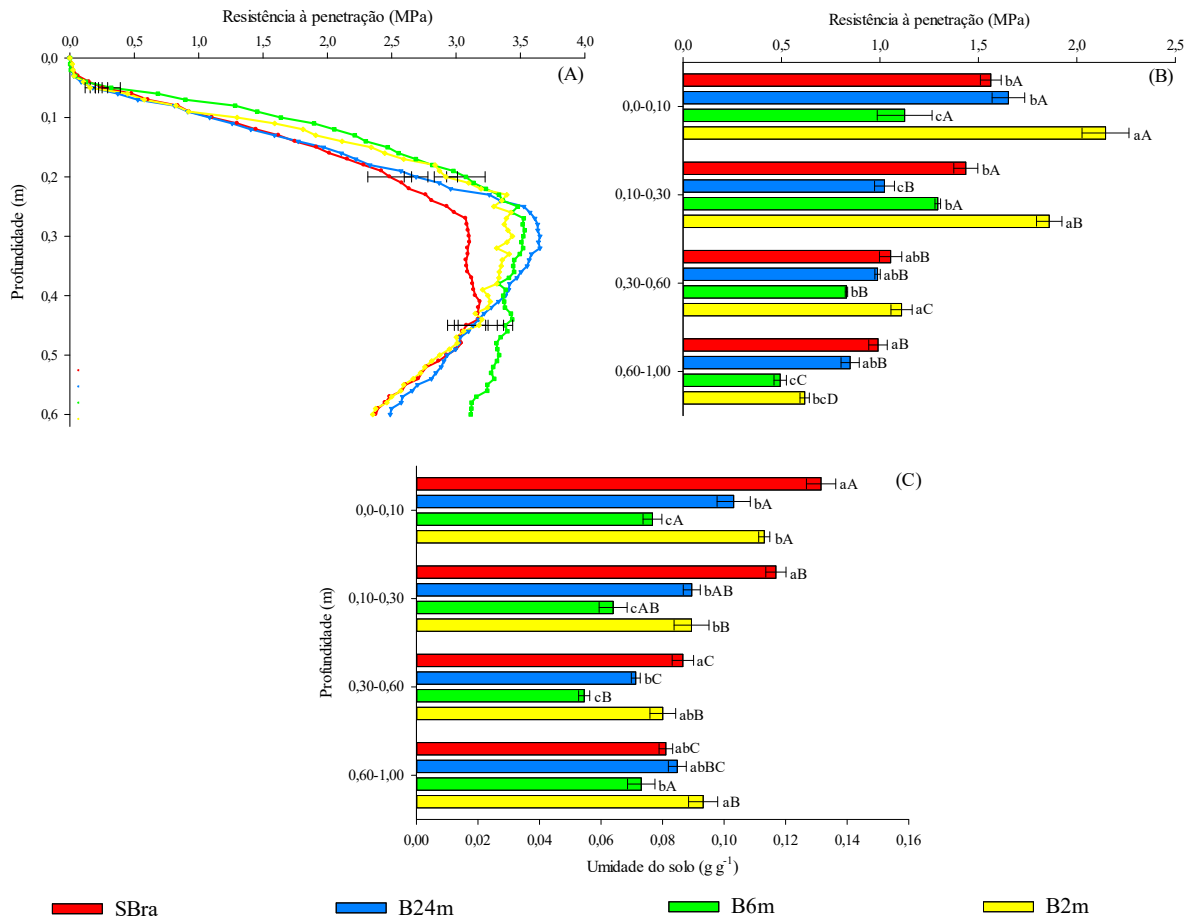
Inicialmente, constatou-se que os comportamentos observados em RP_c e RP_{uc} apresentam valores superiores na primeira variável, comparativamente a segunda, em todas

situações de estudo. Observou-se, de maneira geral, que os maiores valores de RP_c são encontrados em 0,30 m, sendo que SBra, B2m, B6m e B24m atingem o máximo de 3,0 MPa, 3,4 MPa, 3,5 MPa e 3,6 MPa, respectivamente. Para todas as situações de estudo os valores diminuem acentuadamente a partir de 0,40 m, ficando próximos a 2,5 MPa em SBra, B24m e B2m, e um pouco acima de 3,0 MPa em B6m, na profundidade de 0,60 m (Figura 15 - A).

Os valores de umidade do solo influem na comparação de RP_c entre as situações de estudo, já que até a camada estudada (0,0-0,60 m) houve diferenças ($p < 0,05$) em cada profundidade avaliada. De maneira geral, SBra e B2m ($\bar{X}_{Geral} = 0,09$ e $0,08 \text{ g g}^{-1}$, respectivamente) apresentaram os maiores ($p < 0,05$) valores de umidade somente quando comparado a B6m ($\bar{X}_{Geral} = 0,057 \text{ g g}^{-1}$). Nas comparações entre profundidades é possível notar um comportamento comum, em que 0,0-0,10 m apresentou valores superiores ($p < 0,05$), seguido de 0,10-0,30 m. As profundidades 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m apresentaram valores de umidade ($\bar{X}_{Geral} = 0,062 \text{ g g}^{-1}$) semelhantes ($p > 0,05$) e menores ($p < 0,05$) que 0,0-0,10 m ($\bar{X}_{Geral} = 0,095 \text{ g g}^{-1}$) em todas as situações de estudo (Figura 15 - C).

Os valores de RP_{uc} apresentam um comportamento diferente do que ocorreu em RP_c , sendo que B2m apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores em 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m (2,14 e 1,86 MPa, respectivamente) quando comparado às outras situações de estudo, sendo SBra e B24m (1,56 e 1,65 MPa, respectivamente) superiores ($p < 0,05$) a B6m (1,12 MPa) na primeira camada e SBra e B6m (1,43 e 1,29 MPa, respectivamente) superiores ($p < 0,05$) a B24m (1,02 MPa) na segunda camada. Em 0,30-0,60 m, B2m (1,10 MPa) também apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores de RP_{uc} quando comparado a B6m (0,83 MPa). De forma distinta do comportamento supracitado, em 0,60-1,00 m, SBra (0,99 MPa) apresentou os maiores ($p < 0,05$) valores quando comparado a B2m e B6m (0,61 e 0,49 MPa, respectivamente). Nas comparações entre profundidades, B24m e B2m apresentaram os maiores ($p < 0,05$) valores de RP_{uc} em 0,0-0,10 m, sendo para as outras profundidades semelhantes ($p > 0,05$) em B24m e 0,10-0,30 m superior ($p < 0,05$) a 0,30-0,60 m, com esta superior ($p < 0,05$) a 0,60-1,00 m em B2m. SBra e B6m apresentam os maiores ($p < 0,05$) valores de RP_{uc} em 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m quando comparado a 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, com as duas primeiras similares ($p > 0,05$) entre si (Figura 15 - B).

Figura 15 - Resistência à penetração em condições de campo (RP_c), com umidade corrigida para a capacidade de campo (RP_{uc}) e umidade do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de correlação de Pearson entre os valores de RP_c e umidade do solo nas situações de estudo, nas profundidades de 0,0-1,00 m foi ($r = -0,70$; $p < 0,05$), demonstrando que à medida que se diminui a umidade do solo aumenta-se a RP_c . Não foi observada correlação significativa ($p > 0,05$) entre os valores de RP_c e RP_{uc} ($r = 0,02$), além de RP_{uc} e umidade do solo ($r = 0,47$; $p > 0,05$).

8.3. Curva de retenção de água e capacidade de água disponível

A Tabela 7 e a Figura 16 apresentam os resultados dos parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) pelo modelo de van Genuchten, as umidades nas tensões de 10 kPa (θ_{CC}) e 1500 kPa (θ_{PMP}) e os valores de capacidade de água disponível (CAD), das situações de estudo nas profundidades avaliadas, assim como o somatório de CAD de 0,0-1,00 m.

Os valores dos parâmetros de ajuste “ θ_s ”, “ θ_r ”, “ α ”, e “ n ” apresentaram diferenças ($p < 0,05$) entre as situações de estudo em cada uma das profundidades e entre profundidades

para cada situação de estudo. Tais diferenças refletiram nos resultados de umidade (θ) nas tensões que correspondem à capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

Observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores de θ_{CC} em SBra e B2m quando comparado a B24m e B6m, com B24m apresentando maiores ($p < 0,05$) valores que B6m em 0,10, 0-30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m. Em 0,0-0,10 m, B2m foi superior ($p < 0,05$) a SBra, com a última apresentando maiores ($p < 0,05$) valores que B24m e B6m, e as últimas sendo semelhantes ($p > 0,05$). Comportamento parecido foi observado para os valores de θ_{PMP} , com SBra e B2m semelhantes ($p > 0,05$) também e superiores a B24m e B6m, sendo as duas últimas similares ($p > 0,05$) entre si. Em 0,0-0,10 m, SBra, B24m e B2m foram superiores ($p < 0,05$) a B6m e semelhantes ($p > 0,05$) entre si. Não foram encontradas diferenças ($p > 0,05$) entre as situações de estudo nas profundidades 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m para θ_{CC} e em 0,0-0,10; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m para θ_{PMP} . A camada 0,0-0,10 m se destacou apresentando os maiores ($p < 0,05$) valores de θ_{CC} tanto para B6m e B2m, quanto para B24m no θ_{PMP} . A única exceção ao comportamento citado por último foi em SBra para a θ_{CC} , em que as três primeiras profundidades não se diferiram ($p > 0,05$) entre si, sendo superiores ($p < 0,05$) a 0,60-1,00 m.

Tabela 7 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) pelo modelo de van Genuchten e umidade ($m^3 m^{-3}$) na tensão matricial de 10 kPa (θ_{CC}) e 1500 kPa (θ_{PMP}) do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil

Sistema de cultivo	Parâmetros				Umidade ($m^3 m^{-3}$)	
	θ_s	θ_r	α	n	θ_{CC}	θ_{PMP}
0,0-0,10 m						
SBra	0,27 aA	0,05 abB	0,07 aA	1,53 bC	0,18 bA	0,08 aA
B24m	0,23 bA	0,04 bA	0,03 bAB	1,99 aAB	0,14 cA	0,07 aA
B6m	0,24 bA	0,03 cBC	0,08 aA	1,74 abC	0,13 cA	0,05 bA
B2m	0,20 cB	0,06 aC	0,04 bA	1,58 abC	0,21 aA	0,09 aA
0,10-0,30 m						
SBra	0,19 cB	0,05 bB	0,01 cB	2,21 aAB	0,18 aA	0,08 aA
B24m	0,23 bA	0,04 cB	0,03 bAB	1,90 aB	0,14 bA	0,06 bB
B6m	0,26 aA	0,03 cC	0,08 aA	1,86 aBC	0,10 cAB	0,04 bA
B2m	0,20 cB	0,06 aB	0,01 cC	2,20 aB	0,19 aB	0,09 aA
0,30-0,60 m						
SBra	0,23 aA	0,06 aA	0,03 bB	2,04 aB	0,18 aA	0,09 aA
B24m	0,22 aA	0,04 bA	0,02 bB	2,28 aA	0,13 bA	0,07 bAB
B6m	0,25 aA	0,03 cAB	0,05 aB	2,14 aAB	0,10 cB	0,05 bA

B2m	0,24 aAB	0,06 aAB	0,03 bAB	1,90 aBC	0,18 aB	0,09 aA
0,60-1,00 m						
SBra	0,24 aA	0,06 aA	0,02 bB	2,45 bA	0,16 aB	0,09 aA
B24m	0,23 aA	0,04 bA	0,04 aA	2,16 bAB	0,13 bA	0,07 bAB
B6m	0,25 aA	0,04 bA	0,04 aB	2,30 bA	0,09 cB	0,05 bA
B2m	0,25 aA	0,06 aA	0,02 bBC	2,89 aA	0,16 aC	0,09 aA

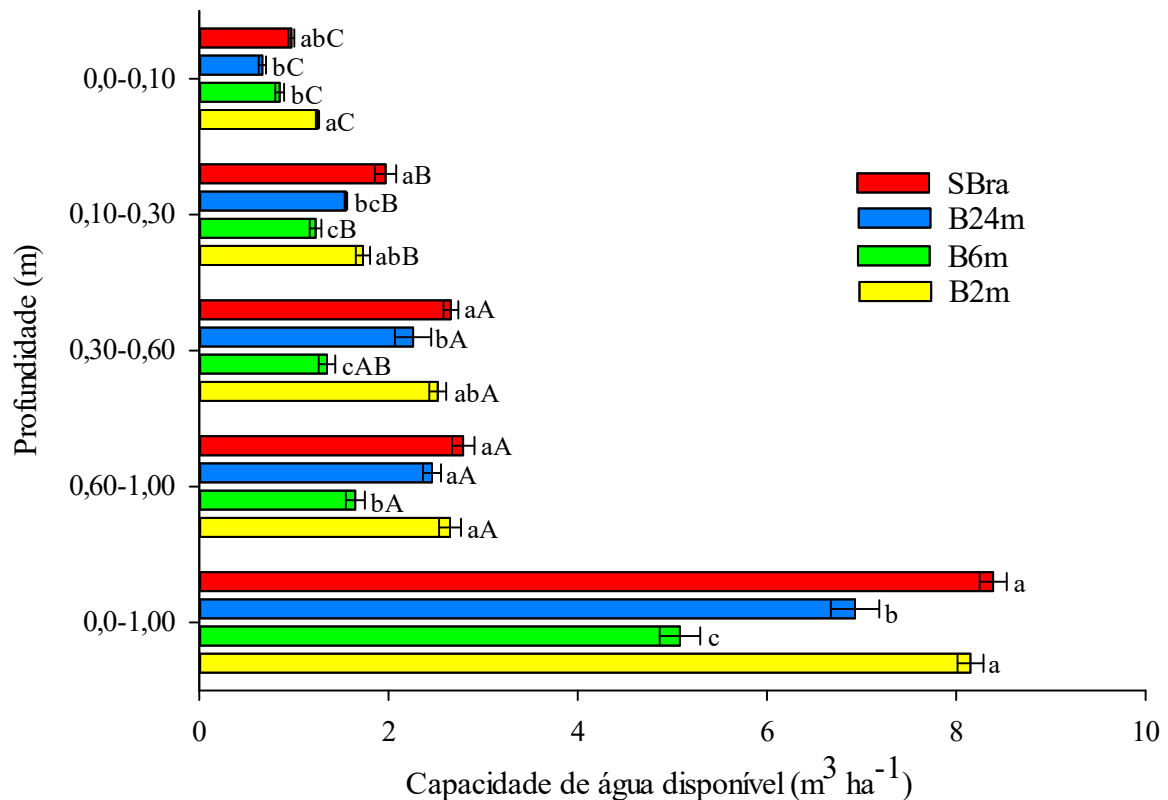
Obs.: θ_s é a umidade de saturação (m^3/m^3); θ_r é a umidade residual (m^3/m^3); α (m^{-1}) e n (adimensional) são parâmetros empíricos de ajuste do modelo de van Genuchten. Foi adotada a relação $m=1-1/n$. Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comportamento comum foi observado para CAD, em que SBra e B2m apresentaram os maiores ($p<0,05$) valores em todas as profundidades estudadas e no somatório de 0,0-1,00 m ($8,0$ e $8,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente). Algumas particularidades foram observadas, onde B24m foi superior ($p<0,05$) a B6m e semelhante ($p>0,05$) às outras situações de estudo em 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, sendo menores ($p<0,05$) que as outras situações, sendo semelhante ($p>0,05$) a B6m em 0,0-1,00 m. No somatório de 0,0-1,00 m, B24m ($7,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) apresentou os menores ($p<0,05$) valores que SBra e B2m e os maiores ($p<0,05$) valores quando comparado a B6m ($5,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

Entre profundidades foi observado um comportamento comum e já esperado em todas as situações de estudo, em que 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m apresentaram maiores ($p<0,05$) valores quando comparado a 0,10-0,30, com esta última sendo superior ($p<0,05$) a 0,0-0,10 m.

Figura 16 - Capacidade de água disponível (CAD) do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.4. Estoques de C e N totais e nas frações da MOS

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados das comparações entre estoques de C e N totais e das frações físicas da matéria orgânica do solo das situações de estudo nas profundidades avaliadas, assim como o somatório dos estoques de 0,0-1,00 m.

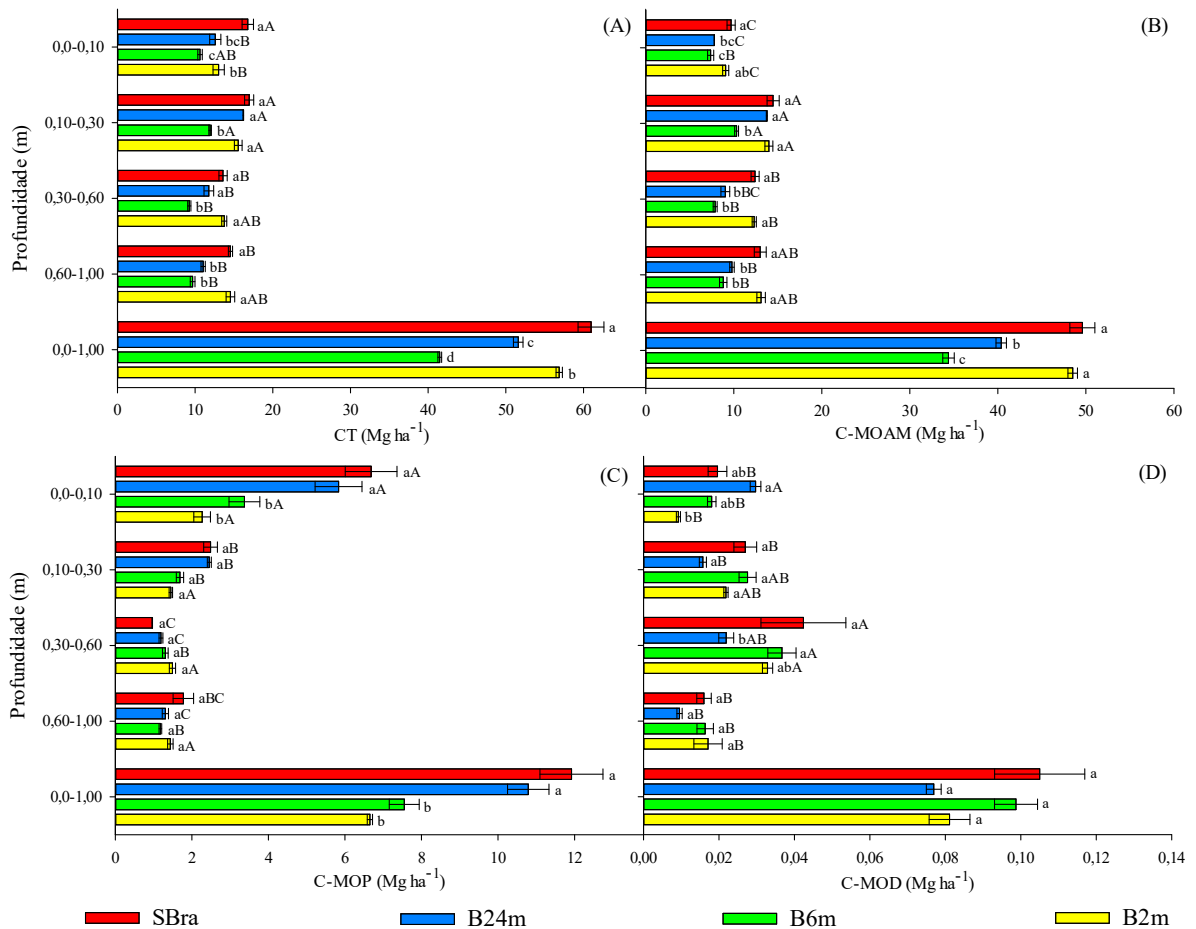
Observou-se os maiores estoques de C-MOAM, NT, N-MOAM e N-MOP em SBra (49,6; 5,2; 3,9 e 1,4 Mg ha⁻¹, respectivamente) e B2m (48,5; 5,1; 3,8 e 1,3 Mg ha⁻¹, respectivamente) quando comparado ($p < 0,05$) aos estoques de B24m (40,3; 4,5; 3,4 e 1,1 Mg ha⁻¹, respectivamente) e B6m (34,4; 3,8; 2,9 e 1,1 Mg ha⁻¹, respectivamente) na camada de 0,0-1,00 m, sendo que as duas primeiras áreas apresentaram valores semelhantes ($p > 0,05$) entre si. Quanto às demais, observaram-se semelhanças entre valores ($p > 0,05$) somente para N-MOP. Para CT e N-MOD foram observadas diferenças ($p < 0,05$) entre todos os sistemas, com destaque para SBra (60,9 e 0,16 Mg ha⁻¹, respectivamente), quando esta apresentou os maiores estoques para ambas as variáveis, sendo que os menores ($p < 0,05$) estoques ocorreram em B6m para CT (41,5 Mg ha⁻¹) e B2m para N-MOD (0,05 Mg ha⁻¹). Para C-MOP, observou-se comportamento diferente do apresentado para as outras variáveis, constatando-se que SBra e B24m (11,9 e 10,8

Mg ha⁻¹, respectivamente) apresentaram os maiores ($p < 0,05$) estoques comparativamente a B6m e B2m (7,5 e 6,6 Mg ha⁻¹, respectivamente). Por fim, na profundidade de 0,0-1,00 m, não foram observadas diferenças estatísticas entre os sistemas de uso no caso de C-MOD ($\bar{X}_{Geral} = 0,9$ Mg ha⁻¹).

Para a grande maioria das variáveis, em 0,0-0,10 m, os maiores ($p < 0,05$) estoques foram observados em SBra, especialmente em CT, NT, C-MOAM, N-MOP e N-MOD (16,8; 1,3; 9,7; 0,5 e 0,07 Mg ha⁻¹, respectivamente). Diferenças ocorreram entre as situações em que os menores estoques foram observados, como em B6m, o qual apresentou os menores ($p < 0,05$) valores para CT, NT e C-MOAM (10,6; 0,9; e 7,4 Mg ha⁻¹, respectivamente), e em B2m os menores ($p < 0,05$) estoques de N-MOD (0,03 Mg ha⁻¹). B6m e B2m apresentaram estoques de N-MOP (0,19 e 0,23 Mg ha⁻¹, respectivamente) semelhantes ($p > 0,05$). Esse comportamento não foi observado nas outras variáveis, sendo SBra e B2m (0,89 e 0,88 Mg ha⁻¹, respectivamente) superiores ($p < 0,05$) a B24m e B6m (0,72 e 0,73 Mg ha⁻¹, respectivamente) em N-MOAM, enquanto SBra e B24m (6,9 e 5,8 Mg ha⁻¹, respectivamente) apresentaram os maiores ($p < 0,05$) estoques de C-MOP comparativamente a B6m e B2m (3,4 e 2,3 Mg ha⁻¹, respectivamente). C-MOD se diferenciou das outras variáveis, em que B24m (0,03 Mg ha⁻¹) se destacou com os maiores ($p < 0,05$) estoques quando comparado a B2m (0,01 Mg ha⁻¹), mas não se diferenciou ($p > 0,05$) de SBra e B6m (0,018 e 0,019 Mg ha⁻¹, respectivamente).

Para 0,10-0,30 m, a maioria das variáveis (CT, NT, C-MOAM e N-MOP) apresentaram semelhanças ($p > 0,05$) entre SBra, B24m e B2m ($\bar{X}_{Geral} = 16,1; 1,38; 13,7$ e $0,28$ Mg ha⁻¹, respectivamente), sendo que estes apresentaram os maiores ($p < 0,05$) estoques quando comparado a B6m (11,9; 0,9; 10,3 e 0,18 Mg ha⁻¹, respectivamente). Para N-MOAM, a única exceção ao observado anteriormente, SBra (1,24 Mg ha⁻¹) foi superior ($p < 0,05$) a B24m e B2m (1,08 e 1,10 Mg ha⁻¹, respectivamente), além de B6m (0,81 Mg ha⁻¹). N-MOD apresentou um comportamento muito similar ao de N-MOAM, com a única diferença de que B2m (0,019 Mg ha⁻¹) apresentou os menores ($p < 0,05$) estoques e SBra (0,054 Mg ha⁻¹) os maiores ($p < 0,05$) valores novamente. Não houve diferenças ($p > 0,05$) entre os sistemas de manejo para C-MOP ($\bar{X}_{Geral} = 1,9$ Mg ha⁻¹) e C-MOD ($\bar{X}_{Geral} = 0,023$ Mg ha⁻¹).

Figura 17 - Estoques de carbono total (CT) (A), C da matéria orgânica associada a minerais (C-MOAM) (B), da matéria orgânica particulada (C-MOP) (C) e da matéria orgânica dissolvida (C-MOD) (D) do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na profundidade de 0,30-0,60 m constatou-se o mesmo comportamento de N-MOAM na camada de 0,0-0,10 m, quando se avaliaram NT, C-MOAM, N-MOAM e C-MOD, em que SBra e B2m ($\bar{X}_{G\text{eral}} = 1,22; 12,3; 0,95$ e $0,038$ Mg ha⁻¹, respectivamente) apresentaram, igualmente, os maiores ($p < 0,05$) estoques quando comparado a B24m e B6m ($\bar{X}_{G\text{eral}} = 0,81; 8,4; 0,68$ e $0,028$ Mg ha⁻¹, respectivamente). Para CT e N-MOP houve semelhanças ($p > 0,05$) entre SBra, B24m e B2m ($\bar{X}_{G\text{eral}} = 12,7$ e $0,31$ Mg ha⁻¹, respectivamente), sendo que estes apresentaram os maiores ($p < 0,05$) estoques quando comparado a B6m ($9,2$ e $0,19$ Mg ha⁻¹, respectivamente). Diferentemente de outras variáveis, os maiores ($p < 0,05$) estoques de N-MOD ainda foram observados em SBra ($0,015$ Mg ha⁻¹), sendo que B6m e B2m ($\bar{X}_{G\text{eral}} = 0,005$ Mg ha⁻¹) não se diferiram estatisticamente, mas com os menores ($p < 0,05$) estoques. C-MOP ($\bar{X}_{G\text{eral}} = 1,28$ Mg ha⁻¹) não apresentou diferenças ($p > 0,05$) entre os sistemas de manejo avaliados.

Entre as situações estudadas, não foram observadas diferenças ($p > 0,05$) em NT ($\bar{X}_{Geral} = 1,25 \text{ Mg ha}^{-1}$), C-MOP ($\bar{X}_{Geral} = 1,45 \text{ Mg ha}^{-1}$) e C-MOD ($\bar{X}_{Geral} = 0,015 \text{ Mg ha}^{-1}$) na profundidade de 0,60-1,00 m. Já para CT e C-MOAM foi observado que SBra e B2m ($\bar{X}_{Geral} = 13,5$ e $13,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente) apresentaram, igualmente, os maiores ($p < 0,05$) estoques comparativamente a B24m e B6m ($\bar{X}_{Geral} = 10,5$ e $9,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). Para N-MOAM não foram observadas diferenças ($p > 0,05$) entre SBra, B24m e B2m ($\bar{X}_{Geral} = 0,83 \text{ Mg ha}^{-1}$), mas, estes apresentaram maiores ($p < 0,05$) estoques que B6m ($0,66 \text{ Mg ha}^{-1}$). Em N-MOD, o mesmo comportamento observado na profundidade anterior (0,30-0,60 m) foi apresentado, em que os maiores ($p < 0,05$) estoques foram observados em SBra ($0,018 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo que entre B6m e B2m ($\bar{X}_{Geral} = 0,003 \text{ Mg ha}^{-1}$) não houve diferenças estatísticas significativas, sendo que estas também apresentaram os menores ($p < 0,05$) estoques. Para N-MOP, contrariamente ao apresentado nas outras profundidades, B6m ($0,55 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentou os maiores ($p < 0,05$) estoques quando comparado aos outros sistemas de manejo.

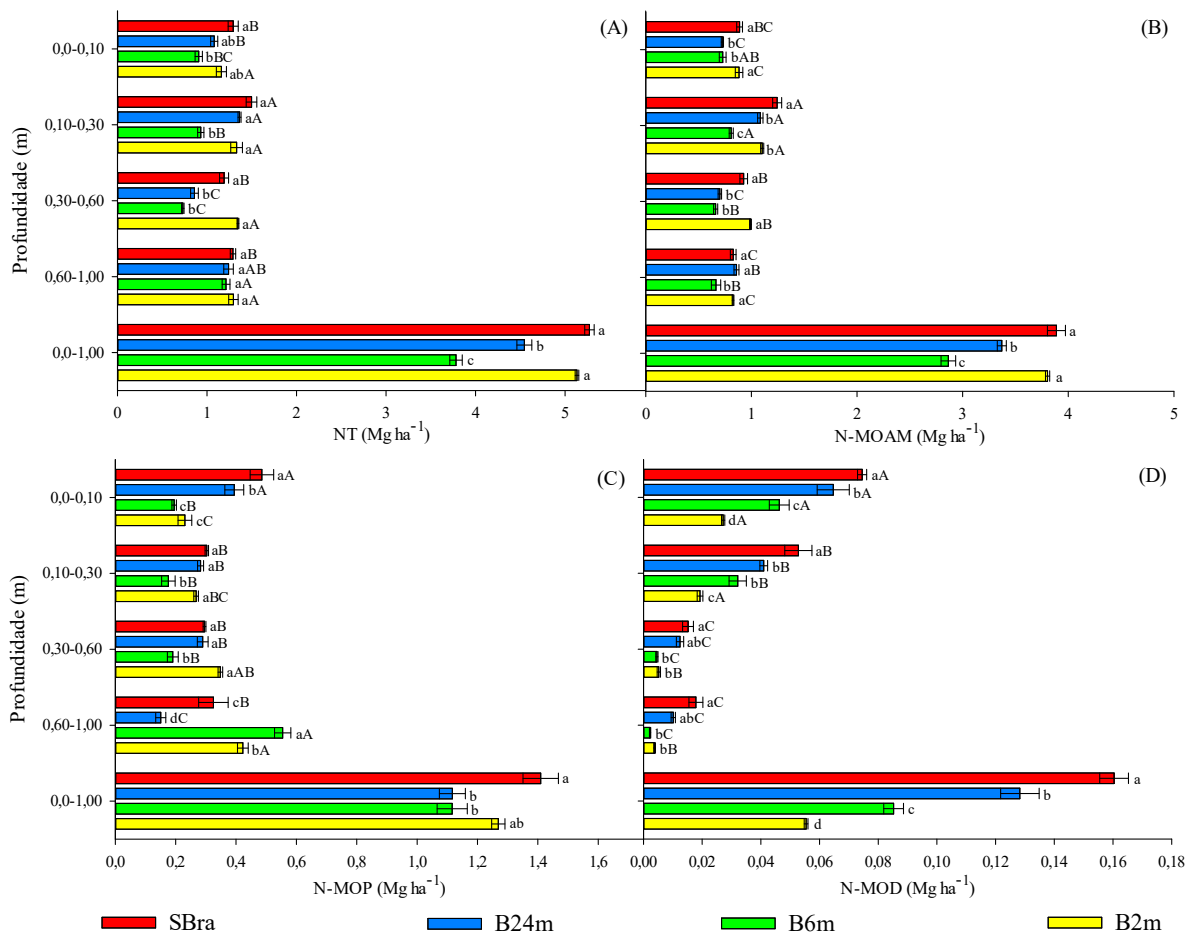
Quando comparadas as profundidades, destacam-se os maiores ($p < 0,05$) estoques em 0,10-0,30 m para CT, C-MOAM e N-MOAM nas quatro situações estudadas (SBra, B24m, B6m e B2m), comparativamente a 0,0-0,10 m e nas profundidades maiores que 0,30 m, sendo essas semelhantes ($p > 0,05$) na maioria das situações. A única exceção é para SBra na variável CT, em que 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m são iguais estatisticamente. Para NT, SBra e B24m apresentaram o mesmo comportamento observado anteriormente, com B6m e B2m demonstrando comportamentos distintos, onde o primeiro apresentou os maiores ($p < 0,05$) estoques em 0,60-1,00 m, enquanto o segundo apresentou estoques semelhantes ($p > 0,05$) nas quatro profundidades.

Quanto a C-MOP e N-MOP, constatou-se os maiores ($p < 0,05$) estoques em 0,0-0,10 m para a maioria das situações, sendo diferentes em B6m e B2m para N-MOP, onde a profundidade 0,60-1,00 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) estoques. Não houve diferenças ($p > 0,05$) entre as profundidades em B2m para C-MOP.

Para N-MOD foi observado o mesmo comportamento em praticamente todas as situações de estudo, onde 0,0-0,10 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) estoques, seguida de 0,10-0,30 m, e das últimas duas profundidades sendo iguais estatisticamente. A única exceção foi em B2m, em que 0,0-0,10 e 0,10-0,30 m não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) nos estoques. Já para C-MOD não foi observado um comportamento comum a todas as situações, sendo que 0,30-0,60 m apresentou os maiores ($p < 0,05$) estoques em SBra, B6m e B2m, sendo diferente apenas em B24m. Nesse último caso, os maiores ($p < 0,05$) estoques foram observados em 0,0-

0,10 e 0,10-0,30 m, respectivamente. De maneira geral, as profundidades 0,10-0,30 e 0,60-1,00 m não se diferiram e apresentaram os menores ($p < 0,05$) estoques em todas as situações.

Figura 18 - Estoques de nitrogênio total (NT) (A), N da matéria orgânica associada a minerais (N-MOAM) (B), da matéria orgânica particulada (N-MOP) (C) e da matéria orgânica dissolvida (N-MOD) (D) do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras horizontais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.5. Atividade de enzimas do solo

A Figura 19 apresenta os resultados das comparações entre as atividades enzimáticas do solo das situações de estudo, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,30-0,60 m.

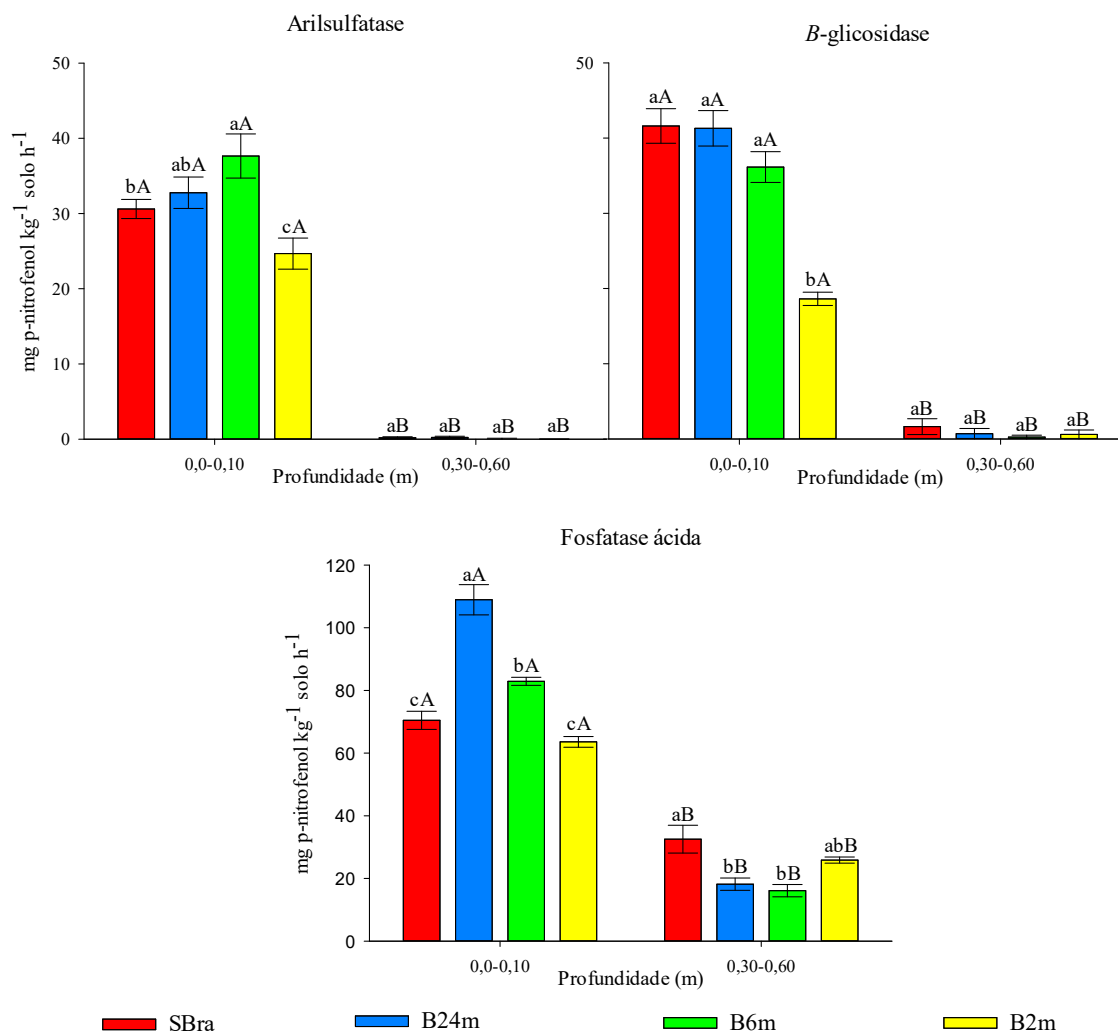
Na profundidade 0,0-0,10 m observou-se os maiores valores ($p < 0,05$) de atividade da arilsulfatase em B6m ($37,6 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), porém similar ($p > 0,05$) a B24m ($32,7 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), sendo este (B24m) também semelhante ($p > 0,05$) a SBra ($30,6 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), sendo este (B24m) também semelhante ($p > 0,05$) a SBra ($30,6 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), sendo este (B24m) também semelhante ($p > 0,05$) a SBra ($30,6 \text{ mg } p\text{-nitrofenol kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$).

p-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}). Os menores valores ($p < 0,05$) de atividade desta enzima foram observados em B2m (24,7 mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}). Para β -glicosidase foi constatado outro comportamento, onde os maiores valores ($p < 0,05$) foram observados em SBra, B24m e B6m ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 39,4$ mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}) quando comparado a B2m (18,6 mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}), com os três primeiros não apresentando diferenças significativas. Também diferente foi o comportamento da atividade da fosfatase ácida, onde os maiores valores ($p < 0,05$) foram observados em B24m (108,9 mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}), seguido de B6m (82,9 mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}), com este segundo apresentando maior ($p < 0,05$) atividade que SBra e B2m ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 66,7$ mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}). SBra e B2m não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) entre si.

A camada de 0,30-0,60 m apresentou o mesmo comportamento de atividade para arilsulfatase e β -glicosidase, não havendo diferenças ($p > 0,05$) entre as situações estudadas. Porém, para a fosfatase ácida observou-se os maiores ($p < 0,05$) valores em SBra (32,5 mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}), somente quando comparado a B24m e B6m ($\bar{X}_{\text{Geral}} = 17,4$ mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}), sendo que esses dois últimos não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) entre si. Quanto a SBra, este foi similar ($p > 0,05$) a B2m (25,8 mg *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1}).

Nas comparações entre as duas profundidades avaliadas observou-se o comportamento esperado de atividade enzimática para arilsulfatase, β -glicosidase e para a fosfatase ácida. Constatou-se os valores superiores destas ($p < 0,05$) em 0,0-0,10 m quando comparado a 0,30-0,60 m.

Figura 19 - Atividades de arilsulfatase, β -glicosidase e fosfatase ácida do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil.



Letras minúsculas comparam os sistemas em cada profundidade e letras maiúsculas comparam as profundidades dentro de cada sistema. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.6. Análise de componentes principais (PCA)

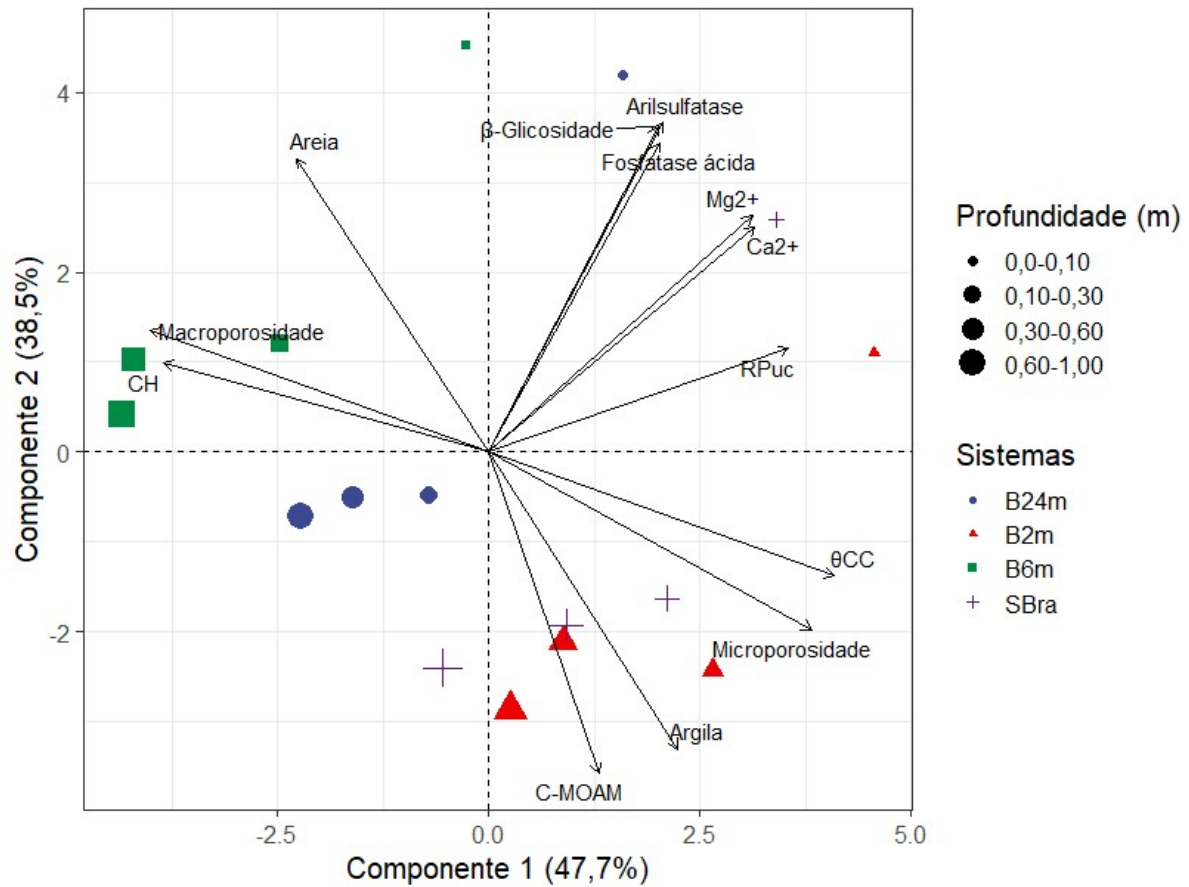
Inicialmente, foram utilizadas as seguintes variáveis para compor a análise de componentes principais (PCA), nas diferentes situações de estudo e nas quatro profundidades avaliadas: areia, argila, argila dispersa em água (ADA), densidade de partículas (Dp), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência à penetração em campo (RP_c), resistência à penetração com umidade corrigida a 10 kPa (RP_{uc}), condutividade hidráulica com solo saturado (CH), umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), capacidade de água disponível (CAD), pH H₂O, fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), acidez potencial (H+Al), fósforo remanescente (P-Rem), carbono total (CT), carbono da matéria orgânica particulada (C-MOP), carbono da matéria orgânica associada a minerais (C-MOAM), carbono da matéria

orgânica dissolvida (C-MOD), nitrogênio total (NT), nitrogênio da matéria orgânica particulada (N-MOP), nitrogênio da matéria orgânica associada a minerais (N-MOAM), nitrogênio da matéria orgânica dissolvida (N-MOD), arilsulfatase, β -Glicosidade e fosfatase ácida.

Foram excluídas, sucessivamente, as variáveis que não atingiram autovetores iguais ou superiores a 0,7 ($r \geq 0,7$). A partir disso, os componentes 1 (CP1) e 2 (CP2), explicaram 86,2% da variância total dos dados, em que o CP1 explica 47,7% e o CP2 comporta 38,5% da variância (Figura 20). As variáveis físicas M_i ($r = 0,87$) e θ_{CC} ($r = 0,93$) se correlacionaram negativamente com a M_a ($r = -0,91$) e CH ($r = -0,88$), todas explicadas pelo CP1. A argila ($r = -0,75$) e C-MOAM ($r = -0,82$) foram correlacionadas positivamente entre si, sendo que a argila se correlacionou negativamente com os valores de areia ($r = 0,74$), todas explicadas pelo CP2. A variável RP_{uc} ($r = 0,81$) se correlacionou positivamente com os teores de Ca^{2+} ($r = 0,72$) e Mg^{2+} ($r = 0,71$), comportadas no CP1. As enzimas arilsulfatase ($r = 0,84$), β -glicosidade ($r = 0,83$) e fosfatase ácida ($r = 0,79$) se correlacionaram positivamente, com a variância explicada pelo CP2.

Nas profundidades avaliadas, observou-se em 0,0-0,10 m, uma maior associação e agrupamento de B24m e SBra pelas variáveis biológicas (CP2), em B6m pelos teores de areia (CP2), e em B2m pela RP_{uc} (CP1). A variância em B6m nas outras profundidades (0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m) está fortemente relacionada a M_a e CH , explicada pelo CP1. Em B24m, a variância está associada também com a M_a e CH , comportada no CP1, mas menos relacionada que B6m. Para SBra e B2m, nas três últimas profundidades avaliadas (0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m), observou-se uma influência da variância dos dados pelas variáveis C-MOAM, argila, M_i e θ_{CC} , comportadas no CP1 e CP2. As variáveis com menor importância para a variação dos dados foram: CH , areia, C-MOAM e RP_{uc} .

Figura 20 - Dispersão gráfica de variáveis físicas (M_a , M_i , CH , RP_{uc} , areia, argila e θ_{CC}), químicas (C-MOAM, Ca^{2+} e Mg^{2+}) e biológicas (arilsulfatase, β -glicosidade e fosfatase ácida) do solo em sistemas de cultivo de cereais sem uso de braquiária em sucessão (SBra), com braquiária implantada há 24 meses (B24m), há seis meses e dessecada (B6m) e com braquiária implanta há dois meses e ainda viva (B2m), nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-1,00 m, Lagoa Grande - MG, Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor.

9. DISCUSSÃO

9.1. Atributos físicos

Atributos de qualidade física do solo, como densidade do solo (D_s) (Figura 12), condutividade hidráulica (CH) com solo saturado (Figura 13), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) (Figura 14), não foram influenciados pelo tempo de permanência da braquiária, estando relacionados à outras características dos solos. A D_s não apresentou diferenças para as situações de estudo em cada uma das profundidades avaliadas. Outros autores observaram que, mesmo com maior tempo de uso de sistemas conservacionistas, não houveram mudanças na densidade do solo em áreas de cereais, em diferentes camadas (0,0-0,05; 0,05-0,15 e 0,15-0,30 m) (ROY et al., 2022). No entanto, analisando a média geral das profundidades, foi verificado que as primeiras camadas de solo (0,0-0,10 e 0,10-0,30 m) apresentaram maiores valores de D_s , quando comparado com as demais. Apesar de maiores nas primeiras camadas, em se tratando de solos de textura arenosa a média, os valores de D_s não foram limitantes ao desenvolvimento das culturas ($< 1,8 \text{ g cm}^{-3}$), segundo Reichert et al. (2003).

Os valores de CH do solo, que, nos primeiros 0,30 m apresentaram valores menores do que nas últimas, corroboram os maiores valores de Ds. Valores de CH moderadamente rápida (62,5 a 125 mm h⁻¹) apresentados nas primeiras camadas, e rápidas (125 a 250 mm h⁻¹) apresentadas nas últimas profundidades (FREIRE et al., 2003) para a maioria das situações, podem ser explicadas pelo cultivo mínimo adotado nas áreas, que favorece a compactação das camadas superficiais devido ao trânsito de máquinas agrícolas (BONETTI et al., 2015). Outro fator relevante está associado aos teores de argila dos sistemas de uso (Tabela 4), que foram decisivos no comportamento dos atributos físicos do solo. Os menores valores de CH observados em SBra e B2m, principalmente nas primeiras camadas (0,0-0,10 e 0,10-0,30 m) demonstram a menor resiliência do solo às pressões exercidas quando há um aumento nos teores de argila (CENTENO et al., 2017).

Analisando de forma pontual os sistemas B24m e B6m, mesmo com menores teores de argila, apresentaram um comportamento distinto, apesar de ambos terem a braquiária fazendo parte da sucessão. Seguindo a classificação de Freire et al. (2003), nota-se que B6m apresentou valores de CH (322,1 mm h⁻¹) muito rápida (acima de 250 mm h⁻¹), e B24m (143,9 mm h⁻¹) rápida (125 a 250 mm h⁻¹). Nesse caso a comparação é válida, pois neste sistema (B6m) a braquiária encontrava-se dessecada, favorecendo a formação de bioporos pela morte das raízes, que melhoraram a troca gasosa e infiltração de água (CALONEGO; ROSOKEM, 2008; PRANDO et al., 2010). O sistema B2m apresentou os menores valores médios de CH (79,7 mm h⁻¹), que pode ser explicado pela pressão exercida no solo devido a recente colheita do milho, se utilizando de maquinário agrícola pesado (BONETTI et al., 2015) e pela menor resiliência do solo, de acordo com sua classificação (vide histórico de uso). Em B24m (143,9 mm h⁻¹), o valor médio da CH cai em torno de 45% em comparação ao sistema B6m, evidenciando o efeito da contribuição das raízes da braquiária em detrimento de uma área em que a planta não estava presente no momento, na mesma classe de solo.

Os dados de Ma, Mi e PT (Figura 14) evidenciam novamente que o sistema de manejo com o uso da braquiária melhora a qualidade física do solo. Nas camadas superiores, especialmente 0,10-0,30 m, o sistema B6m foi superior aos demais, sendo que o sistema SBra não difere do B2m para a Ma, também influenciado pelos maiores teores de argila, característicos dessas duas áreas. Esse comportamento é o mesmo observado nos resultados encontrados para as variáveis anteriores discutidas (Ds e CH). Para a Mi, os resultados foram semelhantes, porém, com relação inversa, em que SBra e B2m apresentaram os maiores valores. É importante verificar que o sistema B6m apresentou valores de Ma em todas as profundidades superiores aos indicados por Stepniewski et al. (2002), que citam que uma boa aeração no solo

corresponde a um volume de Ma de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, uma troca gasosa limitada entre $0,10$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e uma aeração deficiente abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Percebe-se que os sistemas com B2m e SBra apresentaram valores mais próximos desta limitação nas duas primeiras profundidades ($0,0-0,30 \text{ m}$). Nota-se, ainda, que em SBra não há diferenças na Mi do solo em todo o seu perfil, tendo os valores maiores, assim como em B2m, quando comparam-se os sistemas em cada uma das profundidades. Contudo, B2m apresentou valores bem menores de Ma na primeira camada, enquanto que a Mi foi superior às outras áreas. Tal comportamento reafirma que a recente colheita do milho teve um efeito momentâneo acentuado nos atributos físicos desta camada. Spera et al. (2004) estudando o efeito de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos do solo e na produtividade, atribuiu às alterações na Ma do solo, principalmente nas camadas superficiais ($0,0-0,05 \text{ m}$ e $0,10-0,15 \text{ m}$) ao trânsito acumulado de máquinas agrícolas. A PT apresentou um comportamento comum até a terceira camada estudada, em que B6m obteve os maiores valores, e melhor distribuição dos poros, o que é constatado por outros autores. Oliveira et al. (2020) citam que a braquiária vem sendo utilizada como alternativa ao uso de implementos agrícolas para movimentação do solo, por esta apresentar sistema radicular vigoroso e que promove uma descompactação biológica, criando um ambiente radicular favorável ao desenvolvimento de culturas comerciais na mesma profundidade. Estas plantas são melhor aproveitadas quando cultivadas e, após atingir seu máximo desenvolvimento vegetativo, são cortadas, acamadas na superfície ou incorporadas ao solo, servindo como adubação verde (SOUZA et al., 2014).

Cabe destacar que os teores de argila em SBra e B2m, superiores aos observados em B24m e B6m foram decisivos para o comportamento da maioria dos atributos físicos do solo, já que a fração argila é determinante em algumas características do solo, como a retenção, disponibilidade e movimento de água no solo, além da proporção de Ma e Mi, em que à medida que se aumenta os teores de argila, há um aumento da Mi, sendo a Ma associada à solos mais arenosos (RIBEIRO et al., 2012). Nas duas classes de solos distintas estudadas, apesar da influência dos teores de argila, é perceptível a contribuição positiva das raízes da braquiária para a melhoria dos atributos físicos do solo, quando se constata os maiores valores de CH e Ma observados em B6m quando comparado a B24m, duas áreas pertencentes à mesma classe de solo.

De acordo com Leão et al. (2004) os resultados de RP_c (Figura 15 - A) apontaram valores considerados elevados ($> 2,5 \text{ MPa}$) a partir de $0,20 \text{ m}$, onde desenvolvimento radicular das culturas pode ser prejudicado, para todas as situações de manejo. No entanto nota-se que o sistema SBra e B2m apresentaram-se menos resistentes à penetração em comparação aos

demais, diferente do que era esperado para B6m, que apresentou valores maiores de CH e Ma, quando comparado às demais áreas. Tal resposta pode ser explicada pelo valor de umidade do solo (g g^{-1}) no momento das coletas (Figura 15 - C), pois apresentaram os maiores valores em todas as profundidades. A correção da umidade do solo nesta situação levou aos resultados encontrados para RP_{uc} (Figura 15 - B), que apresentou valores abaixo do considerado limitante ao desenvolvimento das culturas, em todas as profundidades, o que evidencia a influência da umidade do solo nos valores de RP_c . Os coeficientes de correlação e significâncias do teste de Pearson contribuíram para tal justificativa, apresentando valores elevados de correlação negativa e significativos ($p < 0,05$) entre a umidade do solo e a RP_c (SILVEIRA et al., 2010), ou seja, quando ocorre a diminuição da umidade do solo em campo, a resistência à penetração aumenta. A princípio, notou-se comportamentos esperados de resistência à penetração dos solos, ocorrendo uma diminuição com o aumento da profundidade e da umidade do solo. Cabe destacar que as primeiras profundidades (0,0-0,30 m) em B2m, apresentaram os maiores valores de RP_{uc} , mostrando que a entrada recente de maquinário agrícola na área pode ter influenciado neste comportamento. Já o sistema B6m apresentou menores valores a partir de 0,30 m de profundidade, justificando novamente que a recente morte das raízes da braquiária deste sistema favoreceu a melhor agregação deste solo, permitindo uma menor resistência à penetração (REICHERT et al., 2007). Percebe-se que existe um legado da braquiária no sistema B24m, pois, apesar de ser o sistema que possui maior tempo sem a sua sucessão, este apresentou menor valor de RP_{uc} na profundidade de (0,10-0,30 m).

A equação de van Genuchten se mostra satisfatória na estimativa da curva de retenção de água (CRA) para a grande maioria dos solos (SHARMA et al., 2006). No presente trabalho, visando evitar erros na determinação da macroporosidade e porosidade total, decidiu-se por determinar apenas os valores de microporosidade a partir do modelo de van Genuchten (1980), pois este mostra-se instável numericamente nas faixas de tensão matricial muito baixas (SCHAAP; VAN GENUCHTEN, 2005). As diferenças encontradas entre os sistemas de uso do solo em cada profundidade mostraram a necessidade de melhor aproveitar os resultados que a CRA pode fornecer.

A capacidade de água disponível (CAD) do solo (Figura 16) não foi influenciada pelo tipo de sistema adotado. SBra e B2m tiveram comportamentos parecidos, apresentando maiores valores de CAD até 1,00 m de profundidade, podendo estar relacionado a maior M_i na camada 0,60-1,00 m (de maior espessura), também estando relacionada aos maiores teores de argila, quando comparado a B24m e B6m. As diferenças apresentadas entre B24m e B6m também podem ter sido influenciadas pela pequena diferença nos teores de argila (Tabela 1), um pouco

superiores em B24m. Segundo Barrento et al. (2011), a CAD representa todo o volume de água disponível às culturas a uma dada camada, sendo um importante índice para avaliação do manejo da irrigação em área de produção agrícola (SOUZA; REICHARDT, 1996; BONOMO et al., 2013), sendo alterada com mudanças na Mi e na Ds.

Conforme a hipótese levantada neste trabalho, o uso de braquiária favoreceu a melhoria dos atributos físicos do solo, mas em algumas condições específicas. Os sistemas de sucessão usando a braquiária não provocaram mudanças na Ds, mas a braquiária após ser dessecada (B6m) favoreceu muito a CH, devido a melhor estruturação do solo e aumento da Ma, tanto em superfície, quanto em profundidade. Mas, é necessário atentar para o uso sustentável da braquiária, haja vista que o sistema que a colheita do milho havia sido realizada recentemente (B2m) apresentou valores muito baixos de CH e Ma, além de maiores valores de RP_{uc} em camadas superficiais. Os sistemas que apresentaram maiores valores de Mi (SBra e B2m) também apresentaram uma maior CAD, influenciadas principalmente pelos teores de argila, e não pela inserção da braquiária nos sistemas.

9.2. Estoques de C e N nas frações da MOS

É esperado que, através do manejo conservacionista do solo com o uso de plantas de cobertura, haja uma manutenção e aumento dos estoques de C e N totais, além de suas frações. Nos resultados aqui encontrados (Figuras 17 e 18), observou-se que o sistema SBra apresentou maiores estoques de CT e NT na camada de 0,0-1,00 m, com NT não diferindo do sistema B2m. O sistema SBra apresentou valores superiores de CT e NT em cerca de 32% e 27%, respectivamente, em relação ao sistema com os menores estoques (B6m). Houve comportamento similar para o estoque de C-MOAM para os sistemas de manejo, no entanto, o sistema SBra apresentou semelhanças ao B2m tanto em C-MOAM quanto em N-MOAM, indicando que estes sistemas possuem uma maior capacidade em armazenar estes nutrientes na fração da MOAM, mas pelo fato de apresentarem maiores teores de argila, e que estas partículas coloidais apresentam maior potencial de adsorver C (COTRUFO et al., 2022). Nos solos de textura arenosa (B24m e B6m), o legado das rotações feitas na área (TIEMANN et al., 2015; LINTON et al., 2020) tem alta influência nos estoques destes elementos, contribuindo para maiores estoques totais no perfil do solo, o que é observado nos valores superiores de CT e C-MOAM em B24m quando comparado a B6m.

Quando se analisa os sistemas de sucessão de culturas, nota-se que o sistema SBra, teve o plantio da soja duas vezes nas últimas quatro safras e o sistema B2m teve o plantio da soja por uma safra, seguida de algodão e milho + braquiária. O fato de B6m apresentar as menores

médias nos estoques destes nutrientes pode estar relacionado aos últimos ciclos de plantio com o uso de plantas com alta relação C/N (milho + braquiária e braquiária) (TRINSOUTROT et al., 2000), que pode ter favorecido a perda de N pela a atividade microbiana do solo neste sistema. Isso ocorre principalmente quando o resíduo deixado no solo constitui pouco recurso para a microbiota, fazendo com que a mesma utilize o nutriente estocado no solo como fonte de energia para decompor este material, conseqüentemente, os estoques da MOAM destes sistemas sofrem poucas alterações a curto prazo. A microbiota do solo, para conseguir degradar os resíduos que possui alta relação C/N, consome a MOS nativa em busca de nitrogênio, em um processo denominado *efeito priming* positivo (Kuzyakov, 2010). B24m apresentou valores de CT superiores somente a B6m, e este resultado reafirma que o tipo de cultura antecessora tem influência direta sobre estes nutrientes no solo, pois na última safra de B24m havia o plantio da soja, que pode ter favorecido um rápido incremento destes nutrientes ao solo, como observado nos estoques de C-MOP na primeira camada (0,0-0,10 m), pelo fato desta cultura possuir uma baixa relação C/N (16-18) (SPAGNOLLO et al., 2002), facilitando a decomposição destes materiais (BERTOL et al., 2004). Neste processo, parte do C pode ser perdido como CO₂ e a outra parte incorporada ao solo (SIX et al., 2006), além da soja contribuir para o aumento de N no solo via fixação biológica (WANG et al., 2020). A dinâmica do N no solo tem relação direta com a decomposição dos resíduos e dos processos de estabilização da MOS. A composição dos resíduos, quando estes são mais lábeis (menor relação C/N), tendem a influenciar um *efeito priming* negativo (sequestro e estoque de C), já em resíduos mais recalcitrantes, tendem a influenciar um *efeito priming* positivo (perda de C no sistema), forçando a degradação da MOS já existente (COTRUFO et al., 2013).

A quantificação da matéria orgânica particulada (MOP) serve como indicador precoce e é importante para verificar as tendências de incorporação de C e N aos estoques pelo manejo do solo ou das culturas (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; LEHMAN et al., 2015). Avaliando-se o somatório das frações (0,0-1,00 m) do C-MOP e o N-MOP, percebe-se que os sistemas SBra e B2m novamente se sobressaíram em comparação aos demais. Verificou-se que SBra e B2m foram influenciados pela cultura antecessora, haja vista que a MOP é uma fração que é facilmente adquirida ou perdida no solo em função do manejo adotado. A falta da presença da planta de cobertura não prejudicou os estoques de C-MOP, pois a resteva da soja, com menor relação C/N em comparação aos demais sistemas, contribuiu para o aumento dos estoques de C e N da MOP (*efeito priming* negativo). Para o N-MOP, os sistemas B24m e B6m apresentaram menores médias frente a SBra, o que justifica novamente a hipótese de que o uso de leguminosas (soja), favorece o incremento de C e N a curto prazo. O uso de leguminosas no

sistema de cultivo aumenta o C no solo, melhorando o rendimento das culturas, e diminuindo o uso de N mineral demandado para cultura subsequente (CONGREVES et al., 2015; GAUDIN et al., 2015). Alguns autores (TIEMANN et al., 2015; LINTON et al., 2020; ZHAO et al., 2020; AGNIHOTRI et al., 2021) afirmam que os sistemas de cultivo diversificados (rotação de culturas, cultivos múltiplos) melhoram a estrutura do solo, formando um ambiente mais favorável, aumentando o carbono do solo e o nitrogênio total.

A matéria orgânica dissolvida (MOD) é formada por um complexo de moléculas orgânicas de vários tamanhos, não tendo uma identidade química específica (SOLINGER et al., 2001; VITALE; DI GUARDO, 2019). A MOD possui estruturas que contém nutrientes como carbono, nitrogênio e fósforo, de tal forma que a dinâmica da MOD afeta a disponibilidade e mobilidade destes nutrientes no solo (KAISER et al., 2001). No presente estudo foi verificado que, para o C-MOD na camada de 0,0-1,00 m, os sistemas que possuíam a soja como cultura antecessora (SBra e B2m) não diferiram dos demais sistemas adotados (B24m e B6m), isso se deve ao fato de os resíduos presentes nestas áreas possuírem alta relação C/N (milho e braquiária), que, segundo Gmach et al. (2020), contribuem para que haja aumento na taxa de C-MOD pela quantidade de fontes de C no meio. Para N-MOD, houve um comportamento diferente do encontrado no C-MOD, em que os sistemas com o cultivo da soja como cultura antecessora apresentaram maiores médias frente aos demais sistemas, o que pode estar relacionado ao aumento deste nutriente no solo pela exsudação das raízes, através do processo de fixação biológica de nitrogênio. Smith et al. (2016) e Wang et al. (2020) citam que os efeitos positivos na fertilidade do solo em sistemas de manejo baseados no cultivo de leguminosas foram atribuídos a um legado dessas plantas, fornecendo N na forma disponível via fixação biológica. Zhang et al. (2019), avaliando um sistema de manejo baseado no uso de leguminosas por seis anos, verificaram que o conteúdo de C e N nos agregados do solo aumentaram 9% e 12%, respectivamente. Os resultados encontrados para estas frações corroboram com os encontrados até aqui para os estoques de carbono e nitrogênio, em que os sistemas de plantio de soja como cultura antecessora a curto prazo podem melhorar as características químicas e biológicas do solo.

Analisando-se os estoques de CT e NT, C-MOAM e N-MOAM nas profundidades (Figuras 17 e 18), nota-se que há um comportamento semelhante, em que os sistemas SBra e B24m apresentaram maiores médias. A primeira causa para esse comportamento corresponde aos maiores teores de argila dessas áreas, favorecendo o aumento dos estoques da MOAM, que são mais lentos, quando comparado ao aporte dos estoques da MOP, mas que possuem maior contribuição para os estoques totais (COTRUFO et al., 2022). Apesar disso, os estoques

observados em B24m reafirmam a importância do legado deixado pelas culturas antecessoras no *efeito priming* negativo, pois no sistema B6m houveram ciclos sequenciais de culturas com alta relação C/N (milho + braquiária e braquiária), favorecendo um *efeito priming* positivo e menores estoques que os observados em B24m, pois a decomposição e ciclagem de nutrientes destes materiais é lenta (BERTOL et al., 2004). Para o C-MOP e N-MOP verificou-se um maior incremento na primeira profundidade (0,0-0,10 m) dos nutrientes nos sistemas SBra e B24m, possivelmente influenciado pela resteva da soja, que no curto prazo pode estar contribuindo para estes resultados. Porém, para o N-MOP, há um comportamento distinto em B6m e B2m na camada de 0,30-0,60 m, apresentando-se superiores aos demais sistemas (SBra e B24m). Esse resultado pode ser explicado pela contribuição dos sistemas radiculares da braquiária em profundidade, com fragmentos de plantas e raízes mortas que possuem características bioquímicas que tem relação com material de origem desta fração da MOS (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992).

A hipótese de que a inserção da braquiária em sistemas integrados de sucessão de plantas aumenta os estoques de C e N das frações da MOS é pouco atendida nesse estudo. De maneira geral, os sistemas com uso de braquiária, independente do tempo de implantação (sendo todos recentes), não foram responsáveis pelo aumento dos estoques de C e N totais e nas frações, sendo isso relacionado mais a diferença nos teores de argila de cada área. No caso de C-MOP e N-MOP houve influência da cultura antecessora, ao utilizar plantas com baixa relação C/N (soja), favorecendo o *efeito priming* negativo, e aumentando os estoques desta fração da MOS. Um resultado promissor para o uso da braquiária é o observado na última camada (0,60-1,00 m) para N-MOP, que mostra a contribuição das raízes mortas na formação da MOP em profundidade.

9.3. Atividade de enzimas do solo

A atividade enzimática pode indicar processos metabólicos específicos no solo (NANNIPIERI et al., 2012). A β -glicosidase está relacionada ao ciclo biogeoquímico de carbono e atua em carboidratos de cadeia curta, que catalisam a liberação de glicose, enquanto a arilsulfatase catalisa a conversão de enxofre orgânico em enxofre inorgânico (DOS SANTOS et al., 2022). A fosfatase ácida está relacionada a reações que aumentam o P geoquímico no solo (NESPER et al., 2015). Os resultados encontrados para atividade enzimática da arilsulfatase (Figura 19) na primeira camada (0,0-0,10 m) mostram que o sistema B6m apresentou maiores valores frente aos sistemas SBra e B2m, sendo que em relação ao último, houve uma maior atividade em 34,3 %. Isso pode ser explicado devido a esta enzima ter forte

relação com a quantidade de resíduos sobre o solo, é não somente a qualidade. A braquiária do sistema B6m tinha sido dessecada há pouco tempo, gerando uma grande quantidade de palha sobre o solo, já em B2m havia uma menor quantidade de resíduos sobre o solo no momento da coleta. Resultados parecidos foram encontrados por Dos Santos et al. (2022), que atribuíram o aumento significativo da atividade da enzima arilsulfatase em sistemas de pastagem frente a vegetação natural com relação à quantidade, e não a qualidade da matéria orgânica formada por resíduos sobre o solo.

A β -glicosidase é uma enzima importante para a sustentabilidade do solo, atuando na última fase da decomposição da celulose, realizando a catálise das reações de hidrólise de diferentes glicosídeos (PROSSER; SPEIR; STOTT, 2011). A redução na atividade desta enzima é frequentemente uma indicação de um solo pobre, caracterizado por baixa atividade microbiana (MUZANGWA; MNKENI; CHIDUZA, 2019). Esta enzima apresentou valores semelhantes para os sistemas SBra, B24m e B6m (Figura 19), demonstrando que nestes sistemas a atividade biológica estava alta, frente aos valores encontrados em B2m, nas primeiras profundidades. A atividade da enzima β -glicosidase está associada ao ciclo do C, sendo assim, ao analisar os resultados de C-MOP, é possível verificar o comportamento semelhante nos manejos, indicando uma presença maior de C para atividades dos microrganismos, que usam o C-MOD como substrato prontamente disponível (GMACH et al., 2020). A atividade microbiana associada com a disponibilidade de substrato pode influenciar a mineralização e solubilização de C (PARK; MATZNER, 2003). A diminuição na atividade desta enzima em B2m, pode ser atribuída a recente colheita do milho, com entrada de máquinas pesadas na área, que contribuíram para diminuição da atividade dos microrganismos, devido a alterações nas propriedades físicas, como o aumento da Ds e consequente diminuição da porosidade de aeração (Ma) (DOS SANTOS et al., 2022). Segundo Nawaz et al. (2013), sistemas com compactação superficial desfavorecem o desenvolvimento de algumas classes de microrganismos do solo e reduzem a atividade de enzimas específicas. Além disso, áreas com pouca declividade e com compactação superficial, aliadas a irrigação por pivô central (altas lâminas), como as que foram estudadas neste trabalho, podem sofrer de uma condição anóxica, mesmo que por períodos curtos de tempo, induzindo a mudanças na comunidade microbiana que favorecem organismos tolerantes a essas condições (SCHNURR-PUTZ et al., 2006), além de ocasionarem perda de água por evaporação e aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE), enquanto perdurar essa condição (SILVEIRA et al., 2010).

As fosfatases são hidrolases que estão envolvidas na hidrólise de compostos orgânicos fosfatados, dessa forma, são responsáveis pelas transformações do P das formas orgânicas do

solo para fósforo solúvel, estando prontamente disponível para absorção pelas plantas (TOOR et al., 2006; REJSEK et al., 2012). A fosfatase ácida pertence ao grupo das enzimas extracelulares, que catalisam monoésteres em uma faixa de pH ótimo de 6,5 (REJSEK et al., 2012). Estas são liberadas por microrganismos e também pelos vegetais, destacando-se os fungos, que são capazes de produzir grandes quantidades dessa enzima (MASSENSINI et al., 2015). Os resultados encontrados para esta enzima (Figura 19) vão de encontro com os da literatura (SPEIR; COWLING, 1991; LIMA et al., 1996; MOSCATELLI et al., 2005), que afirmam que a atividade da fosfatase ácida está diretamente relacionada com a quantidade de P disponível no ambiente. Quando se analisa a tabela 4, nota-se que os sistemas SBra e B2m apresentaram os maiores valores de P-disponível (55,9 e 50 mg dm⁻³, respectivamente), em relação aos demais sistemas, que apresentaram valores próximos. Tais resultados provavelmente influenciaram na atividade desta enzima nestes sistemas (SBra e B2m), uma vez que em situação de alta disponibilidade de P, observa-se menor atividade da enzima. Hofmann et al. (2016) observaram que, ao avaliarem a enzima fosfatase em solos com alta e baixa disponibilidade de P, a fosfatase ácida teve atividade 53% superior em regiões de baixa disponibilidade de P. Essa resposta ocorre tanto na microbiota do solo quanto na rizosfera das plantas, onde os baixos níveis de P solúvel desencadeiam uma resposta para aumentar a mineralização e remobilização de fosfatos no solo (VIEIRA, 2019).

Os menores valores encontrados na profundidade de 0,30-0,60 m eram esperados, haja vista que há uma diminuição da atividade biológica do solo e quantidade de microrganismos em profundidade. Diversos estudos também constataram que a proximidade da microbiota a fonte de matéria orgânica é o principal fator para o aumento da atividade enzimática no solo, e que maior atividade é obtida nas camadas superiores do solo, decaindo com o aumento da profundidade (ACOSTA-MARTINEZ et al., 2003; WANG; LU, 2006).

A hipótese que a braquiária favorece a atividade das enzimas relacionadas aos ciclos do C, P e S em superfície e profundidade é atendida neste trabalho somente para a arilsulfatase. A atividade da arilsulfatase (S) foi aumentada principalmente pelo maior aporte de resíduo e massa vegetal da braquiária recém dessecada. O uso de braquiária não influenciou a atividade da β -glicosidase (C) em superfície, sendo a diferença das atividades mais relacionada ao aporte de C em superfície por outras espécies que participaram do sistema de sucessão (SBra e B24m), e a uma massa vegetal abundante (B6m), evidenciado pelos estoques de C-MOP e C-MOD. A compactação superficial em B2m possivelmente prejudicou a atividade desta enzima. Os resultados da fosfatase ácida (P) foram influenciados pelo uso de fontes inorgânicas de fósforo

como adubo, não sendo possível afirmar se o manejo com braquiária favorece a atividade dessa enzima.

9.4. Análise de componentes principais (PCA)

No presente trabalho, em vista da dificuldade de relacionar variáveis químicas, físicas e biológicas no entendimento da contribuição da braquiária para sistemas produtivos de cereais e fibras, a análise de componentes principais (PCA) conseguiu compilar os principais resultados (Figura 20), conseguindo agrupar e explicar comportamentos envolvendo diferentes atributos e índices de qualidade do solo (SILVA et al., 2015).

Percebe-se, assim como constatado nos resultados dos atributos físicos, que a M_a se correlaciona negativamente com os valores de M_i , além da θ_{CC} , o que é observado por outros autores também (TORRES et al., 2015). Tal comportamento ficou evidenciado na similaridade da M_a e CH apresentada em $B6m$ em todas as profundidades. Em contrapartida, foi notável a similaridade das últimas profundidades em $SBra$ e $B2m$ com a M_i e fração argila, e sua dissimilaridade com o agrupamento de $B6m$. A variável $C-MOAM$ mostrou estar associada a maiores teores de argila, que também corresponderam a maiores valores de microporosidade, explicando os maiores estoques observados na $MOAM$ em $SBra$ e $B2m$. Os teores de argila se correlacionaram negativamente com os teores de areia, com esta segunda estando relacionada a maiores valores de macroporosidade, o que foi observado em $B6m$, mostrando a importância das raízes deixadas pela braquiária na infiltração de água no solo (CALONEGO; ROSOKEM, 2008; PRANDO et al., 2010). Os maiores valores de RP_{uc} são identificados pela correlação de $B2m$ na primeira camada (0,0-0,10 m) com esta variável, sendo necessário se atentar a época e a umidade do solo quando for necessário realizar operações com maquinário, o que ainda se torna um gargalo em áreas irrigadas por pivô central. As variáveis químicas (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e atividades enzimáticas possuem similaridade e explicam as variações na primeira profundidade (0,0-0,10 m), devido a maior concentração de microrganismos nesta camada, e isso se deve principalmente pela maior disponibilidade de nutrientes, que afeta a atividade biológica, influenciada pela presença mais efetiva da MOS , propiciando as maiores atividades das enzimas avaliadas (SEGNINI et al., 2019). É importante ressaltar que a PCA é uma técnica exploratória e não fornece necessariamente conclusões definitivas sobre os dados analisados. No entanto, ela pode ajudar a identificar padrões de similaridade e dissimilaridade entre as situações de estudo, que podem ser investigados com mais acurácia em estudos posteriores.

10. CONCLUSÃO

A inserção de braquiária favoreceu a melhoria de alguns atributos físicos do solo, mas em condições específicas. Após dessecada, sua produção de biomassa e raízes favoreceu o aumento de macroporosidade e valores de condutividade hidráulica de forma significativa. Mas, deve-se atentar para o manejo adequado da braquiária, a medida que houve entrada de máquinas pesadas recentemente, os valores de macroporosidade e condutividade hidráulica diminuíram substancialmente, assim como a resistência à penetração aumentou nas camadas superficiais. Os maiores valores de CAD foram influenciados pela quantidade de argila dos solos, não sendo influenciada pelo uso da braquiária.

O uso de braquiária não foi responsável pelo aumento dos estoques de C e N totais e nas frações da MOS, haja vista que os teores de argila foram determinantes nos maiores estoques de C-MOAM e N-MOAM em SBra e B2m. Notou-se que o sistema de rotação, quando cultivado com leguminosas favoreceu o aumento dos estoques no solo a curto prazo (C-MOP e N-MOP), devido ao *efeito priming* negativo. Um resultado promissor, que aponta para benefícios do uso da braquiária é o observado em B6m na última camada (0,60-1,00 m), para N-MOP, que mostra a contribuição das raízes mortas na formação dessa fração em profundidade, favorecendo a ciclagem e aumento dos estoques em profundidade.

A atividade de arilsulfatase foi mais afetada pelo aporte de resíduos do que a presença da braquiária no sistema, mostrando que seus benefícios podem partir da contribuição da biomassa gerada e mantida sobre o solo. Esse comportamento também foi observado na atividade da β -glicosidase, que foi mais favorecida pelo aporte de material particulado e pelo C prontamente disponível aos microrganismos (C-MOD). Contrariamente a isso, a compactação superficial prejudicou a atividade desta enzima. Os resultados da fosfatase ácida foram influenciados pelo uso de fontes inorgânicas de fósforo como adubo, não sendo possível afirmar se o manejo com braquiária favorece a atividade dessa enzima.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; KLOSE, S.; ZOBECK, T. M. Enzyme activities in semiarid soils under conservation reserve program, native rangeland, and cropland. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, n. 6, p. 699–707, dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200321215>
- AGNIHOTRI, R.; SHARMA, M. P.; PRAKASH, A.; RAMESH, A.; BHATTACHARJYA, S.; PATRA, A. K.; MANNA, M. C.; KURGANOVA, I.; KUZYAKOV, Y. Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: Review of mechanisms and controls. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 150571, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150571>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVAREZ, V. H. V.; NOVAISS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, 2000.
- ALVAREZ, V. V. H.; ALVAREZ, G. A. M. Reflexões sobre a utilização de estatística para pesquisa em ciência do solo. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 28 – 35, 2013.
- ANSELMO, J. L.; COSTA, D. S.; SÁ, M. E. Plantas de cobertura para Região de Cerrado. **Plantas de cobertura**, n. 25, p. 149-154, 2013.
- ARAÚJO, L.S.; CUNHA, P.C.R.; SILVEIRA, P.M.; NETTO, M.S.; OLIVEIRA, F.C. Potencial de cobertura do solo e supressão de tiririca (*Cyperus rotundus*) por resíduos culturais de plantas de cobertura. **Revista Ceres**, v. 62, n. 5, p. 483-488, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562050009>
- BALBINOT JÚNIOR, A. A.; CARVALHO, P. C. F.; VEIGA, M.; MORAES, A.; PELISSARI, A. Desempenho da cultura do feijão após diferentes formas de uso do solo no inverno. **Ciência Rural**, v. 39, p. 23-40, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000800011>
- BALESDENT, J., MARIOTTI, A., BOISGONTIER, D. **Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ¹³C abundance in maize fields**. J. Soil Sci. 41, 587–596. 1990. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00228.x>
- BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; FREIRE, F. G. C.; de OLIVEIRA SANTOS, W.; COSTA, F. G. B. Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do

perímetro irrigado Gorutuba, em Janaúba, MG. **Revista Verde**, Mossoró, v. 6, n. 5, p. 189-192, 2011.

BERTOL, I.; LEITE, D.; ZOLDAN, W. A. Corn crop residue decomposition and related parameters. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 369–375, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200015>

BONETTI, J. de A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. de; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. da. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 104–112, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529625>

BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; DE SOUZA, J. M.; MAGIERO, M. Desenvolvimento vegetativo do cafeeiro Conilon submetido a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 2, p. 157-169, 2013.

BORGHI, E. R.; A. V., GONTIJO NETO, M. M.; SANTANA, D., de SOUSA, G. F.; SILVA, M.; SOUZA, C. H. E. Sistemas de cultivo de soja e milho na região do Alto Paranaíba-MG e resultados de avaliações na safra 2014/15. **Embrapa Milho e Sorgo** -Documentos (INFOTECA-E), 2016.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Botucatu, v. 42, n. 2, p. 163-171, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200004>

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C., Desenvolvimento da cultura do milho em consorciação com *Brachiaria brizanta* em sistema de plantio direto. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 19-33, 2006.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soil aggregate stability after management with crop rotation and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:1399-407. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400004>

CALZADA BENZA, J. **Metodos estadisticos para la investigacion**. 1. ed. Lima, 1964.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

CARVALHO, C. A. DE; FERREIRA, R. L. F.; ANDRADE, R. A.; BRITO, R. S. DE; PEREIRA, T. C. R.; LIMA, T. J. L. Atributos físicos do solo cultivados com plantas de cobertura. **Revista Scientia Naturalis**, v.2, p.38- 41, 2020.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; DE SOUSA, R. O.; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.15210/RBES.V4I1.11576](https://doi.org/10.15210/RBES.V4I1.11576)

CEPEA - Centro De Estudos Avançados Em Economia Aplicada. **PIB do Agronegócio Brasileiro (2022)**. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-doagronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 2 de fevereiro 2023.

CHANTIGNY, M. H.; ANGERS, D. A.; KAISER, K.; KALBITZ, K. Extraction and Characterization of Dissolved Organic Matter. *Em*: M.R., Carter; E.G., Gregorich (org.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed.: CRC Press, 2007. p. 1264. DOI: [10.1201/9781420005271.ch48](https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch48).

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M. de; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 37–43, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100005>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 10 décimo levantamento, julho 2022. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CONGREVES, K. A.; HAYES, A.; VERHALLEN, E. A.; VAN EERD, L. L. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 17–28, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012>

CORTEZ, J. W.; MAUAD, M.; SOUZA, L. C. F.; RUFINO, M. V.; SOUZA, P. H. N. Atributos agronômicos da soja e resistência à penetração em plantio direto e escarificado. **Revista Engenharia Agrícola** v. 37, n. 1, 2017.

COTRUFO, M. F.; HADDIX, M. L.; KROEGER, M. E.; STEWART, C. E. The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 168, 2022. DOI: [10.1016/j.soilbio.2022.108648](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648).

COTRUFO, M. F.; WALLENSTEIN, M. D.; BOOT, C. M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988–995, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/gCBra.12113>

CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. dos. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 3, 25 jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.819>

DOS SANTOS FERNANDES, C. H.; TEJO, D. P.; ARRUDA, K. M. A. Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: Histórico, Implantação e Culturas utilizadas. **Uniciências**, v. 23, n. 2, p. 83-88, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2019v23n2p83-88>

DOS SANTOS, J. V.; RAIMUNDO BENTO, L.; DIAS BRESOLIN, J.; CORSO MITSUYUKI, M.; PERONDI, P. A. O.; MACEDO PEZZOPANE, J. R.; BERNARDI, A. C. C.; MENDES, I. C.; MARTIN-NETO, L. The long-term effects of intensive grazing and silvopastoral systems on soil physicochemical properties, enzymatic activity, and microbial biomass. **CATENA**, v. 219, p. 106619, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106619>

DU, X.; JIAN, J.; DU, C.; STEWART, R. D. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 2, p. 188–196, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.001>

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529–538, 1995. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C., SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A., TANAKA, E. M. Análise da variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em diferentes profundidades. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** v. 12, n. 2, p. 164-175, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n2p164-175>

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Pacote Experimental Designs** (Português). 2022.

FLORES, P.M. Análise multitemporal do avanço da fronteira agrícola no município de Barreiras -BA (1988 -2008). 99f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, **Universidade de Brasília**, Brasília –DF, 2014.

FREITAS, I. C.; SANTOS, F. C. V.; CUSTÓDIO FILHO, R. O.; SILVA, N. R. A.; CORRECHEL, V. Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 12, p. 1275–1281, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001200003>

GAUDIN, A. C. M.; JANOVICEK, K.; DEEN, B.; HOOKER, D. C. Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. **Agriculture**,

Ecosystems & Environment, v. 210, p. 1–10, 2015. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.034>

GIONGO, V.; MENDES, A. M. S.; CUNHA, T. J. F.; GALVÃO, S. R. S. Decomposição e liberação de nutrientes de coquetéis vegetais para utilização no semiárido brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 3, p. 611-618, 2011. DOI:
<https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300006>

GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; KAISER, K.; CERRI, C. E. P. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 3, 2020. DOI:
10.1590/1678-992x-2018-0164.

HOFMANN, K.; HEUCK, C.; SPOHN, M. Phosphorus resorption by young beech trees and soil phosphatase activity as dependent on phosphorus availability. **Oecologia**, v. 181, n. 2, p. 369–379, 13 fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3581-x>

HOUSE, M. L.; POWERS, W. L.; EISENHAUER, D. E.; MARX, D. B.; FEKERSILLASSIE, D. Spatial Analysis of Machine-Wheel Traffic Effects on Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1376–1384, 2001. DOI:
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551376x>

KAISER, K.; KAUPENJOHANN, M.; ZECH, W. Sorption of dissolved organic carbon in soils: Effects of soil sample storage, soil-to-solution ratio, and temperature. **Geoderma**, v. 99, n. 3–4, p. 317–328, 1 fev. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00077-X)

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1979. 364 p.

KUZYAKOV, Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1363–1371, 1 set. 2010. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:415-423, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300002>

LEHMAN, R. M.; CAMBARDELLA, C. A.; STOTT, D. E.; ACOSTA-MARTINEZ, V.; MANTER, D. K.; BUYER, J. S.; MAUL, J. E.; SMITH, J. L.; COLLINS, H. P.; HALVORSON, J. J.; KREMER, R. J.; LUNDGREN, J. G.; DUCEY, T. F.; JIN, V. L.; KARLEN, D. L. Understanding and Enhancing Soil Biological Health: The Solution for Reversing Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 1, p. 988–1027, 2015. DOI:
<https://doi.org/10.3390/su7010988>

LIMA, J. A.; NAHAS, E.; GOMES, A. C. Microbial populations and activities in sewage sludge and phosphate fertilizer-amended soil. **Applied Soil Ecology**, v.4, p.75–82, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00094-7](https://doi.org/10.1016/0929-1393(96)00094-7)

LINTON, N. F.; FERRARI MACHADO, P. V.; DEEN, B.; WAGNER-RIDDLE, C.; DUNFIELD, K. E. Long-term diverse rotation alters nitrogen cycling bacterial groups and nitrous oxide emissions after nitrogen fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, p. 107917, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107917>

MASSENSINI, A. M.; TÓTOLA, M. R.; CHAER BORGES, A.; DUTRA COSTA, M. Solubilização Potencial de Fosfatos Mediada pela Microbiota Rizosférica de Eucalipto Cultivado em Topossequência Típica da Zona da Mata Mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 692–700, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140339>

MOSCATELLI, M. C.; LAGOMARSINO, A.; DE ANGELIS, O.; GREGO, S. Seasonality of soil biological properties in a poplar plantation growing under elevated atmospheric CO₂. **Applied Soil Ecology**, v.30, p.162–173, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.008>

MUZANGWA, L.; MNKENI, P. N. S.; CHIDUZA, C. The Use of Residue Retention and Inclusion of Legumes to Improve Soil Biological Activity in Maize-Based No-Till Systems of the Eastern Cape Province, South Africa. **Agricultural Research**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00402-0>

NAKANO, k.; MIYAZAKI, T. Predicting the saturated hydraulic conductivity of compacted subsoils using the non-similar media concept. **Soil & Tillage Research** 84. Elsevier. 2005, p.145- 153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.11.010>

NAKAO, A.H.; CARVALHO, M.P.; SOUZA, F.H.; CRUZ, S.S.; MONTANARI, R. Rotação e sucessão de culturas como práticas de conservação do solo no município de Jales, SP. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1, p. 153-166, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23323>

NANNIPIERI, P.; GIAGNONI, L.; RENELLA, G.; PUGLISI, E.; CECCANTI, B.; MASCIANDARO, G.; FORNASIER, F.; MOSCATELLI, M. C.; MARINARI, S. Soil enzymology: classical and molecular approach. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, n. 7, p. 743–762, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0723-0>

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 2, p. 291–309, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

NESPER, M.; BÜNEMANN, E. K.; FONTE, S. J.; RAO, I. M.; VELÁSQUEZ, J. E.; RAMIREZ, B.; HEGGLIN, D.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, v. 257-258, p. 123–133, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.010>

SPAGNOLLO, E.; BAYER, C. WILDNER, L. P.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. PROENÇA, M. M. Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:417-423, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200015>

PARK, J. H.; MATZNER, E. Controls on the release of dissolved organic carbon and nitrogen from a deciduous forest floor investigated by manipulations of aboveground litter inputs and water flux. **Biogeochemistry**, v. 66, n. 3, p. 265– 286, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:BIOG.0000005341.19412.7b>

PERECIN, D.; CARGNELUTTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 68-72, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000100010>

PRANDO, M. B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A. P. E.; ROSOLEM, C. A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 693-700, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300010>

PROSSER, J. A.; SPEIR, T. W.; STOTT, D. E. Soil Oxidoreductases and FDA Hydrolysis. **SSSA Book Series**, p. 103–124, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c6>

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, 27:29-48, 2003.

REJSEK, K.; VRANOVA, V.; PAVELKA, M.; FORMANEK, P. Acid phosphomonoesterase (E.C. 3.1.3.2) location in soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 2, p. 196–211, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201000139>

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999.

RIBEIRO, J. F; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora** v. 2. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. 876 p.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. In: KER, J.C.; SHAEFER, C.E.G.R; VIDAL-TORRADO, P. *Pedologia: fundamentos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa-MG, 2012, p.47-80.

ROY, D.; DATTA, A.; JAT, H. S.; CHOUDHARY, M.; SHARMA, P. C.; SINGH, P. K.; JAT, M. L. Impact of long-term conservation agriculture on soil quality under cereal based systems of North West India. **Geoderma**, v. 405, p. 115391, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115391>

SANTOS, P. M.; JÚNIOR, J. A.; SENA, C. C.; DOMINGOS, M. V. H.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; BATTISTI, R.; SOUSA, J. M. F. Necessidade de se irrigar a fase inicial de floresta de Mogno-Africano no cerrado / Need to irrigate initial phase of Mogno-African forest in cerrado. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 41399–41409, 2020. DOI: [10.34117/bjdv6n6-615](https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-615).

SCHNURR-PÜTZ, S.; BÅÅTH, E.; GUGGENBERGER, G.; DRAKE, H. L.; KIRSTEN, K. Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes. **FEMS microbiology ecology**, v. 58, n. 3, p. 503-516, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00175.x>

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI JUNIOR, P. L.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; PRAES, F. F. M.; RODRIGUES, P. H. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 1, p. 33–40, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0131>

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M. T. Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. **J. Hydrol. Hydromech.** 71(1): 22-34. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039>

SHAW, R. J.; YULE, D. F. The assessment of soils for irrigation, Emerald, Queensland. Brisbane: **Queensland Department of Primary Industries**, 1978.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 6, p. 855–860, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600015>

SILVA, E. N. S. D.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO; A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 598-607, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140429>

SILVEIRA, A. P. D., ABREU, M. F., CANTARELLA, H., & ZAMBROSI, F. C. B. **Determinação da atividade de enzimas em solos.** 2022.

SILVEIRA, D. D. C.; MELO FILHO, J. F. D.; SACRAMENTO, J. A. A. S. D.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, p. 659-667, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>

SILVEIRA, M. L.; COMERFORD, N. B.; REDDY, K. R.; PRENGER, J.; DEBUSK, W. F. Influence of military land uses on soil carbon dynamics in forest ecosystems of Georgia, USA. **Ecological Indicators**, v. 10, n. 4, p. 905-909, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.009>

SIX, J.; FREY, S. D.; THIET, R. K.; BATTEN, K. M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 555–569, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>

SOLINGER, S.; KALBITZ, K.; MATZNER, E. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a Central European deciduous forest. **Biogeochemistry**, v. 55, n. 3, p. 327–349, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011848326013>

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo, em lavoura de café conilon submetida à subsolagem. **Coffee Science**. ISSN 1984-3909, v. 9, n. 2, p. 226-236, 2014.

SOUZA, L. D.; REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.183-189, 1996.

SPEIR, T. W.; COWLING, J. C. Phosphatase activities of pasture plants and soils: relationship with plant productivity and P fertility indices. **Biology and Fertility of Soils**, v.12, 189– 194, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00337200>

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 533–542, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300014>

STEPNIEWSKI, W.; HORN, R.; MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, San Francisco, v. 88, n. 2, p. 175-181, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00255-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00255-9)

STOTT, D. E.; MOEBIUS-CLUNE, B. N. Soil Health: Challenges and Opportunities. **Progress in Soil Science**, p. 109–121, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-43394-3_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_10)

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

TIEMANN, L. K.; GRANDY, A. S.; ATKINSON, E. E.; MARIN-SPIOTTA, E.; MCDANIEL, M. D. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. **Ecology Letters**, v. 18, n. 8, p. 761–771, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12453>

TOOR, G. S., HUNGER, S., PEAK, J. D., SIMS, J. T., & SPARKS, D. L. Advances in the Characterization of Phosphorus in Organic Wastes: Environmental and Agronomic Applications. **Advances in Agronomy**, p. 1–72, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)89001-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)89001-7)

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L. D.; SOUZA, Z. M. D. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 428-437, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140597>

TRINSOUTROT, I.; RECOUS, S.; BENTZ, B.; LINÈRES, M.; CHÈNEBY, D.; NICOLARDOT, B. Biochemical Quality of Crop Residues and Carbon and Nitrogen Mineralization Kinetics under Nonlimiting Nitrogen Conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 918–926, 2000. DOI: 10.2136/sssaj2000.643918x.

VALADÃO, F. C. A., WEBER, O. L. S., VALADÃO JÚNIOR, D. D., SCAPINELLI, A., DEINA, F. R. E BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 243-255, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150144>

VALADÃO, F. C. DE A; WEBER, O. L. DOS S; VALADÃO JÚNIOR, D. D; SANTIN, M. F. M; SCAPINELLI, A. Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada, **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n.1, p.183-195, 2017. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA15092>

VIEIRA, B. A. R. M. ATRIBUTOS MICROBIANOS DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM DIFERENTES NÍVEIS DE PALHA. 2019. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, **Instituto Agrônomo**, Campinas, 2019.

VITALE, C. M.; DI GUARDO, A. A review of the predictive models estimating association of neutral and ionizable organic chemicals with dissolved organic carbon. **Science of The Total Environment**, v. 666, p. 1022–1032, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.340>

WANG, X. C.; LU, Q. Beta-Glucosidase Activity in Paddy Soils of the Taihu Lake Region, China. **Pedosphere**, v. 16, n. 1, p. 118–124, fev. 2006. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60033-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60033-7)

WRIGLEY, C. The Cereal Grains: providing our food, feed and fuel needs. **Cereal Grains**, p. 27-40, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100719-8.00002-4>.

ZHANG, D.; YAO, Z.; CHEN, J.; YAO, P.; ZHAO, N.; HE, W.; LI, Y.; ZHANG, S.; ZHAI, B.; WANG, Z.; HUANG, D.; CAO, W.; GAO, Y. Improving soil aggregation, aggregate-associated C and N, and enzyme activities by green manure crops in the Loess Plateau of China. **European Journal of Soil Science**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12843>

ZHAO, J.; YANG, Y.; ZHANG, K.; JEONG, J.; ZENG, Z.; ZANG, H. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 245, p. 107659, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107659>

ZUO, X.; ZHAO, H.; ZHAO, X.; ZHANG, T.; GUO, Y.; WANG, S.; DRAKE, S. Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China. **Soil & Tillage Research**, v.99, p.202-212, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.008>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas conservacionistas de uso do solo tem sido cada vez mais estudados com o objetivo de atender as premissas da produção sustentável, conservação do solo e dos recursos hídricos. As plantas de cobertura são uma opção viável e de baixo custo, que proporcionam diversos benefícios nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

No presente estudo, foram avaliadas diferentes situações de uso de plantas de cobertura em diferentes sistemas, cada qual com sua particularidade. Na produção cafeeira, constatou-se que a braquiária traz diversos benefícios, principalmente nos atributos físicos do solo e no aumento de estoques de C e N e sua manutenção em profundidade. Ao mesmo tempo, o uso de plantas de cobertura diversas mostrou grande potencial de melhoria dos atributos físicos, químicos e no aumento da atividade de enzimas do solo, visando também o aumento dos estoques de C e N. Tais resultados não foram atingidos em sua totalidade, haja vista o pouco tempo de implantação das culturas em mix. Faz-se necessário novos estudos com cultivos consorciados nas entrelinhas do cafeeiro, avaliando-se sistemas mais antigos e consolidados. Foi possível perceber também que os efeitos do tráfego intenso de maquinário agrícola não são totalmente mitigados com o uso de plantas de cobertura, sendo necessário adaptar as operações e diminuir o tráfego em períodos de maior umidade no solo.

A inserção da braquiária em sucessão em áreas de cultivo intenso de cereais e fibras se mostrou uma boa opção, com benefícios para a manutenção da porosidade de solos frágeis do ponto de vista físico, como os solos arenosos e de textura média do presente estudo. Mas deve-se atentar para a entrada de maquinário agrícola e suas consequências, como a redução das atividades de enzimas e piora dos atributos físicos do solo, principalmente em superfície, que pode favorecer uma baixa infiltração de água e perda desta por evaporação, além da possibilidade de aumento da emissão de gases de efeito estufa. Os teores de argila foram determinantes para os estoques totais de C e N nos solos estudados. Assim como no estudo das áreas de café, faz-se necessário novos estudos com maior tempo de implantação e permanência da braquiária no sistema, além da adoção de rotação com plantas de outras espécies, com diferentes sistemas radiculares, visando contribuir melhor para a melhoria dos atributos físicos do solo, aumento dos estoques de C e N e atividades de enzimas desses sistemas.