

ARISTIDES OSVALDO NGOLO

**ALTERAÇÕES NA QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO  
VERMELHO DO CERRADO BRASILEIRO EM RESPOSTA AOS EFEITOS  
DE LONGO PRAZO NO MANEJO DO SOLO**

Tese 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 *Doctor Scientiae*.

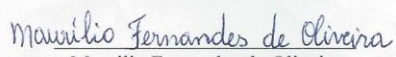
VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019


ARISTIDES OSVALDO NGOLO

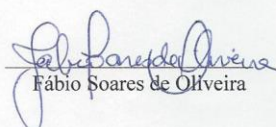
**ALTERAÇÕES NA QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO  
VERMELHO DO CERRADO BRASILEIRO EM RESPOSTA AOS EFEITOS  
DE LONGO PRAZO NO MANEJO DO SOLO**

Tese 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 *Doctor Scientiae*.

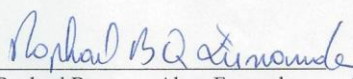
APROVADA: 26 de fevereiro de 2019.

  
Maurilio Fernandes de Oliveira

  
Leonardus Vergütz

  
Fábio Soares de Oliveira

  
Igor Rodrigues de Assis  
(Coorientador)

  
Raphael Bragança Alves Fernandes  
(Orientador)

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

T

N576a  
2019 Ngolo, Aristides Osvaldo, 1984-  
Alterações na qualidade física de um latossolo vermelho do  
cerrado brasileiro em resposta aos efeitos de longo prazo no manejo do  
solo / Aristides Osvaldo Ngolo. - Viçosa, MG, 2019.  
ix, 69f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Física do solo. 2. Solos - Manejo. 3. Plantio direto.  
4. Microestrutura. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.  
II. Título.

CCD 22 ed. 631.43

*Dedico a Deus  
pela vida e saúde que me concedeu.  
Aos meus pais Augusto Morais Ngolo e Alice Kuayela  
pelo apoio incondicional durante todo processo de minha formação.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e saúde que me concedeu para chegar onde cheguei.

Aos meus pais Augusto Morais e Alice Kuayela pelo incentivo, por todo suporte e apoio moral durante toda minha formação desde o ensino primário ao Doutorado.

Ao Programa Estudante Convênio de Pós-Graduação (PEC-PG) da CAPES, pela bolsa de estudo de Doutorado.

A Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de fazer parte do corpo discente.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Milho e Sorgo), pela parceria ao longo dos anos de 2016 à 2019.

Aos professores do Departamentos de Solos da UFV, especialmente ao professor Raphael Bragança Fernandes que durante todo processo foi mais do que um orientador. Aos professores Igor Rodrigues e Genelício pela coorientação, aos professores Elpídio, Carlos Schaefer, João Ker, Samuel Valadares e os demais pelas instruções.

Ao pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo Maurílio Fernandes, pelas experiências de campo e instruções sobre manejo de sistemas agrícolas;

Aos colegas Guilherme Musse, Laís Rodrigues, João Reis, Paulo Prates, Sandro Lúcio, Vanessa Schiavon, Maiara Cazotti e Carlos Henriques, pela troca de experiências em campo e de laboratório;

Aos técnicos do Laboratório de Física do Solo, Cláudio e Evandro pelo auxílio técnico;

Aos meus irmãos Bernardeth, Morais, Cremilda, Isilda, Moisés, Bernardo, António e Janilson os meus agradecimentos pelo apoio moral durante todo período que vivi distante de vocês.

Ao pessoal da secretaria do Departamento de Solos, Carol e Nayan, meus agradecimentos pela disponibilidade sempre que os procurei.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	viii
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
Referências .....	3
Capítulo 1 .....	4
SOIL PHYSICAL QUALITY AFTER 21 YEARS OF CULTIVATION IN A BRAZILIAN CERRADO LATOSOL .....	4
Abstract .....	5
1 - Introduction .....	5
2. Material and Methods .....	6
2.1 Area Description.....	6
2.2 Methods and Techniques .....	7
2.3 Statistical Analysis.....	8
3. Results and Discussion .....	8
3.1 Effects on Soil Structure .....	8
3.2 Effects on Soil Mechanical Resistance to Penetration .....	10
3.3 Effects on Soil Carbon Dinamycs .....	12
3.4 Effects on Soil Specific Surface Area .....	12
3.3 Effect Glomalin-Related Soil Protein .....	12
3.6 Effects on Soil Physical Quality .....	13
4. Conclusions .....	13
References .....	14
Capítulo 2 .....	18
ESTOQUE E DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO APÓS DUAS DÉCADAS DE MANEJO DO SOLO EM UM LATOSSOLO DO CERRADO ...	18
Resumo .....	18
1. Introdução .....	18
2. Material e Métodos .....	20
2.1 Descrição do local .....	20
2.2 Coleta de amostras de solo .....	22
2.3 Análises .....	22

2.4 Formas de carbono no solo .....	23
2.5 Índice de manejo de carbono .....	23
2.6 Análises estatísticas .....	24
3. Resultados e Discussão .....	24
4. Conclusões .....	32
5. Referências .....	32
Capítulo 3 .....	38
MUDANÇAS MICROESTRUTURAIS EM LATOSSOLO VERMELHO SOB CERRADO A PARTIR DE DIFERENTES TIPOS DE MANEJO .....	38
Resumo .....	38
Introdução .....	39
2. Material e Métodos .....	41
2.1 Solo e tipos de manejo .....	41
2.2 Análises .....	42
3. Resultados .....	43
3.1 Atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo controle – LVd sob CN .	
44	
3.2 Caracterização micromorfológica do solo controle – LVd sob CN .....	46
3.3 Caracterização micromorfológica nos manejos cultivados – PD, GS e AD	48
3.4 Caracterização micromorfométrica da porosidade e relação com análises laboratoriais .....	54
3.5 Caracterização morfológica por tomografia computadorizada .....	59
4. Discussão .....	61
5. Conclusões .....	64
6. Referências .....	65
CONCLUSÕES GERAIS .....	69

## RESUMO

NGOLO, Aristides Osvaldo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Alterações na qualidade física de um Latossolo Vermelho do Cerrado brasileiro em resposta aos efeitos de longo prazo no manejo do solo.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coorientadores: Igor Rodrigues de Assis e Genelício Crusóé Rocha.

As práticas convencionais de manejo apresentam impacto direto sobre a estrutura do solo, em especial por conta do uso de máquinas e implementos nas atividades de preparo, que imprimem carga sobre a superfície do solo. Essas forças causam aumento potencial da densidade do solo, com conseqüente incremento da resistência oferecida ao crescimento radicular e redução do volume de poros que, por sua vez, afeta a infiltração de água, transporte de solutos e trocas gasosas. Por outro lado, o não revolvimento do solo como preconizado em sistemas como o plantio direto, tem sido propagado como uma prática conservacionista que melhora a qualidade física do solo. As mudanças no uso da terra, juntamente com a queima de combustíveis fósseis, têm sido apontadas como as principais causas das atuais mudanças climáticas globais, e seu estudo tem merecido destaque. Desse modo, tem-se cobrado que as atividades relacionadas à produção agrícola ajudem cada vez mais no sequestro do carbono, um desafio em especial em países de vocação agrícola como o Brasil. Uma dificuldade de muitos estudos de manejo de solo é a ausência de experimentos de longa duração, o que pode comprometer a acurácia e generalização das conclusões. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar os indicadores de qualidade física de um Latossolo Vermelho do Cerrado cultivado com milho por mais de duas décadas sob sistema de plantio direto e de outros sistemas de preparo. O foco principal do trabalho foi a análise de indicadores de qualidade do solo para evidenciar alterações na estrutura do solo e dinâmica do carbono em resposta aos tipos de manejo adotados. A área experimental está localizada dentro da Unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas (MG). Os tratamentos avaliados foram os seguintes manejos do solo: arado de disco (AD), plantio direto (PD) e grade com subsolador (GS). Uma área adjacente de cerrado nativo (CN) foi utilizada como referência. Na organização do presente estudo foram planejados três experimentos, que são apresentados na forma de capítulos. No primeiro capítulo, avaliou-se a qualidade física do solo (0-20 cm de profundidade) em resposta aos manejos avaliados,

sendo efetuadas análises físicas, de carbono orgânico total, resistência à penetração em campo, e determinação de duas frações da proteína do solo relacionada com a glomalina, esta última uma substância produzida por fungos micorrízicos arbusculares e com potencial de contribuir com a adesão das menores partículas do solo. Os resultados demonstram redução do tamanho médio dos agregados nos sistemas de manejo (AD, PD e GS), aumento da densidade do solo, diminuição da porosidade total e da macroporosidade e redução dos teores de carbono orgânico total. Apesar das práticas de manejo e de seus efeitos, não foram afetados a floculação das argilas e os teores de glomalina. A resistência mecânica do solo à penetração indicou maior compactação superficial nos manejos AD e PD, enquanto em GS verificou-se redução dos valores dessa variável e da densidade do solo com o manejo, bem como redução mínima no tamanho dos agregados. No segundo capítulo foram avaliadas a dinâmica do carbono em resposta aos diferentes usos e manejos e o longo prazo de sua adoção. Neste sentido foram determinados os teores de carbono orgânico total (COT) e carbono lábil (CL), bem como o cálculo do índice de manejo de carbono (IMC) e o estoque de carbono corrigido (Est. C). Os resultados indicaram maior acúmulo de carbono e de IMC no manejo com arado de discos em todas as camadas avaliadas. O cálculo do IMC confirmou seu potencial como indicador de boas práticas de manejo do solo. As perdas no estoque de carbono depois da remoção do cerrado nativo e de mais de duas décadas de cultivo foram de 16,7 t ha<sup>-1</sup> (AD); 24,00 t ha<sup>-1</sup> (PD) e 32,2 t ha<sup>-1</sup> (GS). No terceiro capítulo buscou-se avaliar as modificações microestruturais do Latossolo do cerrado estudado depois das mais de duas décadas de cultivo sob diferentes usos e manejos. Para isto, foram conduzidos estudos de micromorfologia e de tomografia computadorizada. Os resultados indicaram que a qualidade física do solo foi impactada pela implantação dos sistemas de manejo, fato evidenciado pelas transformações ocorridas na microestrutura do solo. Do mesmo modo, a tomografia computadorizada indicou alterações na microestrutura, principalmente pelo aumento de microporos e diminuição da conectividade dos poros. Como conclusões finais tem-se que a qualidade física do Latossolo foi impactada com a adoção dos diferentes sistemas de manejos, não sendo o sistema de plantio direto capaz de reduzir ou mitigar tais efeitos. Esse desempenho não esperado do plantio direto foi associado às dificuldades de manutenção de palhada na superfície do solo, o que foi associado à alta decomposição do material orgânico e às restrições hídricas na entressafra que dificultam o desenvolvimento de culturas de inverno.

## ABSTRACT

NGOLO, Aristides Osvaldo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Changes in the physical quality of a brazilian Red Latosol in response to long-term effects on soil management.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisors: Igor Rodrigues de Assis and Genelício Crusoé Rocha.

The conventional management practices have a direct impact on the soil structure, especially due to the use of machines and implements in the preparation activities, which impose load on the soil surface. These forces cause a potential increase in soil density, with consequent increase in the resistance offered to root growth and reduction of pore volume, which in turn affects water infiltration, solute transport and gas exchange. On the other hand, the non-tillage of soil as recommended in systems such as No-Tillage, has been propagated as a conservationist practice that improves the physical quality of the soil. Changes in land use, along with the burning of fossil fuels, have been singled out as the main causes of current global climate change, and their study has deserved prominence. Thus, it has been assumed that activities related to agricultural production increasingly help in the sequestration of carbon, a challenge especially in countries of agricultural vocation like Brazil. One difficulty of many soil management studies is the absence of long-term experiments, which may compromise the accuracy and generalization of the conclusions. In view of the above, the objective of this study was to evaluate the physical quality indicators of a Cerrado Red Latosol cultivated with corn for more than two decades under no-tillage system and other tillage systems. The main focus of the study was the analysis of soil quality indicators to show changes in soil structure and carbon dynamics in response to the management types adopted. The experimental area is located within the Unit of the Brazilian Agricultural Research Corporation, Embrapa Milho e Sorgo, in the municipality of Sete Lagoas (MG). The evaluated treatments were the following managements of the soil: Disk Plow (DP), No-Till (NT) and Disc Harrow+Subsoiler (DHS). An adjacent area of native Cerrado (NC) was used as reference. In the organization of the present study three experiments were planned, which are presented in the form of chapters. In the first chapter, the physical quality of the soil (0-20 cm depth) was evaluated in response to the evaluated managements, being carried out physical, total organic carbon, mechanic resistance to penetration, and determination of two fractions of the

glomalin-related soil protein the latter a substance produced by arbuscular mycorrhizal fungi and with the potential to contribute to the adhesion of the smallest soil particles. The results demonstrate a reduction of the average size of the aggregates in the management systems (DP, NT and DHS), increase in soil density, decrease of total porosity and macroporosity and reduction of total organic carbon contents. Despite the management practices and their effects, flocculation of clays and glomalin contents were not affected. The mechanical resistance to penetration indicated higher surface compaction in DP and NT managements, while in DHS it was verified a reduction in the values of this variable and the soil density with the management, as well as a minimal reduction in the aggregate size. In the second chapter the carbon dynamics were evaluated in response to the different uses and management and the long term of its adoption. In this sense, the values of total organic carbon (TOC) and labile carbon (LC), as well as the calculation of the carbon management index (CMI) and the corrected carbon stock (C.Stock) were determined. The results indicated a higher accumulation of carbon and CMI in the management with disk plowing in all the evaluated layers. The CMI calculation confirmed its potential as an indicator of good soil management practices. Losses in carbon stock after removal of native cerrado and more than two decades of cultivation were  $16.7 \text{ t ha}^{-1}$  (DP);  $24.00 \text{ t ha}^{-1}$  (NT) and  $32.2 \text{ t ha}^{-1}$  (DHS). In the third chapter we sought to evaluate the microstructural modifications of the cerrado Latosol studied after more than two decades of cultivation under different uses and management. For this, studies of micromorphology and computed tomography were conducted. The results indicated that the physical quality of the soil was impacted by the implantation of the management systems, fact evidenced by the transformations occurred in the soil microstructure. Likewise, computed tomography indicated alterations in the microstructure, mainly due to the increase of micropores and decreased connectivity of the pores. As final conclusions, the physical quality of the Latosol was impacted with the adoption of the different management systems, and the no-tillage system was not able to reduce or mitigate these effects. This unexpected performance of no-tillage was associated with the difficulties of maintaining straw on the soil surface, which was associated to the high decomposition of the organic material and to the water restrictions in the off-season that hinder the development of winter crops.

## INTRODUÇÃO GERAL

As atividades de manejo em decorrência das mudanças no uso do solo causam alterações nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Dessas alterações, a que envolve a qualidade física é mais evidente e merecedora de mais estudos, em especial por conta de sua relação com várias funções do solo, notadamente, a produção vegetal, as trocas gasosas e o acúmulo de carbono, a dinâmica de água no perfil e as perdas de solo.

Sistemas de manejo convencionais do solo baseados no seu revolvimento, embora possam incorporar materiais orgânicos e corretivos ao solo, geralmente causam maior exposição da matéria orgânica à oxidação e degradação da estrutura. Por outro lado, sistemas de manejo conservacionista, como é o caso do plantio direto, são preconizados como adequados para a melhoria da estrutura e fertilidade do solo. Os pilares do plantio direto são focados na manutenção da cobertura constante do solo, revolvimento do solo apenas na linha de plantio e rotação de culturas, com consequente esperada redução dos custos de produção e ganhos de porosidade do solo, aumento das taxas de infiltração de água, melhoria na biodiversidade e maior estoque de carbono no solo.

Alterações nas propriedades físicas do solo originam do desequilíbrio causado quando áreas de vegetação natural são convertidas em áreas de produção (Richart et al., 2005). Para o alcance e manutenção da qualidade do solo, alguns indicadores têm sido utilizados para avaliar mudanças que ocorrem nos atributos físicos, como é o caso da densidade, porosidade, resistência mecânica do solo à penetração das raízes e infiltração da água.

Quando se compara o conceito de qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994, 1996) com o de qualidade da água e do ar, o primeiro mostra-se ser muito mais complexo por apresentar fases sólida, líquida e gasosa, bem como pelos inúmeros propósitos ou funções do solo (Nortcliff, 2002). Ainda assim seguem sendo relevantes estudos de qualidade do solo, em especial na atualidade quando a discussão das mudanças climáticas globais é evidente e as alterações no uso da terra é uma das principais fontes de emissão de carbono no Brasil.

Os Latossolos da região do cerrado fazem parte da classe de solos mais amplamente utilizados para atividade agrícola brasileira e apresentam a característica de serem distróficos com textura que varia geralmente de argilosa a muito argilosa.

Apresentam predominância de caulinita na sua fração argila, presença justificada pelas altas temperaturas e umidade típicas de regiões tropicais (KER, 1997). As condições de clima quente e úmido associados à livre drenagem em meio ácido sem remoção de sílica do sistema estão na base da gênese desse mineral (Keller, 1968; Calvert, 1981; Dixon, 1989). Além da caulinita, os Latossolos apresentam na sua fração argila maioritariamente gibbsita, hematita e goethita e, em menores proporções, vermiculita com hidróxi entre camadas, ilita, anatásio, rutilo, maghemita e mesmo haloisita (KER, 1997).

A pedogênese desses Latossolos do cerrado permitem inferir sobre o seu comportamento em nível de microestrutura, sendo a eles associado grande resistência ao uso e manejo e justificando o seu uso por longo tempo em várias regiões do país. Entretanto, torna-se relevante avaliar se essa estrutura que normalmente é granular e forte não está sendo alterada no longo prazo e muitas das metodologias normalmente associadas à avaliação da qualidade física do solo não apresentam sensibilidade para diagnosticar mudanças microestruturais. Neste sentido, o uso de técnicas de imageamento mais modernas, como a micromorfologia e a tomografia computadorizada, apresentam potencial de permitir a visualização e avaliação mais detalhada das feições do solo, o que pode permitir inferências para o futuro acerca do comportamento estrutural e hídrico ao longo do perfil do solo.

Diante do exposto e buscando alcançar os objetivos propostos, a presente tese foi dividida em três capítulos, cujos objetivos específicos são descritos a seguir:

- Capítulo 1: Avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho de Cerrado brasileiro após 21 anos de cultivo intensivo sob plantio direto e outros tipos de manejo.
- Capítulo 2: Avaliar o estoque de carbono orgânico e o índice de manejo de carbono e a relação dessas variáveis com os atributos físicos de um Latossolo Vermelho de Cerrado submetido por mais de duas décadas a diferentes manejos.
- Capítulo 3: Avaliar as transformações micromorfológicas de longo prazo decorrentes de diferentes manejos em um Latossolo Vermelho sob Cerrado.

## Referências

CALVERT, C. S. **Chemistry and mineralogy of iron substituted kaolinite in natural and synthetic systems**. Texas, A & M University. (Tese Ph.D.). p. 224. 1981

DIXON, J. B. **Kaolin and serpentine group minerals**. In: DIXON, J. B. & WEED, S. B. (Eds.). *Minerals in soil environments*. Madison. Soil Science Society of America. p. 467-526. 1989.

KELLER, W. D. **The principles of the chemical weathering**. Columbia, Lucas Brothers, 1968. 111p.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**. v. 5. p. 17-40. 1997.

NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 88. p. 161-168. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00253-5).

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F. & FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina**. v. 26. p. 321-344, 2005.

## Capítulo 1

### **SOIL PHYSICAL QUALITY AFTER 21 YEARS OF CULTIVATION IN A BRAZILIAN CERRADO LATOSOL**

Artigo publicado

NGOLO, A.O.; OLIVEIRA, M.F.; ASSIS, I.R.; ROCHA, G.C.; FERNANDES,  
R.B.A. Soil Physical Quality After 21 Years of Cultivation in a Brazilian Cerrado  
Latosol. Journal of Agricultural Science, v.11, p.124-136, 2019.

## Soil Physical Quality After 21 Years of Cultivation in a Brazilian Cerrado Latosol

Aristides O. Ngolo<sup>1</sup>, Maurílio F. Oliveira<sup>2</sup>, Igor R. Assis<sup>1</sup>, Genelício C. Rocha<sup>1</sup> & Raphael B. A. Fernandes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Soil Science Department, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brazil

<sup>2</sup> Embrapa Milho e Sorgo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Sete Lagoas, MG, Brazil

Correspondence: Raphael B. A. Fernandes, Soil Science Department, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 36570-900, Brazil. E-mail: raphael@ufv.br

Received: November 23, 2018

Accepted: December 27, 2018

Online Published: February 15, 2019

doi:10.5539/jas.v11n3p124

URL: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n3p124>

### Abstract

Long-term studies aiming soil quality evaluation under different soil management strategies are no common. Long-term evaluations provided more reliable contributions to decision-making and practices adoption. This study evaluated the soil physical quality of a Brazilian Cerrado Latosol after 21 years of three different soil management strategies: disc plowing (DP), no-tillage (NT), and disc harrowing+subsoiling (DHS). In comparison to the reference, a soil from a native Cerrado area, the removal of the original vegetation and the implementation of the three soil management strategies increased the soil bulk density (Bd) and reduced soil porosity, macroporosity, soil organic carbon (SOC) and the size of water-stable aggregates, but did not change the glomalin-related soil protein (GRSP) contents and clay flocculation. Similar effects were diagnosed on soil physical quality when is considered only the three different management strategies, especially on soil porosity, Bd, size of water-stable aggregates, SOC and GRSP contents. Strategies of DP and NT increased soil resistance to penetration in the superficial layers, while the annual use of DHS reduced this soil mechanical characteristic. The NT system did not provide increasing of soil organic carbon in comparison to other management practices evaluated. In conclusion, removing the native vegetation affected soil physical quality, but the Brazilian Cerrado soil is resilient to physical damage even when different intensive farming practices are implemented for more than two decades. The limitation of the NT system in improving the soil physical quality is related to climate conditions that determine the non-maintenance of straw on the soil surface.

**Keywords:** conservation agriculture, long-term cultivation, no-tillage

### 1. Introduction

The Latosols in the Cerrado biome located in the central region of Brazil are well-developed pedogenetically, homogeneous, and present small variations between horizons. The natural fertility of these soils is low; however, physical characteristics such as drainage and depth are adequate, which make them very useful for agricultural production. The soil management systems adopted in this region have been more focused on increasing productivity by adopting technological innovations and intensifying land use. In contrast, the Brazilian Cerrado is considered one of the world's biodiversity hotspots, constituting the second largest biome of the South American continent and covering an area of 2,036,448 km<sup>2</sup> in states in the north, northeast, midwest, south, and southeast regions of Brazil (MMA, 2018).

In contrast to air and water quality, which is measured by its degree of contamination (Andrews et al., 2002), soil quality is defined by its ability to function within the limits of the ecosystem and land use to ensure biological productivity, maintaining environmental quality, and promoting plant and animal health (Doran & Parkin, 1994).

The conversion of native vegetation areas into cultivated areas changes the physical, chemical, and biological characteristics of the soils. A common trend is the worsening of attributes related to the soil physical quality, especially the increase in soil compaction, and consequently the increase in erosion and decrease in infiltration rate, and the reduction of soil volume explored by plants (Spera et al., 2004). Only the cultivation practices can promote soil losses from erosion, as indicated by Doetterl et al. (2016) as the tillage erosion. This type of erosion produced by intensive and mechanized management can reach levels similar to those of water erosion.

Loss of soil physical quality is relatively higher in clay soils, where compaction is higher (Horn, 1988). In Brazil, clayed soils are typical in the Cerrado area where technological innovations in agriculture are responsible for success and a significant percentage of the national gross domestic product. Therefore, adopting management and agricultural practices that depreciate the soil physical quality may decrease productivity in this important agricultural region of Brazil.

Soil erosion and degradation are minimized or reduced by using conservative management practices, with an emphasis on no-tillage systems (Wang et al., 2017). According to the Brazilian Federation of No-Tillage Systems, approximately 32 million hectares were planted with summer crops in Brazil before the 2013/2014 harvest under no-tillage systems, and these area size has increased since the beginning of the practice in 1972 (FEBRAPDP, 2018).

Conservation agriculture represented by no-tillage minimizes soil disturbance by reducing the mineralization of organic matter, consequently increasing the organic carbon content and improving soil aggregation and infiltration (Guo et al., 2016).

Impacts resulting from intensive soil management practices have decreased crop productivity, especially when the soil structure is damaged and soil organic matter concentration is decreased (Zhang et al., 2017). In this context, management practices that have a lower impact on the soil and that maintain or increase organic matter concentration are recommended.

The soil organic matter is a critical component associated with the development and maintenance of soil structure and is the focus of different management practices. Several studies demonstrated the role of glomalin-related soil protein (GRSP) in binding soil particles. Sharifi et al. (2018) suggested the use of the ratio between GRSP and soil organic carbon as an indicator of the level of disturbance of crop systems.

The no-tillage system has been highlighted as a conservative soil management practice in Brazil and worldwide, mainly when it is associated with increased soil mulch. This system reduces the risk and rate of erosion and increases soil organic matter, soil infiltration, soil fertility, and overall soil quality (Ogban et al., 2001; Iqbal et al., 2005).

Most studies on the effects of soil management practices on soil quality were short-term and lacked methodological rigor. Long-term studies are rare because of their complexity and costs, which limits the obtaining of results and recommendations with a higher degree of reliability.

The objective of this study was to evaluate the soil physical quality of a Brazilian Cerrado Latosol after 21 years of intensive cultivation under no-tillage and other soil management strategies.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Area Description

This study was carried out in an experimental area of the Brazilian Agricultural Research Company (Embrapa Milho e Sorgo) located in the municipality of Sete Lagoas (19°27.408' S and 44°10.939' W; and 786 m of altitude), Minas Gerais State, Brazil. According to Köppen's classification, the climate of the region is type Cwa, with dry winter and hot summer, and temperatures above 22 °C in the hottest month of the year. The soil of the experimental area was classified as clayey Red Latosol (EMBRAPA, 2013) with a very clayey texture (Table 1). The native soil presents limited fertility, but cultivation practices could improve its chemical attributes.

The study area was previously occupied by pastures. From 1995 to 2016, this area was divided into 320 m<sup>2</sup> plots (20 × 16 m) and used for cultivation under different soil management strategies. In the present study, the areas cultivated using disc plowing (DP), no-tillage (NT), and disc harrowing + subsoiling (DHS) were selected. A nearby and contiguous area with native Cerrado (NC) vegetation (not included in the original experiment) was used as the reference. All evaluated areas, including the NC area, presented similar soil class, slope, landscape position, and face of exposure to solar radiation.

All experimental plots were cultivated with corn, except for NT soils, which was characterized by corn-soybean rotation. The experiment was analyzed considering a completely randomized block design with three replications.

In the DP treatment, the equipment used was a disc plow with three discs (diameter of 32"). A three-shank subsoiler and an intermediate disc harrow with 16 discs (diameter of 28") were used in the DHS treatment. Leveling procedure was performed in DP and DHS treatment using a leveling apparatus after soil preparation. Herbicide glyphosate was applied before cultivation in NT soils for desiccation. This same herbicide was applied to all cultivated areas during the offseason to manage weed growth. All operations were performed using two

tractors (4,150 kg and 5,500 kg).

The corn crop was cultivated (65,000 plants/ha) in all areas using a seed and fertilizer spreader. Annual maintenance and cover fertilization and the application of gypsum and limestone were performed according to technical recommendations based on soil analyses. Phytosanitary control in the study area was carried out by applying insecticides, with two to three applications after cultivation according to technical recommendations.

The corn-soybean rotation was performed in NT treatment. In the years of soybean cultivation, a total of 500 kg/ha of NPK formulation 4-30-16 was applied to this crop at sowing (280,000 plant/ha). Millet was grown with irrigation in the NT areas in the off-season in the years 2008 and 2010, and the formed and incorporated biomass was 60 t/ha of green mass. No other crop was used in the off-season of other experiment years.

Table 1. Soil chemical and physical characteristics of the study areas (0-0.20 m depth)

	NC	DP	NT	DHS
pH (H <sub>2</sub> O)	4.97	4.79	5.86	5.14
P (mg/dm <sup>3</sup> )	0.5	7.6	8.63	12.77
K (mg/dm <sup>3</sup> )	16	132.33	84.67	84.67
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1.03	3.71	3.63	3.12
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0.12	1.15	1.12	0.9
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1.1	0.07	0.03	0.23
H+Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	7.3	5.93	4.9	6.2
SB (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1.19	5.21	4.97	4.24
CEC-t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	2.29	5.27	5.01	4.48
CEC-T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	8.49	11.14	9.87	10.44
V (%)	14	46.83	51.13	40.6
m (%)	48	1.3	0.7	5.23
Sand (kg/kg)	0.12	0.16	0.19	0.17
Silt (kg/kg)	0.07	0.09	0.10	0.08
Clay (kg/kg)	0.84	0.75	0.71	0.75
Pd (kg/dm <sup>3</sup> )	2.24	2.40	2.32	2.32

*Note.* NC = native Cerrado; DP: disc plowing; NT = no-tillage; and DHS = disc harrow + subsoiler. Analyses: pH in water-ratio of 1:2.5; P and K using Mehlich-1 extractor; Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> Al<sup>3+</sup> with KCl 1 mol/L; H+Al with calcium acetate 0.5 mol/L, pH 7.0; SB = sum of bases; CEC = cation exchange capability effective (t, at original pH) and at pH 7.0 (T); V = base saturation; m = aluminum saturation; Pd = particle density. All procedures are according to EMBRAPA (2017).

## 2.2 Methods and Techniques

Disturbed and undisturbed samples were collected in July 2016. The disturbed samples from 0.00-0.20 m were obtained using an auger probe. Three composite samples were used per treatment, corresponding to 20 single samples collected per plot. In the laboratory, soil samples were sieved through a 2.0 mm sieve to obtain soil material for the analyses. The undisturbed samples were obtained using volumetric cylinders of approximately 0.05 m in height and diameter. In each treatment, six rings were collected in the center of the layer at a depth of 0.00-0.10 m.

The soil mechanical resistance to penetration (RP) was evaluated in the field in February 2017 at a depth of up to 60 cm using a PenetroLOG digital penetrometer (model PLG1020; Falker), and measurements were performed every 0.01 m at a constant speed. The data were extracted from the storage unit using Penetro-LOG software and graphed and expressed by the mean values in 10 cm intervals, as follows: RP1 (0-10 cm), RP2 (10-20 cm), RP3 (20-30 cm), RP4 (30-40 cm), RP5 (40-50 cm), and RP6 (50-60 cm).

Wet aggregate stability was evaluated in samples pre-moistened and shaken in a set of sieves of different mesh sizes. After agitation, the weight of the samples retained in each sieve was used to calculate the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) according to Embrapa (2017).

Soil bulk density (Bd) was determined using the volumetric ring method, and particle density (Pd) was measured using the volumetric flask method. Microporosity (Mi) was determined in undisturbed samples after equilibrium to the -0.006 MPa on a tension table. Total porosity (Pt) was estimated by the equation:

$$Pt = [1 - (Bd/Pd)] \times 100 \quad (1)$$

Macroporosity (Ma) was calculated by the equation:

$$Ma = Pt - Mi \quad (2)$$

Water-dispersible clay (WDC) was determined using the pipette method. The degree of flocculation (DF) relative to the total clay (TC) content was calculated according to the equation:

$$DF = [(TC - WDC)/TC] \times 100 \quad (3)$$

All analyses were performed according to Embrapa (2017). The soil total organic carbon (TOC) was determined according to the Walkley & Black method (Yeomans & Bremner, 1988).

Physical fractionation of soil organic matter was carried out to obtain particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MOM) according to the methodology proposed by Cambardella & Elliott (1993). The TOC in the MOM (TOC-MOM) was determined according to Yeomans and Bremner (1988). The TOC in the POM (TOC-MOP) was obtained by subtracting the TOC-MOM from the total soil organic carbon.

The specific surface area ( $m^2/g$ ) of soil samples was quantified by measuring the water vapor sorption (Quirk, 1955).

The GRSP concentration, including the easily extractable glomalin (EEG) and total glomalin (TG), was determined according to Wright et al. (1996). For EEG processing, autoclaving was performed once. For TG, autoclaving was performed six times until the solution reached a light-yellow color. These two fractions were quantified by the Bradford (1976) colorimetric method using a spectrophotometer and bovine serum albumin as the standard.

### 2.3 Statistical Analysis

The data were subjected to analysis of variance to assess differences between the treatments after confirming the normality of residuals using the Shapiro-Wilk test ( $p < 0.05$ ). Dunnett's posthoc test ( $p < 0.10$ ) was used to compare the means of the treatments relative to the control area (NC). The mean values in the cultivated areas were compared using Tukey's test ( $p < 0.10$ ). All statistical analyses were performed using R software version 3.4 (R Core Team, 2017) and the "ExpDes.pt" package developed by Ferreira et al. (2009).

## 3. Results and Discussion

The soil physical and chemical attributes are shown in Table 2. The different management practices for more than 20 years changed around one-third of the soil attributes in comparison to the native Cerrado ( $p < 0.10$ ).

### 3.1 Effects on Soil Structure

The soil structure was used to access the soil physical quality because this parameter is highly sensitive to soil management practices. The native Cerrado area (NC) presented a larger and more stable aggregates as indicated by MWD and GMD values. Beutler et al. (2001) observed a similar result in an adjacent site of the present study. The authors verified higher GMD in the NC area, although the soil of no-tillage (NT) treatment has presented larger aggregates ( $> 2$  mm) in a proportion similar to that of the NC area at a depth of 0 to 5 cm.

The removal of the native vegetation in the cultivated areas and the use of maintaining soil management practices for two decades reduced the average size of the aggregates, although the differences between the three cultivated areas (NT, DP, and DHS) were not significant. The presence of larger and more stable aggregates increases soil pre-consolidation pressure (Letey, 1985; Dexter, 1991), facilitates water infiltration by increasing macroporosity, and promotes water retention in micropores (Dexter, 1988).

The bulk density (Bd) increased with the land use and management in the three cultivated areas in comparison to the NC area. Nonetheless, we cannot find differences among the cultivated areas. The Bd value in soil with NT ( $1.33 \text{ kg/dm}^3$ ) was 56% higher than in the NC area ( $0.85 \text{ kg/dm}^3$ ). Increases in Bd values under NT systems have been reported in the literature (Sheehy et al., 2013; Domínguez & Bedano, 2016). For this reason, is usual to recommend periodic and minimal tillage in NT soils to improve their physical properties. Considering that, Camara and Klein (2005) observed the reduction of Bd values and the increase of water infiltration in soils submitted to the scarification and managed under NT after six years.

The soil porosity (P) was not decreased with cultivation using disc plowing compared with the NC area. However, these soil characteristics was reduced in NT soils and in the soils managed by harrowing and subsoiling. The increase in Bd in NT soils decreased the soil porosity, as reported in previous studies (Silveira et al., 1999; Silva et al., 2008). In contrast, an increase in soil porosity in the surface layer was observed by Loss et al. (2017) in vegetables grown under NT compared to conventional tillage, and this result was attributed to the higher number of roots and consequently higher occurrence of voids in the soil matrix. In turn, Costa et al. (2003) found no differences in total porosity, macroporosity and microporosity in a Brazilian Latosol managed in the long-term under NT and conventional tillage.

Table 2. Physical and chemical characteristics of a Brazilian Cerrado Latosol managed using different practices for more than 20 years

	NC	DP	NT	DHS	CV
MWD (mm)	2.36±0.07	1.80*±0.04	1.90*±0.07	1.92*±0.06	3.9
GMD (mm)	1.86±0.10	1.14*±0.06	1.20*±0.07	1.22*±0.05	6.2
Bd (kg/dm <sup>3</sup> )	0.85±0.05	1.14*±0.04	1.33*±0.09	1.14*±0.01	7.9
Total porosity (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.62±0.01	0.53 ±0.02	0.42*±0.04	0.51*±0.01	9.7
Microporosity (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.34±0.02	0.42*±0.00	0.40*±0.02	0.42*±0.01	3.8
Macroporosity (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.28±0.02	0.11*±0.02	0.02*±0.02	0.09*±0.01	54.0
WDC (kg/kg)	0.07±0.01	0.08±0.00	0.09±0.02	0.08±0.00	27.5
RP1 (0-10 cm) (MPa)	0.23±0.03	0.52 b±0.06	1.68 a*±0.14	0.20 c±0.02	17.4
RP2 (10-20 cm) (MPa)	0.51±0.10	2.48 b*±0.23	3.44 a*±0.22	0.70 c±0.02	13.07
RP3 (20-30 cm) (MPa)	0.65±0.13	2.90 a*±0.09	3.22 a*±0.31	1.29 b*±0.26	15.8
RP4 (30-40 cm) (MPa)	0.79±0.19	2.68*±0.13	2.47*±0.12	1.90*±0.40	21.3
RP5 (40-50 cm) (MPa)	1.01±0.28	2.02*±0.09	1.90*±0.09	1.88*±0.33	18.3
RP6 (50-60 cm) (MPa)	1.31±0.34	1.55±0.05	1.54±0.10	1.58±0.23	17.2
TOC (g/kg)	44.32±2.11	31.92*±2.71	30.54*±2.32	31.94*±1.64	5.5
TOC-MOM (g/kg)	23.65±1.32	21.55±1.62	19.69±1.79	21.35±2.17	5.5
TOC-POM (g/kg)	20.67±3.02	10.37*±1.09	10.85±1.54	10.59*±0.54	34.0
SS (m <sup>2</sup> /g)	114.08±4.86	98.40±4.59	95.76 ±6.78	95.24±4.37	4.6

Note. NC = native Cerrado; DP = disc plowing; NT = no-tillage system; DHS = disc harrow + subsoiler.

MWD = mean weight diameter; GMD = geometric mean diameter; Bd = bulk density; WDC = water-dispersible clay; RP = soil resistance to penetration; TOC = total organic carbon; TOC-MOM = TOC of the mineral-associated organic matter fraction; TOC-POM = TOC of the particulate organic matter fraction; and SS = soil specific surface area; Means followed by standard errors. CV = coefficient of variation in the cultivated areas (DP, NT, and DHS). Samples collected at a depth of 0 to 20 cm, except for the evaluation of Bd (0-0.1 m) and RP. The means followed by an asterisk (\*) were significantly different from the reference area (NC) using Dunnett's test ( $p < 0.10$ ). For the cultivated treatments (DP, NT and DHS) the means followed by the same letter in each line were not significantly different using Tukey's test ( $p < 0.10$ ).

The dynamics of soil macropores (Ma) and micropores (Mi) was affected by soil use and management. The removal of the NC and the implementation of treatments cultivated increased the Mi and decreased Ma. Under the NT system, there was a reduction in Ma values, reaching values of 0.02 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Similarly, Stone and Silveira (2001) observed that Bd and Mi increase whereas Ma was decreased in NT soils in Brazilian Cerrado. Moreover, Costa et al. (2009) verified that Ma values were increased in a Humic Cambisol managed by plowing and harrowing during 15 years in comparison to soils under NT for nine years.

Soil structure affects the growth and development of crop roots. In this context, the analysis of soil Ma is essential because macropores are crucial for soil water infiltration and are the preferred route for root growth (Calonego et al., 2011). Given that the larger pores are the most affected during soil compaction, good management practices should be prioritized, especially for the traffic of agricultural machines (Bergamin et al., 2010).

Although the average size of aggregates (WMD and GMD) was decreased by adopting cultivation practices, even after two decades, these practices did not affect the clay flocculation. The change in inputs, the decrease in

TOC and the mechanical practices used in the cultivated areas did not change the water dispersible clay (WDC) contents (NC: 91%; DP: 90%; NT: 88% and DHS: 89%). These results differ from those verified by Beutler et al., (2001) in an adjacent area, wherein WDC was increased with native Cerrado removal and after crops grown under NT and conventional tillage.

### 3.2 Effect on Soil Mechanical Resistance to Penetration

Soil compaction is related to increases in Bd values and soil mechanical resistance to penetration (RP). The RP (Figure 1) was increased in the cultivated areas, especially under NT and DP treatments. In contrast, the annual use of DHS reduced RP and did not decrease the aggregate size, soil porosity and Bd compared with the other two soil preparation method (Table 2).

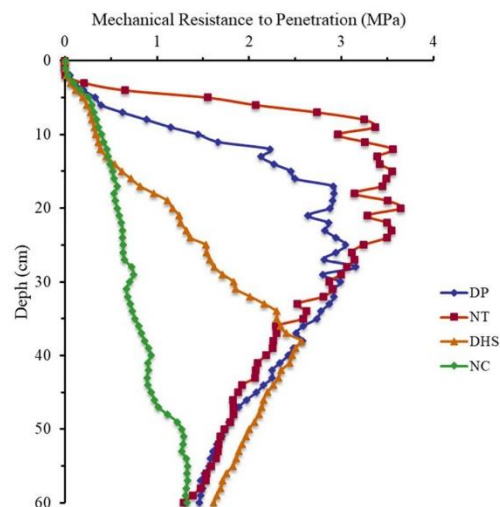


Figure 1. Soil resistance to penetration in a Cerrado Latosol under different land management after more than 20 years. NC = native Cerrado; DP = disc plowing; NT = no-tillage system. DHS = disc harrow + subsoiler. The assessment was performed in February 2017 (rainy season)

The use of the DHS provided similar RP values to those found for the NC area up to 15 cm depth (Figure 1). From 15 cm RP is increased with the depth in DHS treatment, reaching the similar values of areas managed by DP and NT at a depth of 35-40 cm. Subsoiling can improve root growth conditions as observed by Seixas et al., (2005), who verified higher vertical and horizontal distribution of roots at the end of corn cultivation. The authors also noticed the root growth was not limited to a depth of 30-40 cm after subsoiling as previously observed in compacted soil.

Others studies show benefits of subsoiling to the soil structure under certain conditions. After ten years of cultivation Tian et al. (2014) observed that subsoiling combined with the maintenance of straw on the soil was as efficient as NT in improving the soil physical quality in China, leading to higher accumulation of carbon in stable macroaggregates and increased levels of soil total organic carbon.

Previous studies demonstrated the occurrence of subsurface compaction in NT systems. Camargo and Alleoni (1997) recommend the use of subsoiling to disrupt these layers without performing soil inversion and considering at the depth not reached by plow and scarificator. Similarly, Seki et al. (2015) recommend the practice of subsoiling in NT systems because its effects persist after harvesting, and Bd values are lower than those before the procedure.

Martínez et al. (2011) observed that compaction was decreased by subsoiling in NT areas and promote the highest crop yield in oat-wheat rotation compared to the other evaluated treatments. The same authors suggest that the use of conservative practices such as NT should be monitored and intervention is recommended when compaction occurs.

The RP values evaluated at successive depths of 10 cm (Table 2) showed differences among the three cultivated areas (DP, NT and DHS) compared to the NC area at all depths, except for the highest one (50-60 cm). From 0 to

50 cm no-tillage promote higher RP values than the reference area (NC). Soil resistance to penetration with disc plowing and disc harrow and subsoiler was higher than that in the native Cerrado at a depth of 10-50 cm and 20-50 cm, respectively. In the soil superficial layer (0-10 cm), the lower values of RP with DP and DHS may be due to soil tillage during soil preparation for cultivation.

In general, cultivation practices increase the soil resistance to penetration until 50 cm depth. The no-tillage system presented the highest RP values until 30 cm depth whereas DHS-treated soils presented the lowest RP (Table 2). No differences among cultivated areas (NT, DP and DHS) were diagnosed after 30 cm depth. Treatments with soil revolving (DP and DHS) presented similar soil resistance to penetration to reference area (NC) in the superficial layer studied (RP1). Disc plowing treatment exhibited high resistance to penetration at 21-30 cm depth, coinciding with the depth of cut of disc plow.

The soil resistance to penetration verified at the no-tillage area is coherent with the Bd values. These results suggest the formation of a “no-till pan” as proposed by Reichert et al. (2009), which usually develops under long-term no-tillage and is commonly found at of 7-20 cm depth. These authors characterize this layer with high mechanical strength, high bulk density and low porosity. Hamza and Anderson (2005) highlight the preference of some farmers for conventional tillage over no-tillage systems because although can increase soil organic matter, it is common to find critical values of RP (> 2 MPa) in no-tillage areas and severe restrictions to root growth can be observed. However and in contrast to this restrictions, most parts of Brazilian farmers consider no-tillage promotes economic environmental and social benefits and its adoption is more than 50% of the cultivated area with annual crops (Freitas & Landers, 2014).

Our results show around 3.5 MPa as the higher RP found. The critical value of RP varies among crops and for corn 1.5 to 4.0 MPa are usually considered critical, although values of 1.3 MPa can reduce 50% of plant growth (ROSOLEM et al., 1999).

Soil moisture should be considered when evaluating RP Lower RP values in the native Cerrado and the use of DHS coincided with higher soil moisture (Table 3). In turn, higher RP values in no-tillage and disc plowing treatments were coincident with lower moisture. Therefore, considering that the treatments were close, without evidence of differences in rainfall, the maintenance of higher soil moisture was only achieved in the areas managed with harrow with the subsoiler.

It is well known that resistance to penetration depends on soil Bd and moisture. We can assume that the differences in RP values were due to soil moisture because there were no differences in Bd among the three cultivated areas (Table 2). Therefore, a linear relationship between RP and soil moisture (Figure 2) indicates that a 1% rise in gravimetric moisture decrease in RP of 0.1 MPa.

Table 3. Gravimetric water content during the mechanical resistance to penetration measurement

Layer (cm)	Gravimetric Moisture			
	NC	DP	NT	DHS
0-20	0.40	0.21	0.22	0.36
20-40	0.42	0.26	0.26	0.32
40-60	0.35	0.28	0.28	0.27

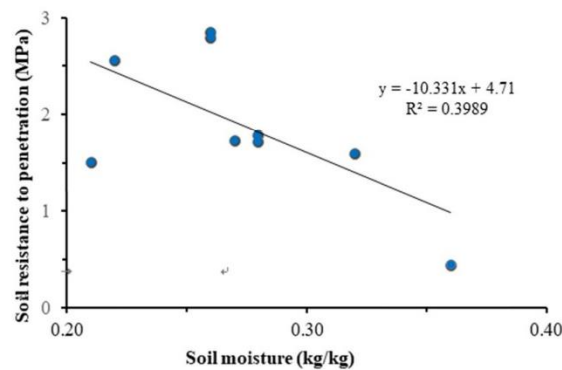


Figure 2. Relationship between soil mechanical resistance to penetration (MPa) and soil moisture (kg/kg) in Cerrado Latosol managed using different practices for more than 20 years (Disc Plowing; No-Tillage and Disc Harrow + Subsoiler)

### 3.3 Effects on Soil Carbon Dynamics

Removing the native Cerrado reduced the soil TOC in the three cultivation areas (NT, DP and DHS) (Table 2). The maintenance of straw on the surface at the end of each harvest with the use of no-tillage was not enough to increase soil TOC and the NT system presented similar TOC contents to those in DP and DHS treatments. The expected high performance of the NT system concerning increase TOC contents was not verified. This result diverges to Costa et al. (2009) who observed that tillage using a disc plow and disc harrow in an integrated crop-livestock system decreased TOC relative to the NT system.

We would remark that the TOC data were shown in terms of mass (g/kg) although most studies performed measurements using volume measurement ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ). However, even considering the results as volume the trend of lower TOC associated with NT was maintained. The data transformed using the soil bulk density resulted in the following TOC contents: NC:  $38.12 \text{ g}/\text{dm}^3$ ; DP:  $30.32 \text{ g}/\text{dm}^3$ ; NT:  $29.76 \text{ g}/\text{dm}^3$  and DHS:  $30.34 \text{ g}/\text{dm}^3$ .

The limitation in maintaining the straw on the soil surface in no-tillage systems may explain the obtained results. Bernardi et al. (2003) reported that keeping straw on the soil surface in NC areas is limited by climatic conditions, where it favors organic matter decomposition and command the absence of winter crops because of water scarcity. However, the same authors no longer consider these problems as obstacles in the Cerrado because early summer cultivars are available allowing growing off-season crops.

Most of the soil organic carbon was associated with TOC-MOM as also reported by Balin et al. (2017) and Loss et al. (2009). This organic matter fraction accounts for 53% of the carbon in the NC area and 64-67% in the three cultivated areas (NT, DP and DHS). These results indicate that cultivation increased TOC-MOM and decreased TOC-POM. After more than 20 years TOC-MOM was two-fold higher than TOC-POM in the cultivated areas.

### 3.4 Effect on Soil Specific Surface Area

The specific surface area is strongly correlated with soil attributes, including organic matter clay content, and clay fraction mineralogy (Brunauer, 1943). Specific surface area reflects the soil reactivity to different physical-chemical phenomena. Although the native Cerrado soil presented a higher clay concentration (Table 1) and higher organic carbon content (Table 2) than the other evaluated cultivation areas. There were no differences between NC and cultivated (NT, DP and DHS) areas. However, we diagnosed the expected correlation between specific surface area and TOC ( $r = 0.76$ ,  $p < 0.01$ ) and clay ( $r = 0.67$ ,  $p < 0.01$ ) contents.

The hypothesis not proven in the present study was that no-tillage system could always increase soil surface area by increasing soil organic carbon.

### 3.5 Effect on Glomalin-Related Soil Protein

Glomalin is a glycoprotein released by arbuscular mycorrhizal fungi and has a vital role in forming and stabilizing soil aggregates (Franzluebbers et al., 2000). In this study, two protein fractions—easily extractable glomalin (EEG) and total glomalin (TG)—were evaluated. While EEG is more recently deposited in the soil. TG is composed of different substances with varying levels of recalcitrance.

The cultivation treatments (NT, DP and DHS) did not change the soil EEG contents in comparison to the native Cerrado, but we found differences among cultivated treatments (Figure 3). Considering conventional practices, disc plowing provides more EEG soil contents than harrowing + subsoiling; however, the difference was slightly and with little or no practical relevance.

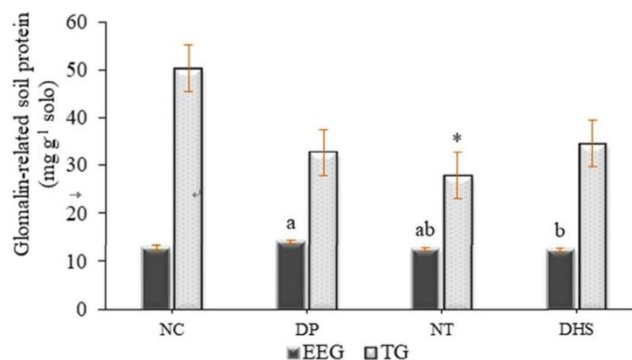


Figure 3. Easily extractable glomalin (EEG) and total glomalin (TG) contents in a Cerrado Latosol conducted by different soil management strategies for more than 20 years. NC = native Cerrado; DP = disc plowing; NT: no-tillage system; DHS = disc harrow + subsoiler. The bars indicate the standard error of the mean. For the same variable in the cultivated areas (DP, NT and DHS), the values with the same letter in each column were not significantly different among each other using Tukey's test ( $p < 0.10$ ). The values in asterisks (\*) indicated significant differences between the cultivated areas (DP, NT and DHS) and the native Cerrado (NC) area using Dunnett's test ( $p < 0.10$ ).

There were no differences in soil TG contents between the three cultivated areas (NT, DP and DHS) after 20 years of soil management. The soil TG contents were decreased in no-tillage treatment compared with native Cerrado. Nonetheless, Goss, and Varennes (2002) observed that the colonization of mycorrhizae in NT and minimum-tillage systems was increased, providing higher TG contents compared with a conventional tillage system evaluated. The increase in soil TG is usually expected after adopting sustainable practices such as no-tillage. These practices may favor the long-term development of soil microorganism by increasing food and energy resources and reducing environmental disturbance (Wang et al., 2017).

### 3.6 Effects on Soil Physical Quality

The results indicated that the decline in soil physical quality was similar among the three soil management strategies (NT, DP and DHS) even after more than two decades of intensive use. The soil physical resilience of the clayey and very clayey Oxisols from the Brazilian Cerrado is well documented in the literature and is related to the long-term stability of the soil microstructure, provided by pedogenetic processes over time and the action of physical, chemical and biological agents on oxidic matrix (Schaefer, 2001; Oliveira et al., 2017).

The failure of the no-tillage system to provide better physical conditions than the other two soil management practices evaluated in the present study may be related to the difficulty in keeping the straw on the soil surface. Therefore, the NT system studied fails with one of the three components of these conservation systems, because minimal soil disturbance and crop rotation are commonly adopted. This situation can be common in tropical regions with dry winter and where irrigation is limited. Although this treatment should not be considered a traditional no-tillage system, it represents the strategy used in many areas of Cerrado region of Central Brazil, where no winter crops are used and the sowing is performed directly on the remains of dried weeds. In this region, this procedure is widely used as no-tillage and is the primary form of soil management. The difficulty in maintaining straw on the soil surface in regions of Central Brazil because of the absence of rainfall from May to August was reported by Alvarenga et al. (2008), who highlighted that the great challenge in these areas is to maintain the minimum of desirable straw on the soil surface, which should never be less than 4.0 t/ha.

## 4. Conclusions

Removal of the native Cerrado vegetation and intensive cultivation for more than two decades impact similarly on soil physical quality independently of the soil management system used.

Improvements in the physical quality of no-tillage system are limited when maintaining straw on the soil surface is unfeasible because of climate restrictions.

#### Acknowledgements

The authors are grateful for financial support of the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais-FAPEMIG-Brasil (Code APQ-00887-17) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, Brasil) (Finance Code 001), and for scholarship to the first author from the Programa de Estudantes-Convênio de Pós-graduação (PEC-PG, CAPES). Thanks also to Embrapa Milho e Sorgo for the support in the experimental area.

#### References

- Alvarenga, R. C., Cruz, J. C., & Viana, J. H. M. (2008). *Cultivo do milho: Plantas de cobertura de solo* (4th ed.). Embrapa Milho e Sorgo, Sistemas de Produção. Retrieved from <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35330/1/Plantas-cobertura>
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture Ecosystems & Environment*, *90*, 25-45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Balin, N. M., Ziech, A. R. D., De Oliveira, J. P. M., Girardello, V. C., Stumpf, L., & Conceição, P. C. (2017). Frações da matéria orgânica, Índice de manejo do carbono e atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. *Revista Scientia Agraria*, *18*, 85-94. <https://doi.org/10.5380/rsa.v18i3.53114>
- Bergamin, A. C., Vitorino, A. C. T., Franschini, J. C., Souza, C. M. A., & Souza, F. R. (2010). Compactação em um Latossolo vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *34*, 681-691. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009>
- Bernardi, A. C. C., Machado, P. L. O. A., Freitas, P. L., Coelho, M. R., Leandro, W. M., Oliveira Junior, J. P., ... Carvalho, M. C.S. (2003). *Correção do solo e adubação no sistema de plantio direto nos Cerrados* (p. 22, Embrapa Solos, Documentos 46). Rio de Janeiro: Embrapa Solos. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/60852/1/doc-46-2003.pdf>
- Beutler, A. N., Silva, M. L. N., Curi, N., Ferreira, M. M., Pereira, F. I. A., & Cruz, J. C. (2001). Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos Cerrados no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *25*, 129-136. <https://doi.org/10.1590/S0100-0683200100010014>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Brunauer, S. (1943). The adsorption of gases and vapors. *Physical adsorption*. London, Princeton Univ. Press.
- Calonego, J. C., Gomes, T. C., Santos, C. H., & Tiritan, C. S. (2011). Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. *Bioscience Journal*, *27*, 289-296.
- Camara, R. K., & Klein, V. A. (2005). Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *29*, 789-796. <https://doi.org/10.1590/S0100-0683200500050014>
- Camargo, O., & Alleoni, L. R. F. (1997). *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas* (p. 132). Piracicaba, SP: ESALQ.
- Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1993). Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, *56*, 449-457. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81490-6.50036-4>
- Costa, A., Albuquerque, J. Mafra, A. L., & Silva, F. R. (2009). Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *33*, 235-244. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000200001>
- Costa, F. S., Albuquerque, J. A., Bayer, C., Fontoura, S. M. V., & Wobeto, C. (2003). Propriedades físicas de um Latossolo bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *27*, 527-535. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300014>

- Davis, C. M., & Fox, J. F. (2009). Sediment fingerprinting: review of the method and future improvements for allocating nonpoint source pollution. *Journal of Environmental Engineering*, *135*, 490-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:7\(490\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:7(490))
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, *11*, 199-238. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5)
- Dexter, A. R. (1991). Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*, *20*, 87-100. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90127-J](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90127-J)
- Doetterl, S., Berhe, A. A., Nadeu, E., Wang, Z., Sommer, M., & Fiener, P. (2016). Erosion deposition and soil carbon: A review of process level controls experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, *154*, 102-122. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.005>
- Domínguez, A., & Bedano, J. C. (2016). The adoption of no-till instead of reduced tillage does not improve some soil quality parameters in Argentinean Pampas. *Applied Soil Ecology*, *98*, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.014>
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., & Stewart, B. A. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 3-21). SSSA, Madison, WI. <https://doi.org/10.1017/S0889189300006123>
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo* (3rd ed., p. 573). Brasília, DF: Embrapa.
- FEBRAPDP (Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação). (2018). *Evolução da área cultivada no sistema de plantio direto na palha-Brasil*. Retrieved from [https://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO\\_DO\\_SPD\\_NO\\_PARANA\\_2014.pdf](https://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO_DO_SPD_NO_PARANA_2014.pdf)
- Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., & Nogueira, D. A. (2009). *Função em código R para analisar experimentos em DBC simples em uma só rodada*. Jornada Científica da Universidade Federal de Alfenas-MG, Alfenas, Resumos. Alfenas: Unifal-MG.
- Franzluebbers, A. J., Wright, S. F., & Stuedemann, J. A. (2000). Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA. *Science Society of America Journal*, *64*, 1018-1026. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431018x>
- Freitas, P. L., & Landers, J. N. (2014). The Transformation of Agriculture in Brazil Through Development and Adoption of Zero Tillage Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*, *2*, 35-46. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30012-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30012-5)
- Goss, M. J., & Varennes, A. (2002). Soil disturbance reduces the efficacy of mycorrhizal associations for early soybean growth and N<sub>2</sub> fixation. *Soil Biology Biochemistry*, *34*, 1167-1173. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00053-6)
- Guo, L. J., Zheng, S. X., Cao, C. G., & Li, C. F. (2016). Tillage practices and straw-returning method affect topsoil bacterial community and organic C under a rice-wheat cropping system in central China. *Scientific Reports*, *6*, 6-33155. <https://doi.org/10.1038/srep33155>
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K., (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res*, *82*, 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Horn, R. (1988). Compressibility of arable land. *Catena*, *11*, 53-71.
- Iqbal, M., Hassan, A. U., Ali, A., & Rizwanullah, M. (2005). Residual effect of tillage and farm manure on some soil physical properties and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, *7*, 54-57.
- Letey, J. (1985). Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. In B. A. Stewart (Eds.), *Advances in Soil Science* (vol 1, pp. 277-294). Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3_8)
- Loss, A., Junior, E. S., Schmitz, D., Veiga, M., Kurtz, C., & Comin, J. J. (2017). Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *11*, 105-113. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.6144>
- Loss, A., Pereira, M. G., Schultz, N., Anjos, L. H. C., & Silva, E. M. R. (2009). Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. *Ciência Rural*, *39*, 78-83. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000036>

- Martínez, I., Ovalle, C., Del Pozo, A., Uribe, H., Valderrama, N., Prat, C., Sandoval, M., Fernandez, F., & Zagal, E. (2011). Influence of conservation tillage and soil water content on crop yield in dryland compacted Alfisol of Central Chile. *Chilean Journal of Agriculture Research*, 71, 615-622. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392011000400018>
- Ogban, P. I., Ekanem, T. P., & Etim, E. A. (2001). Effect of mulching methods on soil properties and growth and yield of maize in Southeastern Nigeria. *Tropical Agriculture (Trinidad)*, 78, 82-89.
- Oliveira, V. A., Jacomine, P. K. T., & Couto, E. G. (2017). Solos do Bioma Cerrado. In N. Curi, R. F. Novais, P. Vidal-Torrado, & C. E. G. R. Schaefer (Eds.), *Pedologia: Solos dos Biomas Brasileiros* (pp. 177-226). Viçosa, MG: SBCS.
- Quirk, J. P. (1955). Significance of surface areas calculated from water vapour sorption isotherms by the use of BET equation. *Soil Science*, 80, 423-430. <https://doi.org/10.1097/00010694-195512000-00001>
- Reichert, J. M., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., & Riquelme, U. F. B. (2009). Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijocero em quatro sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 310-319. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>
- Rosolem, C. A., Fernandez, E. M., Andreotti, M., & Crusciol, C. A. C. (1999). Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34, 821-828. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000500013>
- Schaefer, C. E. R. (2001). Brazilian latosols and their B horizon microstructure as long-term biotic constructs. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 909-926. <https://doi.org/10.1071/SR00093>
- Seixas, J., Roloff, G., & Ralisch, R. (2005). Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. *Ciência Rural*, 35, 794-798. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000400007>
- Seki, A. S., Seki, F. G., Jasper, S. P., Silva, P. R. A., & Benez, S. H. (2015). Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. *Revista Ciência Agronômica*, 46, 460-468. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150027>
- Sharifi, Z., Azadi, N., Rahimi, S., & Certini, G. (2018). The response of glomalin-related soil proteins to fire or tillage. *Geoderma*, 329, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.008>
- Sheehy, J., Six, J., Alakukku, L., & Regina, K. (2013). Fluxes of nitrous oxide in tilled and no-tilled boreal arable soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.007>
- Silva, J. H., Silveira, P. M., & Oliveira, J. P. (2008). *Alterações na densidade e na porosidade de um Latossolo cultivado com feijão causadas pelo sistema de preparo do solo* (IAC Documentos 85). Congresso Nacional de Pesquisa de Feijão, Campinas, Ciência e tecnologia na cadeia produtiva do feijão. Campinas: IAC.
- Silveira, P. M., Silva, J. G., Stone, L. F., & Zimmermann, F. J. P. (1999). Alterações na densidade e na microporosidade de um Latossolo Vermelho-Escuro causadas pelo sistema de preparo do solo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 29, 145-149.
- Spera, S. T., Santos, H. P., Fontaneli, R. S., & Tomm, G. O. (2004). 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*, 28, 533-542. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300014>
- Stone, L. F., & Silveira, P. M. (2001). Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25, 395-401. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200015>
- Tian, S., Wang, Y., Ning, T., Li, N., Zhao, H., Wang, B., Li, Z., & Chi, S. (2014). Continued no-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels. *Agronomy Journal*, 106, 212-218. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0288>
- Wang, Y., Chunyue, L., Cong, T., Greg, D. H., Jared, L., DeForest., & Shuijin, H. (2017). Long-term no-tillage and organic input management enhanced the diversity and stability of soil microbial community. *Science of the Total Environment*, 609, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.053>
- Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 161, 575-586. <https://doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>
- Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic

carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19, 1467-1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

Zhang, X., Xiuli, X., Zhu, A., Zhang, J., & Yang, W. (2017). Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *Catena*, 156, 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.012>

### Copyrights

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## Capítulo 2

### ESTOQUE DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO APÓS DUAS DÉCADAS DE MANEJO DO SOLO EM UM LATOSSOLO DO CERRADO

#### Resumo

O monitoramento dos teores de carbono do solo em sistemas de cultivo em resposta às mudanças no uso da terra tem sido uma estratégia fundamental para o entendimento da dinâmica deste elemento químico no sistema solo/planta/atmosfera. Tais alterações são mais evidentes com o passar do tempo de uso do solo, muito embora experimentos de longa duração nem sempre estão disponíveis para estudo. Diante deste cenário, o presente estudo objetivou avaliar alterações nos teores de carbono do solo, índices de manejo de carbono (IMC), estoque de carbono (Est. C) e alguns atributos físicos de um Latossolo do cerrado brasileiro submetido por mais de duas décadas aos seguintes manejos: arado de disco (AD), plantio direto (PD) e grade com subsolador (GS). Uma área adjacente de vegetação nativa de cerrado (CN) foi utilizada como referência. O manejo do solo nos tratamentos cultivados com milho (AD, PD e GS) aumentou a densidade em todas as camadas avaliadas e reduziu a porosidade total do solo, sendo o maior efeito verificado no plantio direto. Dos tratamentos cultivados, o uso do arado de disco foi o que proporcionou o maior acúmulo de carbono lábil e carbono orgânico total, bem como revelou maior IMC. O plantio direto adotado não foi comparativamente capaz de manter ou aumentar os teores de carbono do solo, o que foi atribuído à dificuldade de manutenção da palhada em superfície. Em situações climáticas em que a palhada não é mantida sobre o solo, formas de preparo convencionais podem proporcionar maior acúmulo de carbono.

#### 1. Introdução

As alterações no uso da terra associadas ao manejo inadequado do solo podem causar impactos negativos na qualidade física e estoque e dinâmica do carbono no solo.

Estudos indicam que apenas na camada da superfície até 1 m de profundidade, os solos são capazes de armazenar cerca de três vezes mais carbono do que toda a biomassa vegetal mundial e duas vezes mais do que o carbono presente na atmosfera (BATJES, 2014). No entanto, quando submetidos ao uso e manejo, todo esse estoque de carbono pode ser ameaçado.

São frequentes os estudos que visam quantificar os teores e avaliar o estoque de carbono em solos (Petter et al., 2017; Sayão et al., 2018; Ma et al., 2018; Duval et al., 2018). Nos solos muito intemperizados de regiões tropicais isto é de especial importância, tendo em vista a grande dependência desses solos da matéria orgânica, principal responsável pela sua capacidade de troca catiônica (Canellas et al., 2000) e qualidade física.

A qualidade física dos solos tropicais pode ser afetada pelas diversas práticas de manejo adotadas, o que pode impactar ainda no estoque de carbono. A estabilidade e maior tamanho dos agregados do solo, proporcionada pela ação de compostos estabilizadores tais como a matéria orgânica (SIX et al., 2000; STETSON et al., 2012), é fundamental para a proteção do carbono orgânico do solo (COS) contra a mineralização e consequente liberação de CO<sub>2</sub>. A quebra dos agregados do solo e consequente maior exposição do carbono do solo à oxidação microbiana é preocupante quando áreas de vegetação nativa são convertidas em sistemas de cultivo convencional (Cambardella e Elliot, 1993). Disto resulta a preocupação com a manutenção ou aumento dos teores de carbono no solo, uma vez que maiores teores de COS são associados a maior proporção de macroagregados (Virto et al., 2011) e, conseqüentemente, ao maior estoque de carbono (Andruschkewitsch et al., 2014).

O plantio direto tem se destacado como prática de manejo que busca aumentar os teores de carbono do solo e melhorar a sua qualidade física. Aos sistemas de monocultivo e sistema convencional são frequentemente associados indícios de degradação da qualidade física, química e biológica do solo. Efeitos semelhantes em sistema de plantio direto têm sido verificados no Cerrado brasileiro, onde enfrenta-se dificuldades para a produção de plantas de cobertura, principalmente em períodos de entressafra (DUVAL et al., 2016).

A matéria orgânica do solo apresenta frações em diferentes estágios de decomposição. Algumas dessas frações apresentam maior sensibilidade e são usadas como indicadores de alterações no uso e manejo do solo (SIX et al., 2002). Desta forma, é interessante na avaliação da qualidade dos solos incluir também outros indicadores que expressem não somente a quantidade de carbono do solo, mas também a sua qualidade.

A partir de conceitos de labilidade, Blair (1995) propôs o uso do Índice de Manejo de Carbono do solo (IMC) que avalia a qualidade do solo por meios

quantitativos. O IMC permite avaliar as mudanças que ocorrem nas formas de carbono do solo em resposta às práticas de manejo adotadas nos diferentes agroecossistemas.

A literatura científica descreve com detalhes as diferentes práticas disponíveis de manejo do solo e seu potencial impacto sobre o estoque de carbono do solo. Entretanto, são poucos os estudos que integram o estoque e a labilidade das formas de carbono nos solos associados ao IMC especialmente em diferentes sistemas de preparo (Ghosh et al., 2016). Também são poucas as informações disponíveis com experimentos de longa duração, que podem proporcionar resultados aplicáveis de maior confiabilidade para a recomendação e tomada de decisões nos agroecossistemas.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o estoque de carbono orgânico e o índice de manejo de carbono e a relação dessas variáveis com os atributos físicos de um Latossolo Vermelho de Cerrado submetido por mais de duas décadas a diferentes manejos.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1 Descrição do local**

O presente trabalho foi conduzido na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Milho e Sorgo, situada no município de Sete Lagoas-MG (Figura 1). O local apresenta como ponto central as coordenadas 19° 27,408' S e 44° 10,939' W, e localiza-se em altitude de 786 m. O tipo climático regional segundo a classificação de Köppen é o Cwa, caracterizado por apresentar inverno seco e verão quente, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C. A classe de solo predominante na região é o Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2013), de textura muito argilosa e com limitada fertilidade natural do ambiente nativo e melhoria dos atributos químicos com o cultivo.



**Figura 1.** Localização da área experimental da Embrapa – Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, Brasil.

Até o ano da coleta das amostras de solo, a área apresentava um histórico de cultivos de 22 anos (1995-2017) conduzidos em parcelas experimentais de 20 x 20 m (400 m<sup>2</sup>), nas quais foram efetuadas diferentes práticas de manejo do solo em delineamento em blocos casualizados com três repetições. Três tratamentos foram selecionados para o presente estudo, correspondentes ao uso do Arado de Disco (AD), adoção de sistema de Plantio Direto (PD) e uso de Grade com Subsolador (GS). Uma área de vegetação nativa de cerrado (CN) próxima foi utilizada como referência. Nos três tratamentos de manejo do solo é feito o cultivo anual com milho grão, cujo plantio é feito na safra de verão (outubro/novembro), exceto no tratamento PD, no qual é cultivada a sucessão milho/soja em anos diferentes.

O sistema Plantio Direto onde o estudo foi realizado é caracterizado por apresentar baixíssima ou inexistência cobertura do solo durante o ano inteiro. Nesse sentido, o uso de plantas de cobertura com sistema radicular mais profundo nos períodos de entressafra seria uma estratégia eficaz para a incorporação de matéria orgânica ao longo do perfil do solo, mas é inviabilizada pelo inverno seco na região. Assim, o não revolvimento do solo e a manutenção da cobertura ao longo do ano possibilitaria a caracterização desse sistema como um Plantio Direto clássico. Entretanto, a cobertura do solo é garantida apenas pelo material remanescente após a

colheita do milho ou soja, o qual não tem sido suficiente para cobrir o solo no inverno. Essa situação de dificuldade de manutenção da cobertura do solo na época seca do inverno é comum na região do Cerrado. No tratamento considerado como plantio direto o que se tem claramente é o não revolvimento do solo ao longo de mais de duas décadas desde que o experimento foi estabelecido.

Todos os tratamentos receberam ao longo dos anos a aplicação de glifosato no período de entressafra e, no caso do plantio direto, uma nova aplicação logo antes do plantio. Todas as unidades experimentais são consideradas homogêneas quanto à declividade, posição na paisagem e face de exposição à radiação solar.

## **2.2 Coleta de amostras de solo**

Amostras indeformadas e deformadas de solo foram coletadas em campo para as análises previstas. As amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos (0,05 m de altura e diâmetro) no centro das camadas de 0–20; 20–40 e 40–60 cm de profundidade, e as deformadas em toda a extensão dessas mesmas camadas. Em cada unidade experimental e camada foram coletadas duas amostras indeformadas e uma amostra composta deformada a partir de seis amostras simples tomadas aleatoriamente.

## **2.3 Análises**

Todas as análises físicas foram realizadas no laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, seguindo recomendações de Embrapa (2017).

As amostras indeformadas foram utilizadas para a determinação da microporosidade ( $M_i$ ) e densidade do solo ( $D_s$ ). Na sequência, o material proveniente da estufa foi utilizado para determinação da densidade de partículas ( $D_p$ ) pelo método do balão volumétrico. Com os dados de  $D_s$  e  $D_p$  foi calculada a porosidade total do solo ( $P_T$ ) pela equação:  $P_T = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p}\right) * 100$ . A macroporosidade ( $M_a$ ) foi calculada por diferença ( $M_a = P_T - M_i$ ).

Amostras deformadas foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm e submetidas à determinação da granulometria, equivalente de umidade (EU) e caracterização química de rotina. A determinação de EU fornece a quantidade de água

em equilíbrio com o solo após centrifugação a 2.440 rpm durante 30 min. A partir dos valores de EU foi estimada a capacidade de campo (CC) das amostras de solo segundo a equação:  $CC = 0,081 + 0,888EU$  (Ruiz et al., 2003).

#### 2.4 Formas de carbono no solo

Amostras de solo foram maceradas e passadas em peneira de 0,25 mm para a análise do carbono orgânico total (COT) por oxidação com solução 0,167 mol L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> em meio ácido e com fonte externa de aquecimento (Yeomans & Bremner, 1988). O teor de carbono lábil (CL) foi determinado por oxidação com solução 0,033 mol L<sup>-1</sup> de KMnO<sub>4</sub> (Shang e Tiessen, 1997). Com os teores de COT e CL, foi calculado por diferença o carbono não-lábil (CNL).

O estoque de carbono (Est. C) foi calculado segundo a equação  $Est. C = \frac{COT \times D_s \times e}{10}$  (Veldkamp, 1994), em que *e* representa a espessura da camada amostrada. No cálculo de Est. C foram utilizados os valores de densidade do solo (D<sub>s</sub>) da área de referência (Cerrado nativo) como recomendado por Vergütz et al. (2010), a fim de se evitar influência das práticas de manejo.

#### 2.5 Índice de manejo de carbono

Os valores de COT, CL e CNL foram usados na estimativa dos índices de compartimento de carbono (ICC) e índice de labilidade (IL), passo prévio para a determinação do índice de manejo de carbono (IMC). Os passos para se chegar ao cálculo do IMC obedeceram às equações abaixo:

$$CNL = COT - CL$$

$$L = \frac{CL}{CNL}$$

$$ICC = \frac{COT (cult.)}{COT (ref.)}$$

$$IMC(\%) = ICC \times IL \times 100,$$

Onde:

L: labilidade do carbono;

COT (cult.): carbono orgânico total da área cultivada;

COT (ref.): carbono orgânico total da área de referência.

## 2.6 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar possíveis diferenças entre tratamentos, após prévia avaliação da normalidade pelos testes Kolmogorov-Smirnov (KS) e Shapiro-Wilk. Na sequência foi usado o teste post-hoc de Dunnett ( $p < 0,10$ ) para a comparação das médias dos tratamentos cultivados com a área de referência (CN). E, finalmente, o teste Tukey ( $p < 0,10$ ) foi utilizado para a comparação entre as médias dos tratamentos cultivados (AD, PD e GS). Toda a análise estatística foi conduzida utilizando o software R (R Core Team, 2017) com auxílio dos pacotes “*agricolae*” versão 1.2-8 (De Mendiburu, 2017) e “ExpDes.pt” (Ferreira et al., 2009).

## 3. Resultados e Discussão

A caracterização química de rotina do solo da área de estudo indica o carácter ácido do solo (Tabela 1) que é acentuado em profundidade na área de vegetação nativa de cerrado (CN). O mesmo não se observa nos tratamentos cultivados, fato que se deve ao histórico de aplicação de corretivos desde a implementação do experimento. De maneira semelhante observa-se um incremento das bases trocáveis nos tratamentos cultivados em relação ao CN. Os tratamentos cultivados apresentam menores teores de matéria orgânica do que o cerrado nativo, como esperado após a remoção da vegetação nativa.

A caracterização da granulometria das amostras de solo indicou não haver diferenças texturais entre os tratamentos e as camadas avaliadas, confirmando a uniformidade da textura no perfil e a semelhança de classe de solo em toda a área experimental. O solo é muito argiloso, apresentando conteúdo de argila de 75 % ( $\pm 3$  %), de silte de 10 % ( $\pm 2$  %) e 16 % ( $\pm 1$  %) de areia.

A densidade do solo foi incrementada nas áreas cultivadas em relação à área de cerrado nativo. O manejo do solo, e em especial, o tráfego de máquinas e implementos, além da redução dos teores de matéria orgânica do solo são os responsáveis por esses resultados. Os incrementos em termos de Ds na camada de 0 a 20 foram de 33% (AD), 40% (PD) e 31% (GS) em comparação com a área de referência. Nas outras duas profundidades avaliadas, o incremento foi menor, dada a menor influência do sistema de manejo adotado em camadas mais profundas. Disso infere-se que sistemas de manejo principalmente aqueles em que no preparo do solo predomina o tráfego de máquinas agrícolas, e sistemas de plantio direto quando não se

Tabela 1. Caracterização química de um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado sob diversos tipos de manejo por mais de duas décadas de cultivo.

		CN	AD	PD	GS	CN	AD	PD	GS	CN	AD	PD	GS
		0 - 20 cm				20 - 40 cm				40 - 60 cm			
pH		4,9	5,39	5,32	5,1	4,8	5,16	5,25	4,96	4,59	4,84	5,15	5,09
P	mg/dm <sup>3</sup>	0,8	3,7	2,9	4,1	0,4	2,3	0,4	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3
K		16	58	74	64	9	38	41	32	6	11	15	14
Ca <sup>2+</sup>		1,93	3,48	2,74	2,3	0,79	2,82	2,06	1,37	0,3	1,38	1,67	1,36
Mg <sup>2+</sup>		0,16	0,99	0,67	0,64	0,06	0,72	0,47	0,37	0,04	0,38	0,35	0,27
Al <sup>3+</sup>		0,94	0,19	0,28	0,38	1,5	0,28	0,19	0,75	1,5	0,66	0,38	0,47
H + Al	cmol/dm <sup>3</sup>	8,8	5,4	5,6	6	8,7	5,7	4,8	5,1	7,9	5,4	4,2	4,3
SB		2,13	4,62	3,6	3,1	0,87	3,64	2,64	1,82	0,36	1,79	2,06	1,67
t		3,07	4,81	3,88	3,48	2,37	3,92	2,83	2,57	1,86	2,45	2,44	2,14
T		10,93	10,02	9,2	9,1	9,57	9,34	7,44	6,92	8,26	7,19	6,26	5,97
V	%	19,5	46,1	39,1	34,1	9,1	39	35,5	26,3	4,4	24,9	32,9	28
m		30,6	4	7,2	10,9	63,3	7,1	6,7	29,2	80,6	26,9	15,6	22
P-Rem	mg/L	15,3	23,1	25,4	19,4	11,9	16,6	22,3	17,7	9,9	13,3	17,8	17,9

CN: Cerrado Nativo; AD: Arado de Disco; PD: Plantio Direto; GS: Grade com Subsolador; pH em água, relação 1:2,5; P e K: Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup> - Mg<sup>2+</sup> - Al<sup>3+</sup>: Extrator: KCL 1 mol/L; H+Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0; SB: Soma de Bases; t: Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T: Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V: Índice de Saturação por Bases; m: Índice de Saturação por Alumínio; P-Rem: Fósforo Remanescente.

Tabela 2. Atributos físicos de Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado após longo período sob diferentes usos e manejo

Trat.	Prof. cm	Ds ----- kg dm <sup>-3</sup> -----	Dp -----	Mi -----	Ma m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	PT -----	CC kg kg <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
CN	0-20	0,98	2,34	0,43	0,15	0,58	0,39	0,38
	20-40	0,98	2,43	0,43	0,22	0,65	0,38	0,38
	40-60	1,03	2,45	0,44	0,16	0,59	0,37	0,39
AD	0-20	1,30 *ab	2,50	0,48 *	0,01 *	0,48 *	0,39	0,50
	20-40	1,24 *	2,52 *	0,46 *	0,04 *b	0,51 *b	0,38	0,47
	40-60	1,20 *ab	2,57	0,45	0,08	0,53	0,37	0,45
PD	0-20	1,37 *a	2,54	0,46 *	0,01 *	0,46 *	0,38	0,52
	20-40	1,26 *	2,59 *	0,46	0,06 *b	0,52 *ab	0,37	0,47
	40-60	1,26 *a	2,58	0,44	0,07	0,51 *	0,38	0,47
GS	0-20	1,28 *b	2,43	0,47 *	0,00 *	0,47 *	0,37	0,48
	20-40	1,16 *	2,58 *	0,43	0,12 *a	0,55 *a	0,36	0,42
	40-60	1,15 * b	2,55	0,42	0,13	0,55	0,36	0,41
CV (%)	0-20	2,76	4,07	2,41	44,81	3,89	-	-
	20-40	4,2	1,61	3,16	32,95	6,73	-	-
	40-60	4,49	2,8	4	37,46	4,68	-	-

CN: Cerrado Nativo; AD: Arado de Disco; PD: Plantio Direto; GS: Grade com Subsolador. DS: Densidade do solo; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade Total; Mi: Microporosidade, Ma: Macroporosidade. CC: Capacidade de Campo estimada a partir do equivalente de umidade (Ruiz, 2003). (\*) Diferente do CN pelo teste de Dunnett ( $p < 0,1$ ) na mesma profundidade; médias de tratamentos seguidas por letras diferentes na linha e na mesma profundidade diferem entre si pelo teste Tukey ( $p < 0,1$ ).

mantém cobertura do solo suficiente, tendem a incrementar a densidade do solo.

Aumento da Ds e consequente compactação associado ao não revolvimento do solo em plantio direto também já foi relatado por STEFANOSKI et al., (2013), que destacaram ser essencial a presença de palhada em superfície associada à rotação de culturas para o alcance do sucesso desse tipo de manejo.

Na comparação entre os tratamentos cultivados, a densidade do solo foi menor quando da utilização da grade associada ao subsolador (GS) na camada mais superficial (0 – 20 cm), enquanto o PD apresentou maior valor de Ds. Esse resultado é coerente com o observado por Carvalho e Vargas (2004), que verificaram a redução da Ds com a subsolagem.

A propriedade física mais afetada pelo uso agrícola do solo foi a macroporosidade, que atingiu valores próximos a zero na camada mais superficial avaliada. Mais de 90 % dos macroporos foram perdidos com a retirada da vegetação nativa e implantação do cultivo. Os poros maiores são frequentemente os mais afetados pela compactação do solo nos cultivos agrícolas, principalmente em áreas de manejo convencional do solo e plantio direto, onde são usadas máquinas pesadas para as atividades de preparo e demais práticas culturais (Wang, 2018). Perdas de macroporos são preocupantes, estando potencialmente associadas a perdas na infiltração da água no solo (Garcia & Righes, 2008, Freitas et al., 2017), e consequente aumento de processos erosivos.

Reduções expressivas, mas em menor intensidade, foram verificadas nos valores de macroporosidade nas duas camadas mais profundas. Na camada de 20 a 40 cm, os tratamentos AD e PD foram os que mais perderam em macroporosidade (77 %), enquanto que a perda no GS foi menor (45 %). A profundidade de corte do subsolador é de aproximadamente 40 cm, contribuindo para uma maior profundidade de mobilização do solo se comparado ao uso do arado de disco (até 20 cm, aproximadamente) e plantio direto (sem revolvimento do solo).

A perda de macroporos implicou em ganhos de microporosidade na camada mais superficial de todos os tratamentos cultivados. Nas duas camadas avaliadas entre 20 e 60 cm, a microporosidade não foi influenciada pelas práticas de manejo, à exceção no tratamento de arado de disco na profundidade de 20 a 40 cm. Esse menor efeito sobre a microporosidade implicou que as alterações na porosidade total do solo foram determinadas pelo efeito das práticas de manejo na macroporosidade. Ganhos de microporosidade a partir da perda em macroporosidade são frequentemente relatados na literatura (Colodel et al., 2018; Rosa et al., 2018; Castro et al., 2013).

A atividade agrícola implicou em perdas de porosidade total nos três sistemas de manejo avaliados. Nas camadas de 0–20 cm e de 20–40 cm de profundidade, a perda média de porosidade total foi de 19 % nos tratamentos cultivados, caindo de 0,58 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> e 0,65 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> para um valor médio de 0,47 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> e 0,53 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Essa perda de espaço poroso equivale a 220 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de poros perdidos na camada mais superficial. Na camada mais profunda (40–60 cm), apenas o plantio direto proporcionou redução da porosidade do solo em relação à área de cerrado nativo, com perda de 14 % de poros.

Os dados obtidos indicam que o não revolvimento do solo no plantio direto não está contribuindo com a melhoria da porosidade do solo, como também observado em outros estudos (Holthusen et al., 2018; Sales et al., 2016). Um dos problemas encontrados na área é a não persistência de palhada no tratamento de plantio direto e o não cultivo de cultura na entressafra, por conta de limitações de água no período do inverno, que impedem o cultivo de plantas de cobertura. O uso de culturas de cobertura tem apresentado grande potencial quando se pretende incrementar matéria orgânica em profundidade nos sistemas de plantio direto, e isto pode favorecer a qualidade física do solo. Incremento de densidade do solo e redução da porosidade total em solos sob plantio direto quando comparados com área de vegetação nativa também foram verificados por Andrade et al. (2009), mesmo avaliando oito diferentes culturas de cobertura em sistema de plantio direto em um Latossolo Vermelho distrófico.

A manutenção da palhada sobre o solo é prejudicada pela alta temperatura da região especialmente na época úmida, que favorece a decomposição e dificulta o acúmulo de matéria orgânica nesses ambientes.

A retirada da vegetação nativa e a implantação dos tratamentos cultivados não alteraram o conteúdo de água associados à capacidade de campo (Tabela 2). A alteração estrutural que afetou a densidade do solo e a macroporosidade nas áreas cultivadas não foram suficientes para alterar a quantidade de água no solo associada a esse potencial, muito provavelmente pelo alto teor de argila do solo em estudo.

As formas de carbono no solo foram afetadas pelo manejo adotado (Tabela 3). A implantação das áreas cultivadas nos três sistemas de manejo adotados reduziu em média  $38,1 \pm 9,3$  % os teores de carbono orgânico total (COT) nos solos nas três profundidades consideradas, em comparação com o cerrado nativo. Essa perda de carbono com a conversão de áreas de vegetação nativa em campos agricultáveis impacta nas propriedades originais e afeta a qualidade do solo (Karp et al., 2015). Na camada superficial (0-20 cm) as perdas de teores de COT em relação ao CN foram de 26 % (AD), 35 % (PD) e 48% (GS). O uso da grade associada com a subsolagem durante mais de duas décadas implicou na perda de quase metade do carbono do solo da área nativa e na manutenção do menor valor de COT (17,5 g/kg) dentre os tratamentos. Os maiores teores de COT foram associados ao manejo com arado de disco, e a adoção do plantio direto proporcionou teores intermediários de COT em relação ao observado em AD e GS na camada de 0-20 cm. Nas duas outras camadas

mais profundas a adoção dos diferentes sistemas de manejo não causou diferenças em termos de COT quando comparada entre os tratamentos.

A remoção da vegetação original e os diferentes manejos adotados reduziu os valores de carbono lábil dos solos em todas as profundidades do tratamento grade com subsolador e nas duas camadas mais profundas do plantio direto. Essa fração de carbono é considerada a forma mais facilmente oxidável e mais sensível ao manejo do solo (Blair et al., 1995; Kolář et al., 2011; Aguilar, 2015). O uso do arado de disco não afetou essa forma mais lábil de carbono, o que pode ser associado à menor perda de carbono (COT) com este manejo em relação à área de referência.

Tabela 3. Formas e estoque de carbono no solo nos diferentes usos e manejo do solo avaliados

Tratamento	Prof. cm	COT g. kg <sup>-1</sup>	CL	Est C t.ha <sup>-1</sup>	IMC %
CN	0-20	34,00	2,04	66,5	100
	20-40	28,79	1,60	56,3	100
	40-60	22,35	1,34	46,2	100
AD	0-20	25,49 *a	1,84	49,8 *a	85,0
	20-40	22,25	1,59	43,5	93,2
	40-60	14,95 *	0,83	30,9 *	64,9
PD	0-20	21,76 *ab	1,65	42,5 *ab	82,4
	20-40	17,07 *	0,86 *	33,4 *	53,8 *
	40-60	12,14 *	0,71 *	25,1 *	54,3 *
GS	0-20	17,54 *b	1,32 *	34,3 *b	68,6
	20-40	15,71 *	0,91 *	30,7 *	59,4 *
	40-60	11,97 *	0,50 *	24,7 *	38,3 *
CV	0-20	11,4	18,0	12,6	18,7
	20-40	17,4	24,2	17,4	21,4
	40-60	8,3	29,9	9,2	29,2

CN: Cerrado Nativo; AD: Arado de Disco; PD: Plantio Direto; GS: Grade com Subsolador. COT: carbono orgânico total; CL: carbono lábil; Est. C: estoque de carbono no solo; IMC: índice de manejo de carbono. CV: coeficiente de variação (expresso em %). (\*) Diferente do CN pelo teste de Dunnett ( $p < 0,1$ ) na mesma profundidade; médias de tratamentos seguidas por letras diferentes na coluna e na mesma profundidade diferem entre si pelo teste Tukey ( $p < 0,1$ ).

O estoque de carbono no solo foi reduzido em todas as camadas avaliadas pelas diferentes práticas de manejo, à exceção da profundidade de 20-40 cm com o uso do arado de disco. As perdas em estoque de carbono com o cultivo por mais de duas décadas, na camada mais superficial (0-20 cm) foram de 25,1 % com o uso do arado

de disco, de 36,1 % no plantio direto e de 48,4 % com o uso da grade associada com subsolador. Na comparação entre sistemas de manejo adotado, diferenças entre tratamentos somente foram verificadas na primeira camada (0-20 cm), com o manejo com arado de disco apresentando o maior (49,8 t ha<sup>-1</sup>) e grade com subsolador o menor (34,3 t ha<sup>-1</sup>) estoque de carbono. Os dados obtidos indicaram que o uso do arado de disco foi o que proporcionou o maior, e o plantio direto, o menor estoque de carbono. Esses resultados divergem dos dados obtidos por Hickmann & Costa (2012), que verificaram maior teor e estoque (não corrigido) de carbono após 23 anos de cultivo em sistema de plantio direto em comparação com o uso de arado de disco e de outros sistemas de manejo convencionais na Zona da Mata Mineira.

A manutenção da palhada em plantio direto e o uso de plantas de cobertura desempenham papel fundamental para o êxito do sistema, sendo associada à melhorias na fertilidade do solo e no incremento de carbono no agroecossistema (Zheng et al., 2014). Entretanto, a produção e manutenção de biomassa em sistemas de plantio direto no cerrado tem sido apontada como um dos principais desafios nesse ambiente de adversidades ambientais (TIVET et al., 2013). A manutenção de umidade nos solos frequentemente argilosos associada a temperaturas mais elevadas dificultam a formação e manutenção da palhada de cobertura. Disto resulta a possível explicação para os menores teores de carbono orgânico total e lábil obtidos no presente trabalho em comparação às áreas de plantio convencional (AD).

O índice de manejo de carbono (IMC) indica que o manejo com arado de disco foi o que proporcionou maior incorporação/manutenção de carbono no solo. Redução nos valores de IMC foram verificadas nas duas camadas mais profundas (20-40 e 40-60 cm) dos manejos plantio direto e grade com subsolador.

Os valores de IMC, bem como as frações de carbono lábil (CL), têm sido usados como indicadores mais sensíveis para alterações decorrentes de práticas de manejo do solo em diversos sistemas agrícolas (Ghosh et al., 2016; Chatterjee et al., 2018). Nestes estudos, o sistema plantio direto tem se destacado majoritariamente com maiores valores de IMC (Loss et al., 2011, Conceição et al., 2014), sendo referendado seu potencial enquanto prática de manejo que aumenta ou mantém os teores de carbono no solo e que, portanto, proporciona maior sustentabilidade do sistema de cultivo. No presente estudo esse comportamento somente foi verificado na camada mais superficial, uma vez que entre 40 e 60 cm verificou-se redução do IMC. A justificativa para tal redução é possivelmente devido à falta de input de carbono em subsuperfície

por plantas de cobertura que deveriam ser cultivadas na entressafra e pelo uso de uma rotação mais diversificada e com uso de culturas de raízes de diferentes características e potenciais de exploração do solo em subsuperfície. Também é verdade que alguns trabalhos mencionam que o plantio direto pode nem sempre proporcionar maiores valores de IMC (Zhao et al., 2014).

A relação entre as diferentes variáveis avaliadas por análise de correlação é apresentada na Tabela 4. Correlações destacadas foram identificadas entre densidade do solo e a porosidade total, refletindo que o aumento de Ds reduz PT, em especial pela redução de Ma e consequente incremento de Mi. Correlações entre formas de carbono também foram diagnosticadas, claramente em função da contribuição de COT e CL para o cálculo de Est. C e IMC. Uma correlação clara e negativa também foi notada entre IMC e DS, refletindo o efeito da compactação sobre a manutenção de carbono no solo.

Tabela 4. Matriz de correlação entre as variáveis de solo avaliadas após mais de duas décadas de manejo de um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado

	DS	Mi	COT	EstC	CL	IMC	Argila	Ma	PTotal
Dp	0,47*	-0,03 <sup>ns</sup>	-0,64***	-0,50**	-0,58***	-0,50**	-0,40*	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>
DS		0,59***	-0,46**	-0,07 <sup>ns</sup>	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,44**	-0,53***	-0,85***	-0,87***
Mi			0,06 <sup>ns</sup>	0,35*	0,30 <sup>o</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,77***	-0,60***
COT				0,91***	0,84***	0,68***	0,30 <sup>o</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>
EstC					0,86***	0,60***	0,14 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>
CL						0,85***	0,31 <sup>o</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
IMC							0,40*	0,23 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>o</sup>
Argila								0,36*	0,42**
Ma									0,97***

Dp: Densidade de partículas; DS: Densidade do Solo; Mi: Microporosidade; COT: Carbono Orgânico Total; Est C: Estoque de Carbono; CL: Carbono Lábil; IMC: Índice de Manejo de Carbono; Ma: Macroporosidade; PTotal: Porosidade total. Índices de correlação significativos a 10 % (<sup>o</sup>), 5 % (\*), 1 % (\*\*) e 0,1 % (\*\*\*).

De todo o exposto nota-se que o plantio direto adotado não tem sido capaz de proporcionar grandes melhorias na qualidade física do solo e no acúmulo de matéria orgânica no solo. Essa situação verifica-se por conta da não utilização de todos os preceitos exigidos pelo sistema de plantio direto, que inclui além do não revolvimento,

a rotação de culturas de safra e o investimento em plantas de cobertura na entressafra. Uma vez que essas duas últimas premissas não têm sido observadas, pode-se afirmar que o plantio direto como é feito pode ser entendido apenas como um cultivo mínimo, situação que, por sinal, repete-se em grande parte do planalto central brasileiro, onde a especialização dos agricultores levam à monocultura, e o inverno mais seco dificulta o estabelecimento das culturas de cobertura. Por esse motivo, alguns autores têm recomendado a prática da escarificação com alguma regularidade em áreas de cultivo mínimo ou mesmo de plantio direto com problemas de compactação (Camara e Klein, 2005; Seki et al., 2015).

#### 4. Conclusões:

Quando não efetuado em sua integralidade, o sistema plantio direto não é capaz de reduzir as perdas de carbono do solo. Isto em especial é verificado quando não se consegue a produção e manutenção de palhada na superfície, bem como não verifica a efetiva rotação de culturas e o plantio de culturas de cobertura.

Em situações que o plantio direto se resume ao cultivo mínimo, formas de preparo convencionais podem revelar maior acúmulo de carbono no solo.

#### 5. Referências:

- AGUILAR, M. G.; ALFARO, M.R.; MARTIN, B. C.; LEÓN, D. P.; VILA, L. F. Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. **Cultivos Tropicales**. v. 36. p. 64-70. 2015. <http://www.redalyc.org/revista.oa?id=1932>
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 13. p. 411-418. 2009.
- ANDRUSCHKEWITSCH, R.; KOCH, H. J.; LUDWIG, B. Effect of long-term tillage treatments on the temporal dynamics of water-stable aggregates and on macro-aggregate turnover at three German sites. **Geoderma**. v. 217-218. p. 57-64. 2014.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **Eur. J. Soil Sci.** v. 65, p. 4-21, 2014.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems, **Australian Journal of Agriculture Research**, v. 46. p. 1459-1466, 1995. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3, Ed, Porto Alegre: Bookman, p. 298 – 356. 2013.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 29, p. 789-796. 2005.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 57. p. 1071-1076. 1993.

CANELLAS, L.P.; BERNER, P.G.; SILVA, S.G.; BARROS E SILVA, M. & SANTOS, G.A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 35. p. 133-143. 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000000100016>.

CARVALHO, J. E. B. & VARGAS, L. **Manejo e Controle de Plantas Daninhas em Frutíferas**. In: VARGAS, L; ROMAN, E. S. Manual de manejo e controle de plantas daninhas. EMBRAPA. p. 481-517. 2004.

CASTRO, A. M. C.; SANTOS, K. H.; MIGLIORANZA, É.; GOMES, C. J. A.; MARCHIONE, M. S. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. **Agrarian**. v. 6. p. 415-422. 2013. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v6i22.1964>

CHATTERJEE, S.; BANDYOPADHYAY, K. K.; PRADHAN, S.; SINGH, R.; DATTA, S. P. Effects of irrigation, crop residue mulch and nitrogen management in maize (*Zea mays* L.) on soil carbon pools in a sandy loam soil of Indo-gangetic plain region. **Catena**. v. 165. p. 207-216. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.005>

COLODEL, J. R.; PIERANGELI, M. A. P.; SOUZA, M. F. P.; CARVALHO, M. A. C.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos e biológicos de Argissolo Vermelho-Amarelo Amazônico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista de Ciências Agrárias**. v. 41. p. 287-297. 2018. <http://dx.doi.org/10.19084/RCA17253>.

CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**. v. 44. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782014005000004>.

CURI, N. **Lithosequence and toposequence of oxisols from Goiás and Minas Gerais States, Brazil**. West Lafayette, Purdue University. p. 158. 1983. (Tese Ph.D.)

DE MENDIBURU, F. **Agricolae: statistical procedures for agricultural research**. R package version 1.2-8. 2017. <<https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/agricolae>>.

DENARDIN, R. B. N.; MATTIAS, J. L.; WILDNER, L. P.; NESI, C. N.; SORDI, A.; KOLLING, D. F.; BUSNELLO, F. J.; CERUTTI, T. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó-SC. **Ciência Florestal**, v. 24. p. 59-69, 2014.

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; MARTÍNEZ, J. M.; LÓPEZ, F. M.; WALL, L. G. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: influence of site features and seasonality. **Soil Tillage Res.** v. 159. p. 9–22. 2016.

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; MARTÍNEZ, J. M.; LIMBOZZI, F. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. **Catena.** v. 171. p. 316-326. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.023>.

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. p. 529-538. 1995.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA D. A. **Função em código R para analisar experimentos em DBC simples, em uma só rodada.** In: JORNADA CIENTIFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS-MG, 2, 2009, Alfenas. Resumos... Alfenas: Unifal-MG, 2009.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências.** v. 26. p. 8-25. 2017.

GARCIA, S. M.; RIGHES, A. A. Vertical mulching e manejo da água em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 32. Viçosa. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200037>.

GHOSH, B. N.; MEENA, V. S.; ALAM, N. M.; PRADEEP DOGRA.; RANJAN BHATTACHARYYA.; SHARMA, N. K.; MISHRA, P. K. Impact of conservation practices on soil aggregation and the carbon management index after seven years of maize–wheat cropping system in the Indian Himalayas. **Agriculture, Ecosystems and Environment.** v. 216. p. 247-257. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.038>.

HICKMANN, C & COSTA, L. M. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 16. p. 1055-1061. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012001000004>

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil & Tillage Research.** v. 177. p. 113-124. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.003>.

JACKSON, R. B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E. D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Ecologia.** v. 108, p. 389-411, 1996.

KARP, D. S.; TALLIS, H.; SACHSE, R.; HALPERN, B.; THONICKE, K.; CRAMER, W.; MOONEY, H.; POLASKY, S.; TIETJEN, B.; WAHA, K.; WALZ, A.; WOLNY, S. National indicators for observing ecosystem service change. **Global**

**Environmental Chang.** v. 35. p. 12–21. 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.07.014>.

KOLÁŘ, L.; VANĚK, V.; KUŽEL, S.; PETERKA, J.; BOROVIČKA, J.; PEZLAROVIČKA, J. Relationships between quality and quantity of soil labile fraction of the soil carbon in Cambisols after liming during a 5-year period. **Plant Soil Environ.** v. 57. p. 193–200. 2011. DOI: <https://doi.org/10.17221/453/2010-PSE>.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N. ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Frações orgânicas e índices de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica. **Idesia.** v. 29. p. 11-19. 2011.

MA, J.; KANG, F.; CHENG, X.; HAN, H. Moderate thinning increases soil organic carbon in *Larix principis-rupprechtii* (Pinaceae) plantations. **Geoderma.** v. 329. p. 118-128. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.021>.

PETTER, F. A.; LIMA, L. B.; MORAIS, L. A.; TAVANTI, R. F. R.; NUNES, M. E.; FREDDI, O. S.; MARIMON JR, B. H. Carbon stocks in oxisols under agriculture and forest in the southern Amazon of Brazil. **Geoderma Regional.** v. 11. p. 53-61. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.09.001>.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna: Austria. 2017. URL <https://www.R-project.org/>.

REGORICH, E. G.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; DRURY, C. F.; Using a sequential density and particle-size fractionation to evaluate carbon and nitrogen storage in the profile of tilled and no-till soils in eastern Canada. **Canadian Journal of Soil Science.** v. 89. p. 255–267. 2009.

ROSA, S. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; FLEIG, M. F. D.; RODRIGUES, F.; GELAIN, N. S. Propriedades físicas e químicas de um Argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Ciência Florestal.** v. 28. p. 580-590. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832040>.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B. & PEREIRA, J. B. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 27. p. 389-393. 2003.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica.** v. 47. 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160052>.

SAYÃO, V. M. & DEMATTÊ, J. A. M. Soil texture and organic carbon mapping using surface temperature and reflectance spectra in Southeast Brazil. **Geoderma Regional.** v. 14. p. e00174. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00174>.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**. v. 46. p. 460-468. 2015.

SHANG, C. & TIESSEN, H. Organic matter lability in a Tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Science**. v. 162. p. 795-807. 1997.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. S.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17. p. 301-309. 2013.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHAN, R.; ALBES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**. v. 76. p. 39-58. 2004.

SIX, J.; CONANT, R. T., PAUL, E. A., PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant Soil**. v. 241. p. 155–176. 2002.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 32, p. 2099-2103. 2000.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Rev. Cienc. Agrar**. v. 59, p. 9-15. 2016. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2020>.

STETSON, S. J.; OSBORNE, S. L.; SCHUMACHER, T. E.; EYNARD, A.; CHILOM, G.; RICE, J.; NICHOLS, K. A.; PIKUL, J. L. Corn residue removal impact on topsoil organic carbon in a corn-soybean rotation. **Soil Science Society of America Journal**. v. 76. p. 1399-1406. 2012.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soils. J. TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; SÁ, M. F. M.; HARTMAN, D. C.; EURICH, G.; FARIAS, A.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**. v. 209-210. p. 214-225. 2013.

VELDKAMP E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v. 58. p. 175-180. 1994. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831575>.

VERGUTZ, L.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; BARROS N. F.; NUNES, T. N.; PIAU, A. A. M. Mudanças na matéria orgânica do solo causadas pelo tempo de adoção de um sistema agrossilvopastoril com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34. Viçosa Jan./Feb. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000100005>.

VIRTO, I.; GARTZIA-BENGOETXEA, N.; FERNÁNDEZ-UGALDE, O. Role of Organic Matter and Carbonates in Soil Aggregation Estimated Using Laser Diffractometry. **Pedosphere**. v. 21. p. 566 – 572. 2011.

WANG, J.; QIN, Q.; BAI, Z. Characterizing the effects of opencast coal-mining and land reclamation on soil macropore distribution characteristics using 3D CT scanning. **Catena**. V. 171. p. 212-221. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.022>.

YEOMANS, J. C. & BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 19. p. 1467-1476. 1988.

ZHAO, F.; YANG, G.; HAN, X.; FENG, Y.; REN G. Stratification of Carbon Fractions and Carbon Management Index in Deep Soil Affected by the Grain-to-Green Program in China. **PLoS ONE**. v. 9. p. e99657. 2014.

ZHENG, L.; WU, W. L.; WEI, Y. P.; HU, K. L., Effects of straw return and regional factors on spatio-temporal variability of soil organic matter in a high-yielding area of northern China. **Soil Tillage Res**. v. 145. p. 78–86. 2014.

### Capítulo 3

## MUDANÇAS MICROESTRUTURAIS EM LATOSSOLO VERMELHO SOB CERRADO E COM DIFERENTES MANEJOS

### Resumo

O uso e manejo alteram a qualidade física do solo, sendo esse um grande desafio a ser enfrentado nas atividades agrosilvipastoris. Vários são os indicadores dessas alterações e técnicas de imageamento como a micromorfologia e a tomografia computadorizada têm permitido elucidar de maneira detalhada as mudanças microestruturais causadas pelo manejo, em especial em Latossolos tropicais que possuem estrutura granular pequena e forte. Uma vez que tais alterações são influenciadas pelo tempo de uso e manejo do solo, tais avaliações apresentam maior acurácia se executada em experimentos de longa duração. Sob essa perspectiva, o presente estudo objetivou avaliar as modificações microestruturais em um Latossolo do cerrado submetido por mais de duas décadas a diferentes manejos do solo. Lâminas delgadas e corpos de prova foram coletados e processadas para avaliação micromorfológica e de tomografia computadorizada, respectivamente, em áreas submetidas ao manejo da cultura do milho com utilização de preparo do solo com arado de disco (AD), plantio direto (PD) e grade com subsolador (GS). Uma área adjacente com vegetação nativa de cerrado foi utilizada como referência. Os resultados de micromorfologia indicaram algumas transformações microestruturais das feições pedológicas dos agregados com potenciais impactos na qualidade física do solo. Ainda assim ficou evidenciada relativa boa resistência dessas unidades de estrutura granular mesmo após duas décadas de uso e manejo do solo, o que corrobora a classificação morfológica quanto ao grau de desenvolvimento dessas estruturas. A mesma técnica também indicou redução do volume de poros de maior tamanho e aumento de microporos na camada superficial do solo nos tratamentos AD e PD. No tratamento GS a perda de macroporosidade foi menor em superfície e maior em profundidade. A avaliação micromorfométrica da porosidade foi coerente com os resultados obtidos com a avaliação tradicional de laboratório dessa característica do solo. A obtenção de imagens por tomografia computadorizada foi prejudicada pelo aumento da densidade do solo nos tratamentos cultivados, mas revelou potencial a ser explorado na avaliação do espaço poroso de solos e, em especial, nos estudos de conectividade de poros.

## 1. Introdução

O processo de expansão agrícola sobre áreas de vegetação nativa dificilmente consegue preservar a qualidade física, química e biológica do solo. A manutenção das boas condições estruturais do solo, uma das mais sensíveis ao manejo (Albuquerque et al., 1995), é fundamental para o bom funcionamento dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema solo-planta.

Práticas de manejo convencionais frequentemente são associadas com a compactação do solo, fenômeno em que a estrutura é alterada especialmente pelo rompimento dos agregados de maior tamanho (Barbosa et al., 2002). A compactação do solo é a consequência da reorganização de suas partículas e das mudanças na distribuição dos tamanhos de poros, que ocasionam o incremento da densidade do solo (Bradford & Gupta, 1986). Essa redução da qualidade estrutural pode, portanto, originar alterações na morfologia dos poros, redução no armazenamento de água e trocas gasosas, e impactar negativamente na produtividade das culturas.

Os Latossolos, classe de maior expressão espacial e de utilização no Brasil, apresentam na sua fração argila uma assembleia mineral dominada por caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, cuja ocorrência e abundância dependem dos processos pedogenéticos (Ker, 1997). Esses minerais fazem parte da fração coloidal do solo, cuja gênese é governada pela alteração físico-química de minerais primários e recristalização na solução do solo (Brady e Weil, 2013). A estrutura nos Latossolos se caracteriza como fortemente desenvolvida e de tamanho pequeno, quando de natureza granular, ou fraca quando ocorrem blocos subangulares. Essas são as estruturas imediatamente impactadas quando do uso de práticas de manejo inadequadas, resultando numa reorganização de muitas outras dinâmicas no solo, em especial do seu comportamento físico-hídrico, o que podem alterar propriedades que justificam o amplo uso dos Latossolos.

As técnicas baseadas na microscopia ótica têm ganhado espaço para elucidar os fenômenos relacionados à gênese e o comportamento dos componentes do solo com base na sua microestrutura. Neste sentido, Gerasimov & Lebedeva-Verba (2010) consideram que a micromorfologia do solo possui ferramentas que permitem a avaliação de índices físicos, químicos e biológicos partindo de resultados obtidos do espaço poroso, mineralogia predominante e conteúdo de matéria orgânica do solo. As fotomicrografias permitem avaliar o espaço poroso do solo, a partir de estudos qualitativos e quantitativos, permitindo identificar padrões relacionados à formação de

poros e, conseqüentemente, de sua transformação (Ferreira et al., 2018). Neste cenário, Singh et al. (2017) puderam determinar o número total de poros e a porosidade total de imagens bidimensionais obtidas a partir da impregnação de amostras de solo, além de verificarem diferenças importantes no sistema poroso quando comparadas áreas sob cultivo convencional e plantio direto. A técnica permite a obtenção de alta resolução espacial mesmo de posse de amostras de dimensões milimétricas, o que permite a avaliação de agregados e das interfaces de partículas e poros (Vaz et al., 2014).

A adoção de indicadores micromorfológicos para o entendimento da microestrutura dos solos baseia-se na inter-relação entre seus diversos constituintes (Pereira et al., 2013). Como a microestrutura e a porosidade do solo dependem do tamanho das partículas, do conteúdo de matéria orgânica e da umidade, a micromorfologia apresenta-se como ferramenta chave na distinção de alterações da microestrutura em solos com diferentes níveis de produtividade (Gao & Guan, 1993).

Outras técnicas para análises de alterações microestruturais em solos têm aparecido mais recentemente. Dentre elas, destaca-se a tomografia computadorizada de raios-X, que constitui uma técnica não-destrutiva para visualizações diversas no interior de objetos sólidos opacos e obtenção de informações digitais das propriedades do material avaliado em fatias tomográficas em geometria 3D (Costa et al., 2018).

Um grande desafio da pesquisa de manejo de solo é a disponibilidade de áreas com experimentos de longa duração. Isto impacta diretamente na acurácia das conclusões obtidas, uma vez que alterações no solo podem levar anos para se processarem ou mesmo se estabilizarem. No caso da micromorfologia de solos, experimentos conduzidos por mais de uma década trazem ainda a vantagem adicional de darem maior precisão na análise dos dados, uma vez que as amostras são relativamente pequenas.

Diante do interesse em contribuir com o entendimento das intervenções que podem levar à degradação dos solos, este estudo objetivou avaliar as transformações micromorfológicas de longo prazo decorrentes de diferentes manejos em um Latossolo Vermelho sob Cerrado.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Solo e tipos de manejo

O estudo foi desenvolvido em um Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2013) que, originalmente, estava sob vegetação de cerrado. Este solo tem sua gênese ligada à alteração de calcários da Formação Sete Lagoas, unidade litoestratigráfica que data do Neoproterozóico (Costa e Branco, 1961) e que compõe a unidade basal do Super Grupo Bambuí, o qual é composto por uma sucessão de rochas carbonáticas e metapelíticas assentando-se diretamente sobre o embasamento cristalino (Brandalise et al., 1980). Esses Latossolos encontram-se geralmente sob relevo plano a suave ondulado, o que facilita seu uso agrícola intensivo.

As coletas foram realizadas na unidade experimental da Embrapa Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas (MG), cujas coordenadas centrais são 19° 27,408' S e 44° 10,939' W, em altitude de 786 m (Figura 1). O clima predominante da região é o Cwa que, segundo a classificação de Köppen é caracterizado por apresentar inverno seco e verão quente, com temperatura do mês mais quente superior a 22 °C.

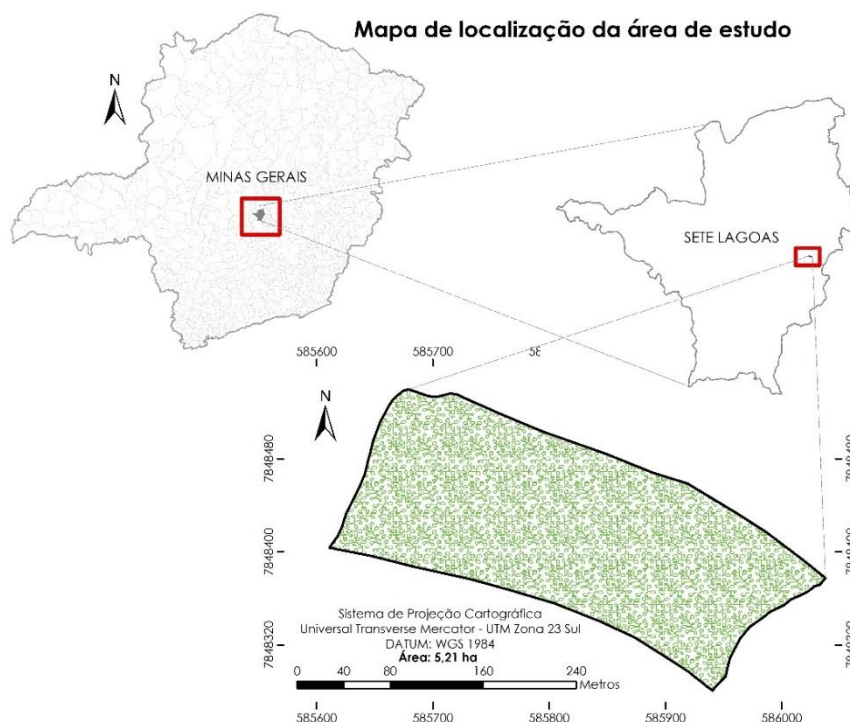


Figura 1. Área de estudo situada no município de Sete Lagoas – MG, Brasil.

A área de estudo foi historicamente ocupada por pastagens com alguns remanescentes de cerrado nativo mas, em 1995 foi instalado o experimento com

distintos tipos de uso e manejo do solo. Até o ano de 2016 (22 anos), a área experimental foi cultivada em parcelas (20 x 20 m) com dimensão de 400 m<sup>2</sup>. Nessa área, 11 tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, dos quais três tratamentos cultivados foram selecionados para este estudo: adoção de sistema de plantio direto (PD), uso de grade com subsolagem (GS) e uso do arado de disco (AD). O tratamento com plantio direto é caracterizado pelo cultivo sucessivo de milho até 2005 e, posteriormente, pela adoção da sucessão milho/soja entre um ano e outro. Os demais tratamentos cultivados apenas utilizaram a cultura do milho desde a sua implantação. Para efeitos de controle e comparação, uma área de cerrado nativo (CN) foi selecionada. O Latossolo sob Cerrado é utilizado, neste estudo, como amostra controle para fins de comparação. Do ponto de vista da paisagem e características edafoclimáticas, todos os tratamentos, incluindo o cerrado nativo, ocorrem na mesma declividade, posição da paisagem e face de exposição à radiação solar.

## 2.2 Análises

Para a análise micromorfológica de lâminas delgadas, amostras indeformadas no CN e demais tipos de manejo (PD, GS e AD) foram coletadas na superfície e nas profundidades de 10 e 50 cm, condizentes com a superfície e com os horizontes A e Bw, respectivamente. As amostras foram impregnadas a vácuo com resina de poliéster Polilyte (Reforplás T208) pré-acelerada (Filizola & Gomes, 2004) e submetidas à confecção de lâminas delgadas e polidas com dimensões de 1,8 x 30 x 40 mm. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/UFOP). O estudo micromorfológico foi realizado em microscópio óptico trinocular da marca Zeiss, modelo Axiophot, com câmera digital integrada, utilizando terminologias propostas por Stoops (2003) e Stoops et al. (2010).

Como a porosidade é um importante indicador de mudanças estruturais nos solos, nas seções delgadas foi realizada uma análise micromorfométrica para quantificar: i) porcentagem das seções ocupadas por poros; ii) tamanho médio, máximo e mínimo e distribuição dos poros a partir do seu comprimento no maior eixo e perímetro; iii) grau de arredondamento e, iv) orientação (0-180°) dos poros. O *software* livre Jmicrovision© 1.2.7 foi utilizado para mensurar e quantificar todos esses atributos. A classificação da orientação considerou três classes entre ângulos de 0°-180°: 0°-29°/151°-180° (horizontal); 30°-74°/106°-150° (oblíquo); e 75°-105°

(vertical). Para o grau de arredondamento utilizou-se o índice de Cox (1927), com variação de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais arredondado. Foi utilizada a classificação adaptada de Wadell (1933), em que os intervalos do grau de arredondamento 0,01 a 0,25 definem poros angulares, 0,26 a 0,49 – subangulares, 0,50 a 0,70 – subarredondado e 0,70 a 1 – arredondado. A extração de objetos para a quantificação da porcentagem de poros da seção analisada foi realizada em imagens binárias com a ferramenta *Magic Wand* do software Jmicrovision©.

Para as análises com a técnica da tomografia computadorizada, amostras de solo foram coletadas em campo no centro da camada de 0-10 cm em corpos de prova de 75 mm de diâmetro e 70 mm de altura. As amostras foram mantidas em câmara úmida para evitar o seu ressecamento. A amostra que foi levada ao tomógrafo foi esculpida no centro de cada corpo de prova com o uso de um recipiente de 15 mm de diâmetro e 25 mm de altura. A amostra foi então analisada em um microtomógrafo SKYSCAN 1174 (Bruker, Bélgica) acoplado a uma câmera SHT MR285MC. As condições de leitura foram 50 kV de voltagem e 800 mA de corrente elétrica e um filtro de alumínio de 1 mm foi usado na operação. A distância entre câmera e amostra foi ajustada para gerar imagens de 32.008 pixels, com uma rotação completa de 359,65° em steps de 1,4 graus. Para reconstrução das imagens e demais processamentos foram usados os softwares NRecon (versão 1.7.0.4) e CTAn (versão 1.16.8.0).

A binarização das imagens tomográficas consistiu da definição de dois domínios na amostra, uma correspondente à parte sólida e outra à parte porosa para a avaliação da porosidade das amostras. Na avaliação da porosidade foi considerada como região de interesse (ROI) a porção central da amostra representada por um cilindro de 13,5 mm de diâmetro e 7 mm de altura. Na definição da binarização foram utilizados os limites inferior e superior de 35 e 255 % (*grayscale threshold*), respectivamente. A porosidade da amostra foi dividida em porosidade aberta (PA) e porosidade fechada (PF), sendo essa última constituída por poros que não apresentam conectividade. No processamento das imagens também foi calculado o número de Euler, considerado um indicador de conectividade (Tseng et al., 2018).

A descrição morfológica dos solos (estrutura, consistência e cor) foi realizada em campo de acordo com Santos et al. (2015).

Os atributos do solo controle foram avaliados por meio de análises físicas (granulométrica, densidade do solo e porosidade), químicas (rotina) e mineralógicas

(DRX) nos horizontes A e Bw, nas profundidades 10 e 50 cm, respectivamente. Também foram realizadas análises da porosidade (total, macro e micro) e densidade (do solo e de partículas) nas profundidades 10 e 50 cm dos manejos cultivados (PD, GS e AD) com o intuito de comparar com os resultados da análise micromorfométrica. Todas as análises foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

A análise granulométrica para a determinação das frações de areia, silte e argila, bem como as análises de densidade do solo e de partículas, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo seguiram as orientações de Donagema et al. (2017). A análise química de rotina foi composta pelas determinações de pH em água; Ca, Mg, Al e Na trocáveis; K e P disponíveis (Mehlich-1) e matéria orgânica do solo (Walkley-Black).

A análise mineralógica da fração argila foi efetuada por difração de raios X em equipamento Panalytical, modelo Empyrean, com radiação CoK, potência de 45 kV e voltagem de 40 mA. O intervalo de varredura foi de 2 a 70° 2 $\theta$ . Para a identificação dos minerais predominantes foram elaborados difratogramas usando o *software* versão demo *CrystalDiffract*<sup>®</sup> versão 6.7.3. com auxílio de informações obtidas do site MINCRYST (<http://database.iem.ac.ru/mincryst/>).

### **3. Resultados**

#### **3.1 Atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo controle – LVd sob CN**

Macroscopicamente, o Latossolo estudado apresenta estrutura forte pequena granular no horizonte Bw e forte pequena granular a grumosa no horizonte A. A consistência no horizonte A é firme quando seco, friável quando úmido e muito plástica e pegajosa quando molhado. No horizonte Bw a única distinção na consistência é que em condição de solo úmido os agregados passam a ser muito friáveis. A cor do solo no horizonte A é 5YR 4/4 (bruno avermelhado) quando seco e 5YR 3/3 (bruno avermelhado escuro) quando úmido e, no horizonte Bw é 5YR 4/4 (bruno avermelhado) quando seco e 5YR 3/4 (bruno avermelhado escuro) quando úmido. A transição entre os horizontes é difusa e ondulada.

Em termos granulométricos, o solo apresenta alto conteúdo de argila (próximo de 80%), sendo classificado como de classe textural Muito Argilosa (Tabela 1). Trata-se de um solo em que a densidade (tanto de partículas quando do solo) é superior no horizonte Bw se comparada ao horizonte A, o que denota o efeito da matéria orgânica

leve. A porosidade (total, macro e micro) é elevada e semelhante nos dois horizontes (Tabela 1), reiterando as boas condições de drenagem e retenção de água deste solo.

Quimicamente trata-se de um solo ácido, distrófico, com baixo conteúdo de bases e P, conteúdo moderado de matéria orgânica e argila de atividade baixa (Tabela 1). A saturação por alumínio é superior a 50% apenas no horizonte Bw, retratando no horizonte A, o efeito da matéria orgânica na complexação deste elemento.

A mineralogia destaca a presença destacada de caulinita, goethita, hematita e gibbsita como minerais na fração argila (Figura 2). Além desses minerais que são comuns para Latossolos, foi identificada a presença de vermiculita com Al-hidroxi entrecamadas (VHE). Tais resultados reiteram o alto grau evolutivo destes solos e um distanciamento das propriedades do material de origem, pela atuação do processo de latossolização.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do Latossolo Vermelho distrófico típico sob vegetação de cerrado nativo (CN)

	Hor. A	Hor. Bw		Hor. A	Hor. Bw
DS (Mg m <sup>-3</sup> )	0,98	1,03	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,93	0,30
Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	2,34	2,45	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,16	0,04
Mi (m m <sup>-3</sup> )	0,43	0,44	Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,94	1,50
Ma (m m <sup>-3</sup> )	0,15	0,16	H + Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	8,80	7,90
PT (m m <sup>-3</sup> )	0,58	0,59	SB (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	2,13	0,36
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	810	788	t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	3,07	1,86
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	50	75	T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	10,93	8,26
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	140	137	V (%)	19,50	4,40
pH H <sub>2</sub> O	4,90	4,84	m (%)	30,60	80,60
P (mg/dm <sup>3</sup> )	0,8	0,2	MO (dag/kg)	4,94	3,93
K (mg/dm <sup>3</sup> )	16,0	11,0	P-Rem (mg/L)	15,30	9,90

DS: Densidade do solo; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade Total; Mi: Microporosidade; pH em água - Relação 1:2,5; P e K – Extrator Mehlich-1; H+Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0; t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; V = Índice de Saturação por Bases; P-Rem = Fósforo Remanescente; Ca<sup>2+</sup> - Mg<sup>2+</sup> - Al<sup>3+</sup> - Extrator: KCL – 1 mol/L; SB = Soma de Bases; T – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; m = Índice de Saturação por Alumínio; MO (Mat. Orgânica) = C. Org. x 1,724 – Walkley-Black.

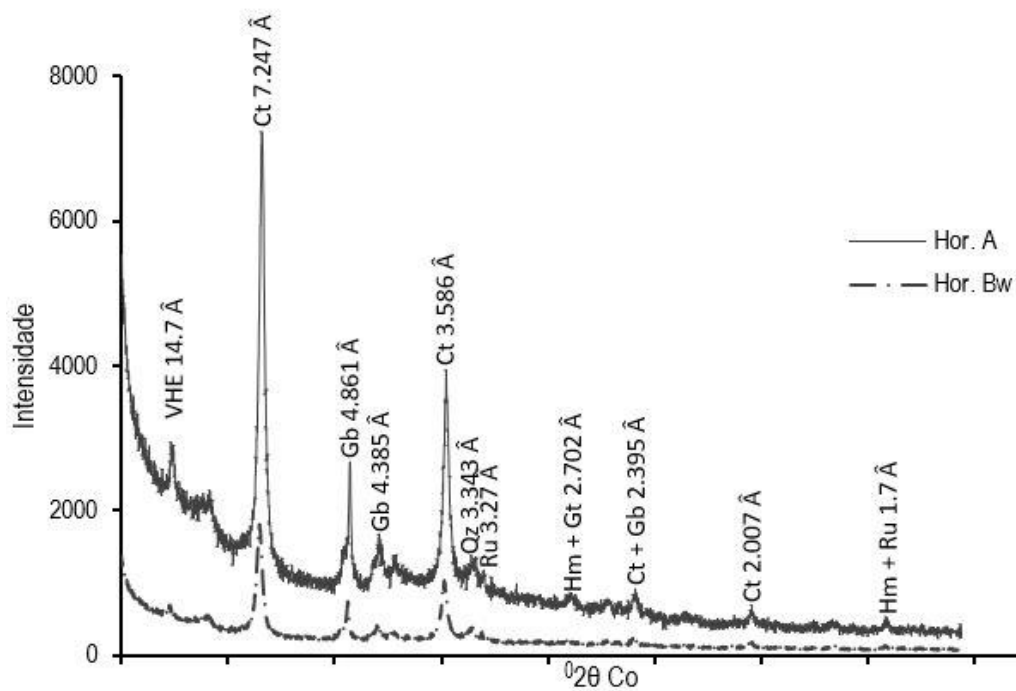


Figura 2 – Difratomogramas da fração argila de Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado (radiação de  $\text{Co}\alpha$ ) VHE: vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas; Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; Qz: Quartzo; Ru: Rutilo; Hm: hematita; Gt: Goethita.

### 3.2 Caracterização micromorfológica do solo controle – LVd sob CN

A síntese da caracterização micromorfológica do solo controle é apresentada na Tabela 2 e fotomicrografias representativas na Figura 3. Trata-se de um solo com microestruturas típicas de Latossolos (Marcelino et al., 2010). O horizonte Bw (50 cm de profundidade) é pédico, com microestrutura do tipo granular bem desenvolvida. Os agregados são bem separados entre si, caracterizando um sistema poroso de empacotamento complexo. No interior dos agregados ocorre um fundo matricial composto por uma micromassa bruno-avermelhada, com trama birrefringente indiferenciada a granoestriada. Os constituintes grossos são compostos por grãos de quartzo de tamanho areia fina e minerais opacos. Os agregados encontram-se individualizados uns dos outros e, entre eles, ocorrem grãos de quartzo tamanho areia média, caracterizando uma distribuição relativa do tipo enaulica.

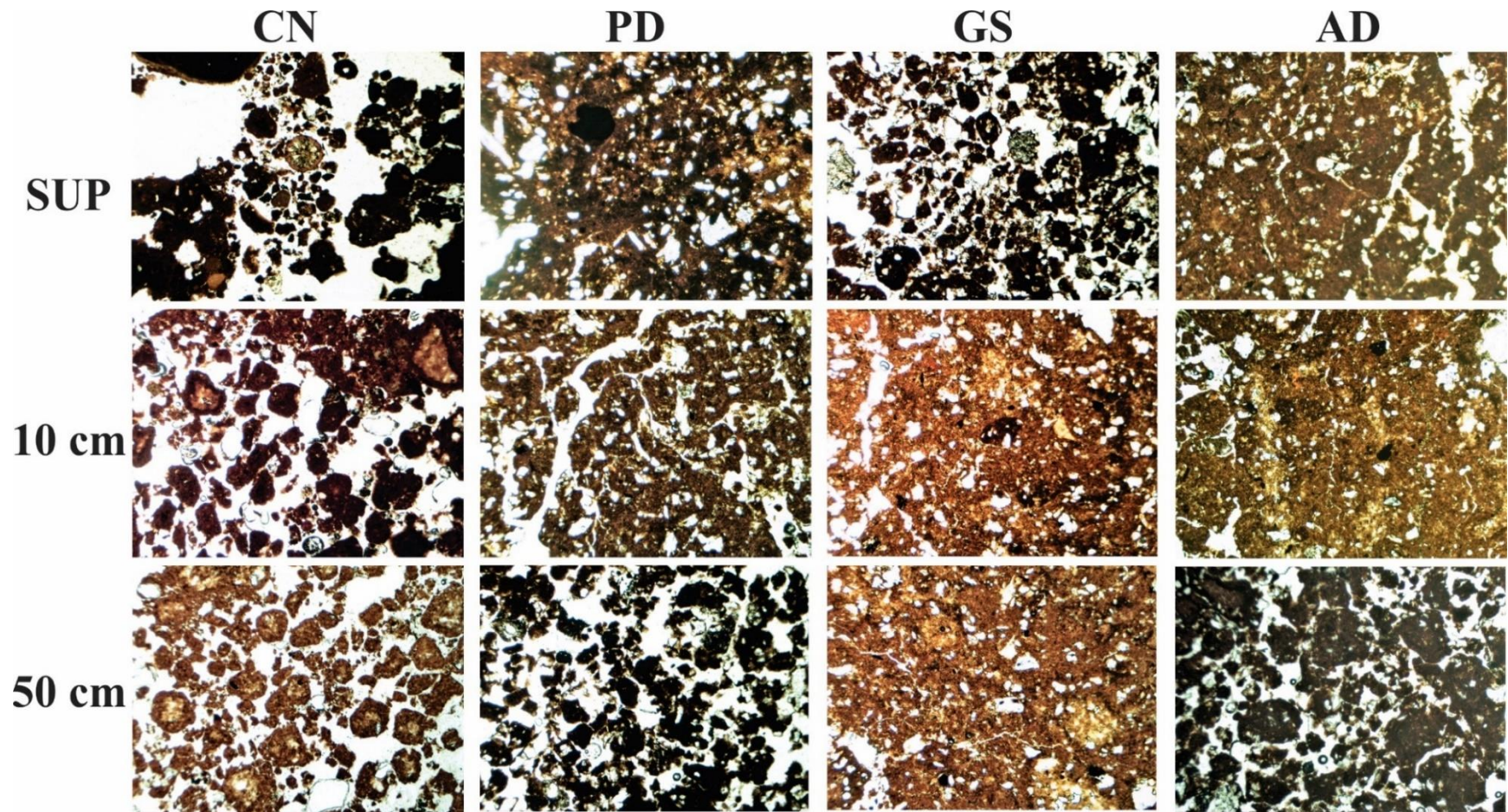


Figura 3 – Fotomicrografias obtidas em microscópio petrográfico com luz polarizante, nicóis paralelos, representativas das microestruturas presentes nas profundidades 0 (superfície), 10 e 50 cm do Latossolo Vermelho distrófico típico sob cerrado nativo (CN) e dos tipos de manejo cultivado por mais de duas décadas com plantio direto (PD), uso de grade com subsolagem (GS) e uso do arado de disco (AD). Objetiva de 4X.

As feições pedológicas presentes são preenchimentos soltos contínuos e nódulos ferruginosos típicos. A matéria orgânica ocorre na forma humificada, embebida na micromassa, na forma de nódulos orgânicos e fragmentos de raízes em distintos graus de oxidação. Fragmentos de carvão são observados com comportamento semelhante ao quartzo, enquanto no interior dos agregados eles são muito pequenos, entre os agregados, ocorrem em tamanhos que podem chegar a areia grossa.

A análise micromorfológica do horizonte A, seja na superfície (0 cm) ou a 10 cm de profundidade, revela um horizonte pédico, de natureza organo-mineral, em que os constituintes minerais já descritos se misturam a materiais orgânicos vivos ou em decomposição (Figura 3). A microestrutura é do tipo granular bem desenvolvida e blocos subarredondados, sendo a última composta internamente também pelos agregados granulares, constituindo uma segunda hierarquia de pedos. Esses blocos estão presentes sempre na zona de atuação de raízes e podem, por esse motivo, serem interpretados como a coalescência de grânulos associada à pressão mecânica exercida pelo crescimento dessas. Os nódulos ferruginosos e orgânicos também estão presentes, arredondados e pequenos como no horizonte Bw, sendo os orgânicos mais comuns. Feições de preenchimento solto contínuo ocorrem associadas à atividade da pedofauna, com excrementos e agregados muito pequenos, arredondados e bem separados entre si.

### **3.3 Caracterização micromorfológica nos manejos cultivados – PD, GS e AD**

Tal como para o solo controle, a síntese da caracterização micromorfológica e fotomicrografias representativas estão, respectivamente, na Tabela 2 e Figura 3. Descrições comparativas para cada tipo de manejo nas profundidades 0 (SUP), 10 e 50 cm são apresentadas.

No manejo cultivado com plantio direto, tanto na superfície (0 cm) quanto a 10 cm de profundidade, o solo é apédico e tem sua microestrutura caracterizada pelo sistema poroso predominante, que é formado por cavidades pouco ou nada conectadas, de formato arredondado a subarredondado. Em algumas porções é possível reconhecer blocos subarredondados pequenos com poros planares entre si, moderadamente separados. Na profundidade 50 cm, a microestrutura é bastante distinta da superfície, sendo granular a moderadamente separada. Trata-se da microestrutura característica do solo controle (CN), sugerindo que, neste manejo, as mudanças microestruturais se

Tabela 2 – Caracterização micromorfológica nas profundidades 0 (superfície), 10 e 50 cm do Latossolo Vermelho distrófico típico sob cerrado nativo (CN) e dos tipos de manejo cultivado por mais de duas décadas sob plantio direto (PD), uso de grade com subsolagem (GS) e uso do arado de disco (AD)

Solo Controle e Manejos	Prof.	Microestrutura e porosidade	Fundo Matricial			Constituintes Orgânicos	Feições Pedológicas
			Material Grosso	Micromassa	c/f <sub>2μm</sub> distribuição relativa		
CN	SUP	<u>Granular</u> bem a moderadamente separada. <u>Bloco subangular</u> moderadamente separada formada por grânulos coalescidos. Poros de empacotamento composto.	Quartzo subangular, areia fina, e minerais opacos	Bruno escuro a bruno-avermelhada, trama indiferenciada e granoestriada	Enaulica	Raízes, traços de raiz, matéria orgânica humificada, carvão e nódulos	Nódulos ferruginosos típicos e preenchimento solto contínuo
	10 cm	<u>Granular</u> bem separada. <u>Bloco subangular</u> moderadamente separada formada por grânulos coalescidos. Poros de empacotamento complexo.	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno-avermelhada, trama indiferenciada e granoestriada	Enaulica	Raízes, traços de raiz, matéria orgânica humificada, carvão e nódulos	Nódulos ferruginosos típicos e preenchimento solto contínuo
	50 cm	<u>Granular</u> bem separada, arredondada. Poros de empacotamento complexo	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno-avermelhada a vermelho-amarelada, trama indiferenciada e granoestriada	Enaulica	Traços de raiz, pontuações orgânicas na micromassa e carvão	Nódulos ferruginosos típicos e preenchimento solto contínuo

<b>Solo Controle e Manejos</b>	<b>Prof.</b>	<b>Microestrutura e porosidade</b>	<b>Fundo Matricial</b>	<b>Constituintes Orgânicos</b>	<b>Feições Pedológicas</b>	<b>Solo Controle e Manejos</b>	<b>Prof.</b>
	<b>SUP</b>	<u>Cavitária</u> com poros pouco ou nada conectados, sem agregados perceptíveis. Poros são arredondados a subarredondados e apresentam orientação circular. Ocorrem também canais de raízes	Quartzo subangular a arredondado, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno-avermelhada com algumas porções mais vermelha-amareladas, trama indiferenciada	Porfírica	Raízes, pontuações orgânicas na micromassa e carvão	Nódulos ferruginosos típicos
<b>PD</b>	<b>10 cm</b>	<u>Blocos subangulares</u> moderadamente separados com poros planares entre si. Ocorrem também <u>Cavitária</u> com poros pouco conectados	Quartzo subangular a arredondado, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno a bruno-avermelhada, trama indiferenciada	Porfírica	Raízes, traços de raízes, pontuações orgânicas na micromassa e carvão	Nódulos ferruginosos típicos
	<b>50 cm</b>	<u>Granular</u> bem a moderadamente separada. Poros de empacotamento composto.	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno escuro a bruno-avermelhada, trama indiferenciada a granoestriada	Enaulica	Pontuações orgânicas na micromassa e carvão	Nódulos ferruginosos típicos e concêntricos

<b>Solo Controle e Manejos</b>	<b>Prof.</b>	<b>Microestrutura e porosidade</b>	<b>Fundo Matricial</b>	<b>Constituintes Orgânicos</b>	<b>Feições Pedológicas</b>	<b>Solo Controle e Manejos</b>	<b>Prof.</b>
<b>GS</b>	<b>SUP</b>	<u>Granular</u> moderadamente separada e blocos subangulares moderadamente separados. Poros de empacotamento composto e cavitários.	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno escuro, trama indiferenciada a granoestriada	Enaulico-porfírica	Traços de raízes, pontuações orgânicas na micromassa, nódulos e carvão	Nódulos ferruginosos típicos
	<b>10 cm</b>	<u>Blocos subangulares</u> mal separados. <u>Cavitária</u> , com poros pouco conectados. As cavidades são arredondadas a subarredondadas e, às vezes, orientadas	Quartzo subangular a arredondado, areia fina a média, e minerais opacos	Avermelhada a bruno-avermelhada, trama indiferenciada	Porfírica	Raízes, pontuações orgânicas e material orgânico embebendo a micromassa, nódulos e carvão	Nódulos ferruginosos típicos
	<b>50 cm</b>	<u>Cavitária</u> com poros pouco conectados. As cavidades são arredondadas a subarredondadas e apresentam orientação circular. Subordinadamente, <u>Blocos subangulares</u> mal separados com poros planares entre si.	Quartzo subangular a arredondado, areia fina a média, e minerais opacos	Avermelhada a bruno-avermelhada, trama indiferenciada	Porfírica	Material orgânico embebendo a micromassa e carvão	Nódulos ferruginosos típicos

<b>Solo Controle e Manejos</b>	<b>Prof.</b>	<b>Microestrutura e porosidade</b>	<b>Fundo Matricial</b>	<b>Constituintes Orgânicos</b>	<b>Feições Pedológicas</b>	<b>Solo Controle e Manejos</b>	<b>Prof.</b>
	<b>SUP</b>	<u>Planar</u> fracamente separada, com poros de maior eixo paralelos a superfície. Subordinadamente, <u>Blocos angulares</u> mal separados, com poros planares entre si.	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno-avermelhada, trama indiferenciada a monoestriada	Porfírica	Traços de raízes, pontuações orgânicas e carvão	-
<b>AD</b>	<b>10 cm</b>	<u>Planar</u> fracamente separada, com poros de maior eixo paralelos a superfície. <u>Blocos angulares</u> mal separados, com poros planares entre si.	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno-avermelhada, trama indiferenciada a monoestriada	Porfírica	Traços de raízes, pontuações orgânicas, nódulos e carvão	Nódulos ferruginosos típicos
	<b>50 cm</b>	<u>Granular</u> moderadamente separada. Poros de empacotamento complexo	Quartzo subangular, areia fina a média, e minerais opacos	Bruno escuro a bruno-avermelhada, trama indiferenciada.	Enaulica	Material orgânico embebido na micromassa e carvão	Nódulos ferruginosos típicos

processam no horizonte superficial. Considerando a distribuição relativa do fundo matricial, essa mudança pode ser caracterizada pelo predomínio de uma trama porfírica na superfície e enaulica em profundidade. O fundo matricial é composto por quartzo e minerais opacos como constituintes grossos, e uma micromassa bruno-avermelhada a bruno escura com orientação relativa apenas nas estruturas granulares.

No manejo cultivado com grade e subsolador a microestrutura predominante na superfície é do tipo granular e blocos subangulares, ambas moderadamente separadas. O sistema poroso é aberto, com poros de empacotamento entre os agregados. Nas profundidades subseqüentes, 10 e 50 cm, há uma transformação da microestrutura, inicialmente com blocos subangulares moderadamente separados e, posteriormente, cavitária, na qual os agregados deixam de ser facilmente separados e o sistema poroso torna-se mais fechado, com pouca ou nenhuma conectividade no plano da lâmina. Ainda assim, alguns poros planares podem ser identificados na profundidade 50 cm, sendo mais estreitos que nas posições superiores do perfil. A composição do fundo matricial permanece a mesma em todos os horizontes, havendo uma mudança na distribuição entre os constituintes grossos e a micromassa. Enquanto na superfície predomina uma trama enaulica com algumas zonas porfíricas, nas demais profundidades ela é principalmente porfírica.

No manejo cultivado com arado de disco o comportamento da microestrutura é distinto do que foi observado com a grade e subsolador. Na superfície e a 10 cm de profundidade predominam as microestruturas típicas de solos apédicos ou com pedalidade fraca. Ainda que ocorram blocos subangulares em algumas posições da lâmina, a microestrutura predominante é do tipo planar, com poros em fissura com o maior eixo orientados paralelos a superfície. A trama porfírica acompanha essas microestruturas, na qual grãos de quartzo e fragmentos de carvão de tamanho areia fina a média se encontram embebidos pela micromassa bruno-avermelhada a avermelhada. Na maior profundidade analisada (50 cm), a microestrutura é semelhante àquela descrita no solo controle, qual seja granular bem a moderadamente separada com trama enaulica. As feições pedológicas observadas foram apenas nódulos ferruginosos típicos, cuja fábrica interna indica que sua formação ocorreu no próprio ambiente em que se situam.

### **3.4 Caracterização micromorfométrica da porosidade e relação com análises laboratoriais**

Os resultados da caracterização micromorfométrica do sistema poroso são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da caracterização da porosidade por métodos laboratoriais visando a comparação com a micromorfometria.

Considerando o percentual de área ocupada por poros no plano da lâmina (Figura 3), tanto CN quanto o manejo GS apresentam redução com a profundidade. Comportamento antagônico foi observado para os manejos PD e AD, onde aumento da porosidade ocorre em profundidade. No caso do solo controle (CN), a porosidade é maior que todos os três tipos de manejos cultivados, sugerindo, independente da prática adotada, um impacto expressivo sobre essa propriedade do solo. Esse comportamento é corroborado pela análise da porosidade total em laboratório (Tabela 3), onde os valores para os tipos de manejo nas profundidades 10 e 50 cm são inferiores se comparados ao solo controle.

O tamanho dos poros é apresentado na Figura 4A a partir do comprimento no maior eixo e perímetro. Considerando os valores médios, ambos os atributos mostram um aumento em profundidade no CN e nos manejos PD e AD. Apenas GS apresentou redução. No comprimento do maior eixo essa redução foi da ordem de 0,04 mm na superfície para 0,026 mm a 50 cm de profundidade. Em se tratando do perímetro, a redução foi de 1,14 para 0,07 mm. Os poros maiores foram observados na superfície do solo controle, e para os tipos de manejos cultivados, a presença de poros maiores ocorreu na superfície de GS e em maior profundidade em PD e AD. Não foi observada uma relação direta entre o predomínio de poros planares e poros maiores, o que demonstra que sistemas de empacotamento também podem apresentar valores mais altos para estes atributos.

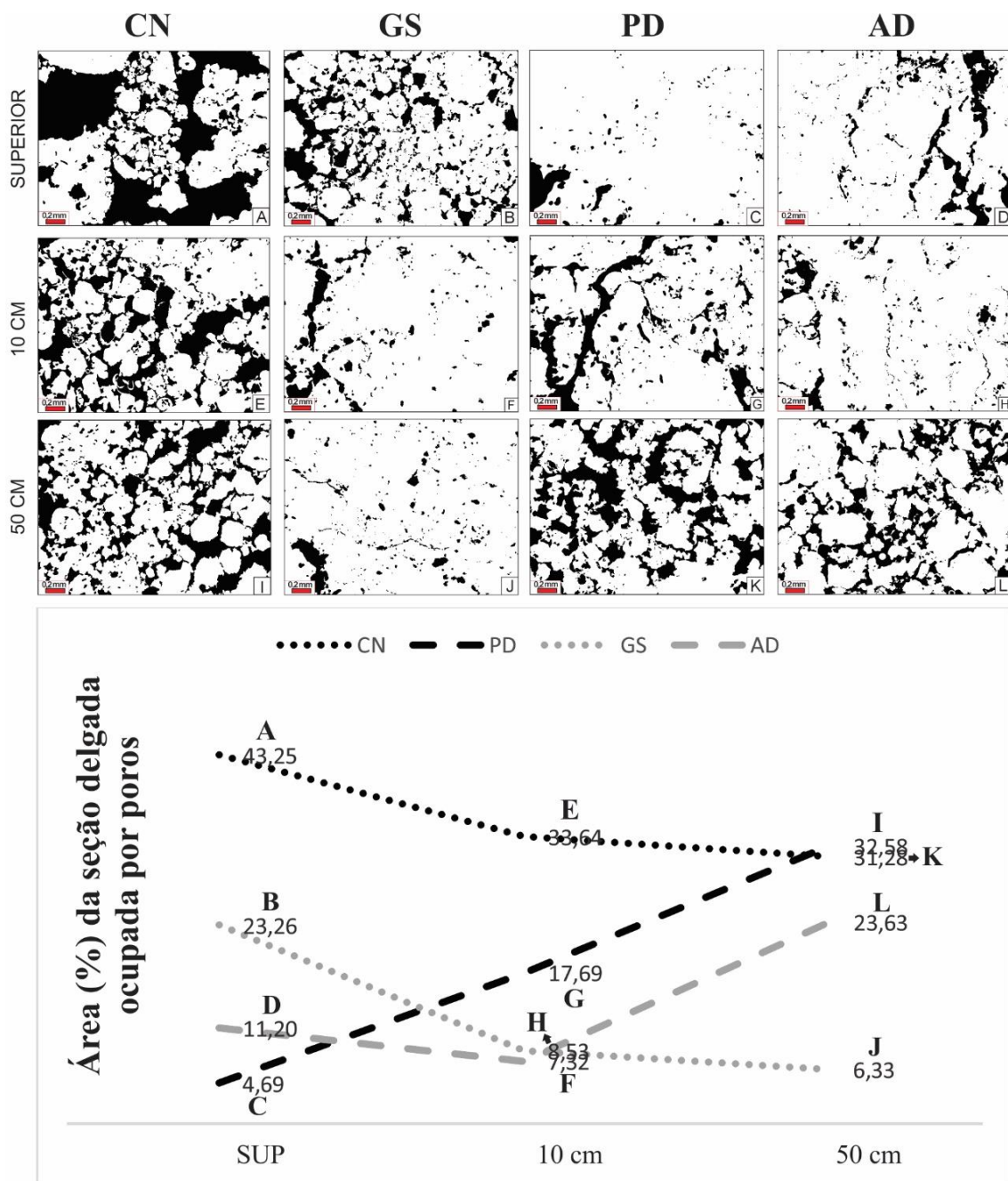


Figura 4. Caracterização do sistema poroso na superfície (superior, SUP) e a 10 e 50 cm de profundidade nos usos e manejo do solo avaliados (CN: Cerrado nativo, GS: Grade com Subsolação, PD: Plantio Direto, AD: arado de disco).

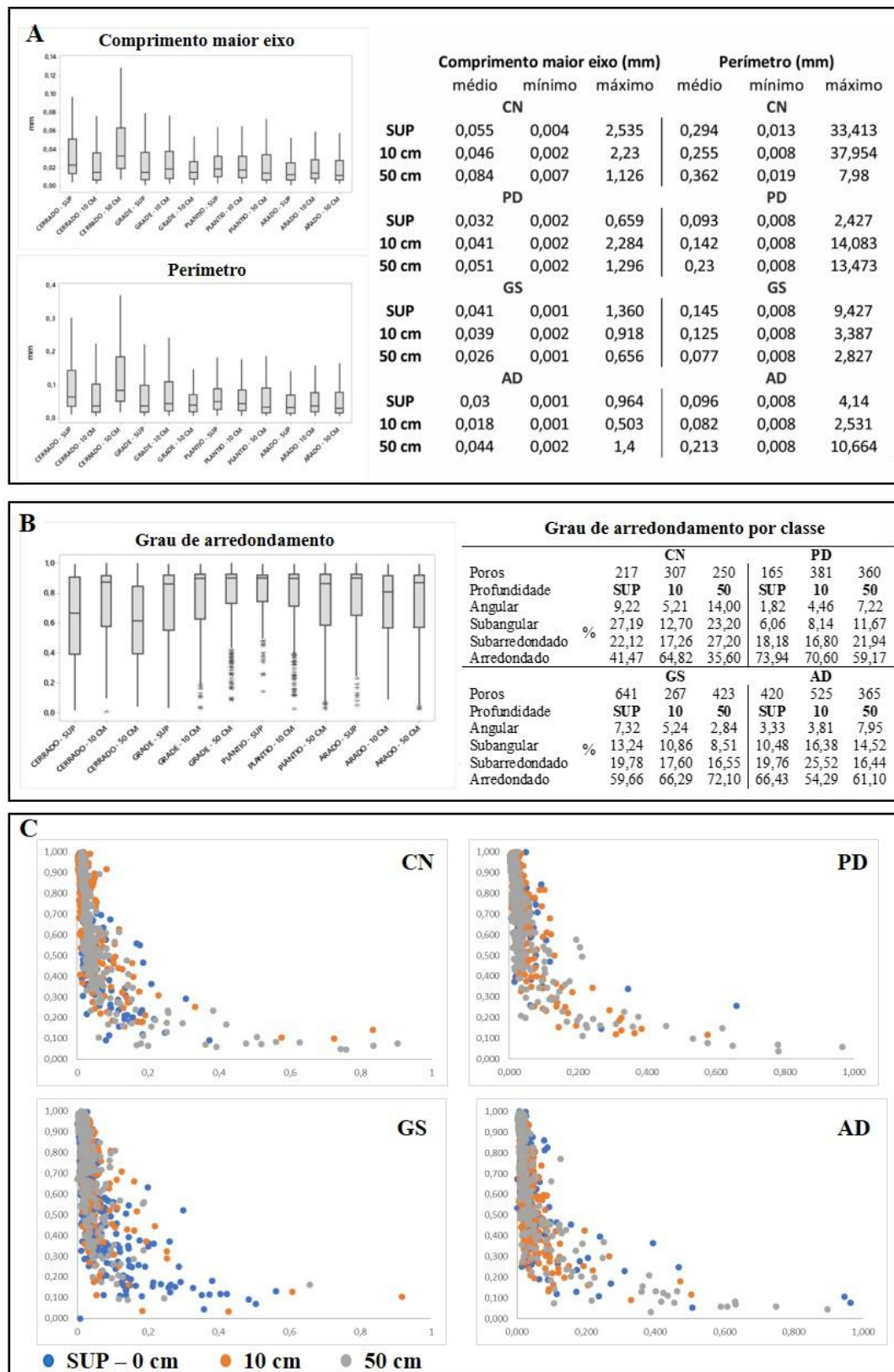


Figura 5. Características morfométricas dos poros dos solos: comprimento do maior eixo e perímetro dos poros (A); classes dos poros quanto ao grau de arredondamento (B) e relação do grau de arredondamento com o comprimento dos poros no seu maior eixo (C) nos usos e manejo do solo avaliados (CN: Cerrado nativo, GS: Grade com Subsolação, PD: Plantio Direto, AD: arado de disco).

Tabela 3. Características físicas analisadas por métodos laboratoriais nas profundidades 10 e 50 cm de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob cerrado nativo (CN) e de manejos cultivados por mais de duas décadas com plantio direto (PD), uso de grade com subsolagem (GS) e uso do arado de disco (AD)

Tratamentos	DS	Dp	Mi	Ma	PT
	----- kg dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----	m m <sup>-3</sup> -----	-----
10 cm					
CN	0.98	2.34	0.43	0.15	0.58
PD	1.37 *ab	2.54	0.46 *	0.01 *	0.47 *
GS	1.28 *b	2.43	0.47 *	0.00 *	0.47 *
AD	1.30 *a	2.50	0.48 *	0.01 *	0.49 *
CV (%)	2.80	4.10	2.40	44.80	3.90
50 cm					
CN	1.03	2.45	0.44	0.16	0.60
PD	1.26 *a	2.58	0.44	0.07	0.51 *
GS	1.15 b	2.55	0.42	0.13	0.55
AD	1.03	2.45	0.44	0.16	0.60
CV (%)	4.50	2.80	4.00	37.40	4.70

DS: Densidade do solo; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade Total; Mi: Microporosidade; CV: Coeficiente de Variação; (\*) diferente do CN pelo teste de Dunnett ( $p < 0,1$ ); letras diferentes na linha diferem entre si pelo teste Tukey ( $p < 0,1$ ).

Considerando o limite de 0,05 mm para a separação entre micro e meso-macroporos, o mesmo utilizado em procedimentos laboratoriais, observa-se uma distribuição mais diversificada no solo controle, em que macro e microporos estão presentes em todas as profundidades. Nos tipos de manejo, entretanto, nas lâminas, a presença de microporos é maior, principalmente nas profundidades 0 e 10 cm para PD e AD e 50 cm para GS. Assim, macroscopicamente, os macroporos estão mais nitidamente presentes na superfície GS e na maior profundidade avaliada de PD e AD.

Os resultados da análise micromorfométrica são parcialmente corroborados pelas análises laboratoriais referentes à distribuição de poros (Tabela 2). A quantidade de microporos é aumentada com os tipos de manejo cultivados e, apenas em CN, os macroporos aparecem. Isto é, o aumento da microporosidade na superfície é acompanhado pela redução da macroporosidade do solo. Nos manejos, a macroporosidade é inclusive praticamente anulada a 10 cm de profundidade. Para os

manejos cultivados, os resultados também demonstram que a macroporosidade é um pouco mais preservada em profundidade (50 cm), não diferindo do tratamento controle. Entretanto, no manejo GS, os resultados de laboratório e de análise micromorfológica diferem, uma vez que em laboratório não foram observadas alterações significativas na macroporosidade a 50 cm, ainda que a 10 cm o comportamento seja o mesmo observado nas seções delgadas. Como a coleta das amostras para esses dois tipos de análises foi realizada em posição próxima, esse fato pode evidenciar uma variabilidade espacial da maneira como o manejo GS atua na compactação do solo em profundidade. Porém, de um modo geral, pode-se considerar ter havido concordância entre os resultados de porosidade obtidos em laboratório com aqueles obtidos de lâminas delgadas, mesmo que as lâminas tenham sido coletadas em posição única nas unidades experimentais, enquanto que para a análise de laboratório, um número maior de amostras foi utilizado para se expressar um valor médio.

O grau de arredondamento dos poros (Figura 4B) mostra que CN apresenta uma maior distribuição de tipos de poros (subangulares, subarredondados e arredondados) que os tipos de manejo, para os quais poros arredondados são predominantes. Quando comparados com o tamanho a partir do comprimento no maior eixo (Figura 4C), considerando poros com até 1mm de comprimento, observa-se que quanto menores os poros, mais arredondados são. Isso evidencia que o impacto da compactação nos tipos de manejo tem um reflexo direto na forma dos macroporos.

A orientação dos poros (Figura 6) apresentou uma distribuição semelhante em todas as profundidades do CN e tipos de manejo cultivados. A classificação de poros indicou predomínio de poros verticais e oblíquos, principalmente nas camadas onde foram descritos sistemas de empacotamento. Comparativamente, os manejos PD e AD apresentaram um ligeiro aumento da porcentagem de poros horizontais nas camadas superiores, ao passo que em GS esse aumento foi maior a 10 cm de profundidade.

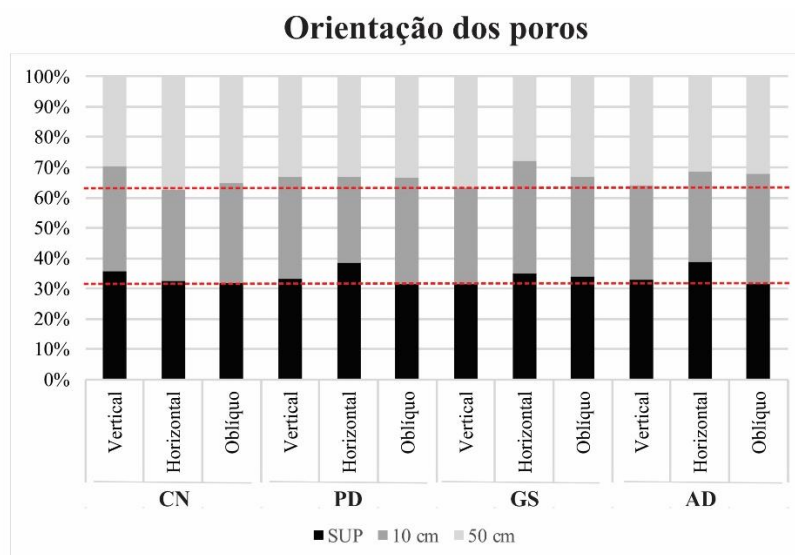


Figura 6 – Porcentagem das classes de orientação dos poros no solo controle (CN) e tipos de manejo (PD, GS e AD). As linhas tracejadas vermelhas indicam marcam a transição entre as classes.

### 3.5 Caracterização morfológica por tomografia computadorizada

As imagens tomográficas obtidas nas amostras dos manejos avaliados (Figura 7) demonstra a maior porosidade (parte colorida da imagem) na área de cerrado (CN), seguido do manejo com grade e subsolador (GS). Os demais manejos, em especial o plantio direto, apresentam menor porosidade.

A estimativa da porosidade pela tomografia computadorizada confirmou o maior volume de poros no ambiente com vegetação natural e a redução dessa propriedade com o cultivo do solo: cerrado nativo ( $0,69 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), arado de disco ( $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), plantio direto ( $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e grade com subsolador ( $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Esses valores, em especial, das áreas cultivadas não guardam relação com o esperado para solos e também com os valores obtidos na forma tradicional (Tabela 3). No solo do cerrado os valores obtidos ( $0,69 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  vs  $0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) são mais coerentes. Uma possível explicação para esses resultados é a limitação da técnica para materiais de maior densidade, que afetam o coeficiente de atenuação (PEDROTTI et al., 2003). O solo já é naturalmente um material mais denso para o uso da técnica e, quando em estados mais compactados, limitam a transmissão de raios X no interior do corpo de prova, prejudicando a resolução e estimativa acurada dos poros do solo. Isto justificaria os baixos valores de porosidade obtidos nos manejos PD e AD, mesmo que na análise visual (Figura 6) não tenha indicado tamanha redução de poros.

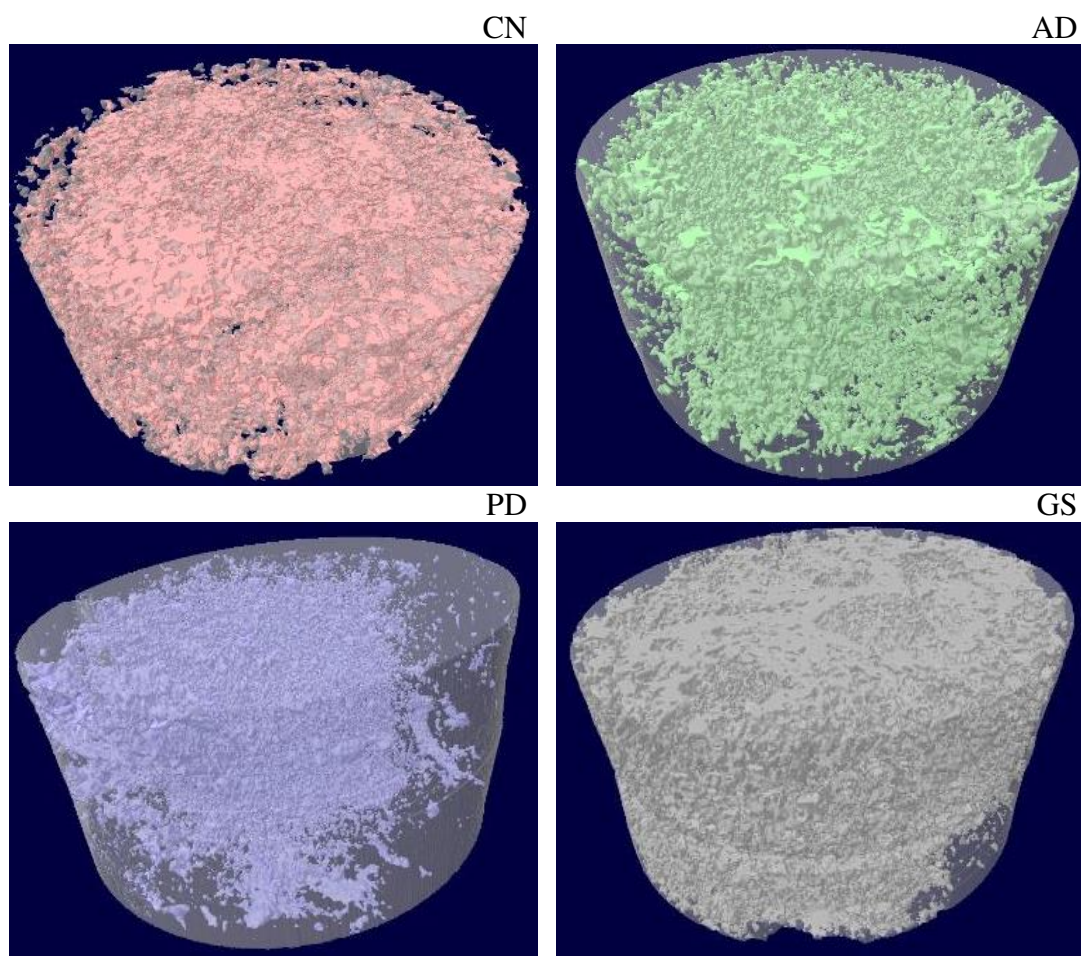


Figura 7 - Representação da rede de poros nos corpos de prova representativos dos usos e manejo do solo cerrado nativo (CN), arado de disco (AD), plantio direto (PD) e grade com subsolador (GS).

Tendo em vista os problemas verificados com as áreas de cultivo, a análise da porosidade aberta (PA) e fechada (PF) foi prejudicada. Neste sentido parecem mais confiáveis apenas os valores obtidos para a área de cerrado, na qual a técnica revelou que 99,93 % dos poros eram abertos, ou seja, apresentam conectividade com os demais.

A distribuição dos poros segundo o diâmetro nos diferentes usos e manejos foi estimada (Figura 8) e indicou que os tratamentos cultivados apresentaram curva de poros com deslocamento para a esquerda. Isto indica ganhos em microporosidade, o que é um reflexo muito comum do aumento da compactação do solo. Entretanto a redução expressiva de poros nos manejos plantio direto (PD) e arado de disco (AD), possivelmente pelos problemas já mencionados, dificulta maiores considerações.

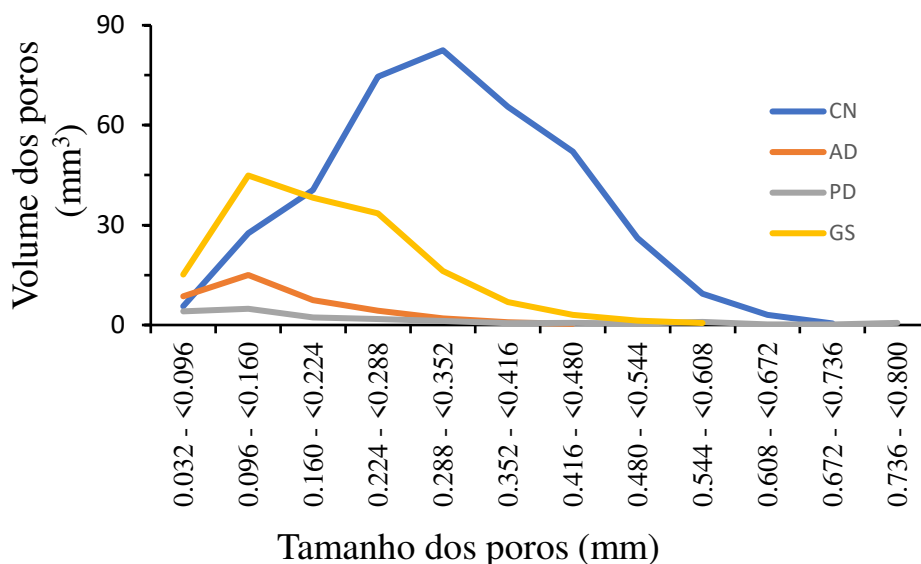


Figura 8 – Distribuição de tamanho de poros segundo seu diâmetro nos diferentes usos e manejos do solo avaliados com base na técnica da tomografia computadorizada na camada de 0-10 cm.

Os números de Euler associados aos diferentes usos e manejos foram: -4523 (CN), 6371 (AD), 7023 (PD) e -6519 (GS). Valores mais negativos desta variável são associadas com maior conectividade de poros, enquanto valores positivos são relacionados com maior descontinuidade dos poros. Desta forma a área de cerrado e o uso da grade e subsolador exibiram melhor qualidade do solo em termos de espaço poroso. Novamente os problemas verificados com a técnica podem limitar o uso desses resultados.

#### 4. Discussão

A gênese de agregados granulares em solos bem desenvolvidos é discutida por três hipóteses principais. A primeira propõe que uma origem física explicada pelo fraturamento mecânico de material de solo compacto por alternância de umedecimento e secagem (Muller, 1977; 1983; Bitom & Volkoff, 1991). A segunda propõe uma origem mineralógica, onde um ambiente de intensa lixiviação geoquímica, comum a ambientes tropicais, favorece a formação de caulinita e óxidos de ferro. Essa assembleia mineral reuniria as condições físico-químicas necessárias para promover a agregação (Beaudou, 1972; Pédro et al., 1976; Chauvel et al., 1978; Chauvel & Pédro, 1978; Buol & Eswaran, 1978; Chauvel et al., 1983; Santos et al., 1989; Balbino, et al, 2002). A terceira hipótese se relaciona com o papel da fauna do solo, sobretudo a ação

dos térmitas na cimentação de partículas granulometricamente selecionadas e também na organização microestrutural dos constituintes uniformemente arranjados (Verheye & Stoops, 1975; Garnier-Sillan et al., 1985; Eschenbrenner, 1986; Trapnell & Webster, 1986; Kooymanm & Onk, 1987; Stoops, 1991; Jungerius et al., 1999; Schaefer, 2001).

A presença de estruturas granulares em Latossolos derivados de calcário já foi reportada por outros autores (Ferreira et al., 1999; Schaefer, 2001) e, embora o material de origem possa ter influência na estabilidade dos agregados granulares (Marcelino et al., 2010), ele não exerce um controle na formação dessas estruturas (Schaefer, 2001). Esse fato é destacado considerando que solos desenvolvidos a partir de calcário representam, quando maduros, solos muito intemperizados, notadamente caulinitico-gibbsíticos, ainda que a cor vermelha lhes seja característica. Essa paragênese mineral não envolve um conteúdo de óxidos de ferro considerado suficiente para promover a agregação, o que seria argumento fundamental para supor a origem biológica para essas microestruturas.

Ainda que estável, as condições mecânicas a que foram submetidas o solo por meio dos distintos tipos de manejo ao longo de mais de duas décadas apresentam potencial para alterar as microestruturas granulares dos Latossolos. Diversos estudos têm demonstrado que o principal mecanismo de perturbação dessas estruturas é a compactação, que implica diretamente na diminuição dos macroporos, que acarreta, como consequência, na redução das taxas de infiltração de água e de difusão de oxigênio para as raízes, além do aumento do impedimento mecânico.

Como a porosidade do solo é resultado direto do arranjo das suas partículas minerais, ela é considerada como um atributo quantitativo ideal para a avaliação da degradação da sua estrutura (Kilasara & Tessier, 1991). Na avaliação em laboratório (Tabela 3), a porosidade total foi reduzida nos tratamentos cultivados em relação ao solo da vegetação nativa, na profundidade de 10 cm. Na maior profundidade avaliada (50 cm), a redução de porosidade apenas foi verificada no plantio direto. Efeitos de práticas mecânicas na estrutura são esperadas, sendo associadas à quebra de agregados e perda de porosidade total, além da transformação de macro em microporos (Soares et al., 2005).

Em estudos de qualidade do solo, o uso de técnicas de micromorfologia tem sido uma ferramenta refinada para auxiliar na elucidação de alterações que ocorrem nos atributos físicos em decorrência dos diferentes usos e manejos do solo (Castro et al., 2003). Nosso estudo demonstrou compatibilidade de resultados entre os atributos

físicos avaliados em laboratório e pela micromorfologia, semelhante ao verificado por Cooper (1999) e Souza et al. (2006), que também identificaram perdas de porosidade total de solos submetidos ao uso e manejo. Entretanto, o uso da tomografia computadorizada apresentou limitações de avaliação, que foram associadas à maior densidade dos tratamentos cultivados.

Os resultados aqui encontrados corroboram estudos prévios e demonstram que independente do tipo de manejo adotado, as transformações microestruturais conduzem à destruição dos agregados granulares e compactação do solo. A análise micromorfológica permitiu analisar tal efeito ao nível de feições físicas do solo em nível de microestrutura. Em termos micromorfológicos, essas transformações puderam ser avaliadas através da mudança da distribuição relativa (de enaulica para porfirica) e do tipo de sistema poroso (de empacotamento para cavitário e/ou planar), o que necessariamente implica na mudança da microestrutura (de granular bem separada para blocos subangulares moderadamente separados ou para microestruturas apédicas definidas pelo sistema poroso, como cavitária ou planar). Disto resulta maior possibilidade de inferências a partir da micromorfologia acerca das condições físicas, hidrológicas e estruturais de Latossolos (Juhász, 2007). Na tomografia computadorizada, o espaço poroso visualizado no cerrado (Figura 6) foi reduzido com a implantação das práticas de cultivo, e na estimativa da porosidade calculada - ainda que prejudicada por limitações da técnica em corpos de prova de maior densidade, a redução foi evidente.

A maneira como cada tipo de manejo alterou a microestrutura do solo deve ser compreendida a partir de suas especificidades. Micromorfológicamente, o plantio direto e o uso do arado de disco apresentaram maior compactação superficial, ao passo que com a grade e o subsolador ela ocorreu mais em profundidade (Figura 4). A tomografia computadorizada não identificou camadas ou superfícies compactadas na extensão da região de interesse (ROI) na parte central do corpo de prova. O pequeno volume da amostra pode ter limitado tal visualização, muito embora o equipamento, um microtomógrafo, dificilmente teria resolução para estruturas de solo maiores, já tendo dificuldades de transmissão de raios X nos tratamentos mais densos.

A adoção do sistema de plantio direto é considerada como a melhor das tecnologias agrícolas já adotada no Brasil durante os últimos 50 anos (Giarola et al., 2013) porém, quando não aplicada corretamente pode causar alterações como aumento da densidade causando a compactação do solo. A compactação superficial nesse

sistema de cultivo, com a verificada nas lâminas delgadas, tem sido considerada um problema crescente na agricultura, sendo intensificada com o uso frequente de maquinário agrícola (Nunes et al., 2015; Reichert et al. 2009). No Paraná, estado com maior área de adoção de plantio direto do país, o tráfego de máquinas sob condições de elevada umidade é considerado o maior responsável pela compactação do solo (Tavares Filho & Tessier, 2010). Por outro lado, quando adotado corretamente, esse sistema promove na estrutura do solo alterações associadas a uma vasta rede de fissuras que levam à maior retenção de umidade do solo, estímulo da atividade biológica, assim como maior abundância de raízes (Tavares-Filho et al., 2001), o que favorece a qualidade física do solo.

A compactação do solo nos sistemas de manejo convencionais com uso de discos e outros implementos é considerada como resultado de diversos mecanismos relacionados ao solo, e induzidos por fatores externos e internos (Hamza & Anderson, 2005). Na profundidade de 10 cm, as lâminas delgadas indicaram redução de porosidade com o uso da grade (GS) e arado de discos (AD), o que não é muito coerente com o revolvimento proporcionado por esses implementos nessa profundidade. Compactação de arados e grades é mais frequentemente relatada abaixo da profundidade de preparo, como no trabalho de Bertolino et al. (2010), que observaram em sistema de manejo convencional de um solo do Rio de Janeiro que o uso de arado de disco seguido de gradagem proporcionou a formação de uma camada compactada próximo a 20 cm de profundidade associada à redução de 44% na porosidade total do solo.

## **5. Conclusões**

A micromorfologia permite identificar mudanças microestruturais causadas pelo manejo em Latossolos de estrutura granular pequena e forte. Ainda assim é evidente a relativa boa resistência dos agregados de estrutura granular do Latossolo mesmo após duas décadas de manejo, o que corrobora a classificação morfológica quanto ao grau de desenvolvimento dessas estruturas.

A avaliação micromorfométrica converge com os achados obtidos com a avaliação tradicional da porosidade do solo, indicando menor perda de poros com o uso da grade associada com o subsolador.

## 6. Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 19. p. 115-119. 1995.
- AL-SHAMMARY, A. A. G.; KOUZANI, A.Z.; KAYNAK, A.; KHOO, S. Y.; NORTON, M.; GATES, W. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. **Pedosphere**. v. 28. p. 581-596. 2018.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Avaliações das propriedades físicas em Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. **Sanare**. v. 17. p. 94-101. 2002.
- BEAVERS, A. H.; JOHNS, W. D.; GRIM, R. E.; ODELL, R. T. Clay minerals in some Illinois soils developed from loess and till under grass vegetation. **Clays and Clay Minerals**. v. 393. p. 356-372. 1955.
- BERTOLINO, A. V. F. A.; FERNANDES, N. F.; MIRANDA, J. P. L.; SOUZA, A. P.; LOPES, M. R. S.; PALMIERI, F. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. **Journal of Hydrology**. v. 393. p. 94-104. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.038>
- BITOM, D. & Volkoff, B.; Mise en évidence de deux modes de microstructuration dans une couverture de sols ferrallitiques rouges du Sud-Cameroun. **Science du Sol**. v. 29. p. 289-300. 1991.
- BLANCO-CANQUI, H. & RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment, **Geoderma**. v. 326. p. 164-200. 2018.
- BORCHARDT, G. **Smectites**. Soil Science Society of America Book Series. v. 1. p. 675-718. 1989.
- BRADFORD, J. M. & GUPTA, S. C. **Compressibility**, In: A, Klute (Editor), Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods. Am. Soc. Agron. & Soil Sci. Soc. Am. Monograph n. 9, p. 479-480. 1986.
- BRADY, N. C. & WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. Ed, Porto Alegre: Bookman, p. 274 – 275. 2013.
- BRANDALISE, L. A.; PIMENTEL, G. B.; STEINER, H. P.; SOARES, J.; MENDES, J. R.; QUEIROZ, N. F.; LIMA, O. M.; PÁDUA, W. **Projeto sondagens Bambuí em Minas Gerais: relatório final**. Belo horizonte. DNPM/CPRM. v. 5. 1980.
- CASSEL, D. K.; RACZKOWSKI, C. W.; DENTON, H. P. Tillage Effects on Corn Production and Soil Physical Conditions. **Soil Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 59. p. 1436-1443. 1995.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P. **Micromorfologia do solo: bases e aplicações**. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 3. p. 107-164. 2003.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizonte B latossólico e B textural sobre diabásio**. 132. p. 1999. (Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Piracicaba).

COSTA, L. F., BALBINOT, ANTONINO, A. C. D.; RICHARD, J.; H.; COUTINHO, A. P.; VASCONCELOS, T. C.; MACHADO, C. B. X-ray computed microtomography in the evaluation of the porous system of soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 22. p. 249-254. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n4p249-254>

COSTA, M. T.; BRANCO, J. J. R. **Roteiro para a excursão Belo Horizonte – Brasília**. In: Branco, J.J.R. (ed.). Contribuição ao 14º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG: Belo Horizonte, p. 9-25. 1961 (Publicação n.º 15).

COX, E. A. A method for assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. **Journal of Paleontology**. v. 1. p. 179-183. 1927.

DE MENDIBURU, F. **Agricolae: statistical procedures for agricultural research**. **R package version. 1.2-8**. 2017. <<https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/agricolae> >.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise do solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 230 p. 2011. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 353p. 2013.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Função em código R para analisar experimentos em DBC simples, em uma só rodada**. In: JORNADA CIENTIFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS-MG, 2, Alfenas. Resumos. Alfenas: Unifal-MG, 2009.

FERREIRA, T.R.; PIRES, L.F.; WILDENSCHILD, D.; HECK, R.J.; ANTONINO, A.C.D. X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system. **Geoderma**. v. 324. p. 119 – 130. 2018.

GAO, Z.; GUAN, X. Micromorphological characteristics of soils of different fertility in north eastern China. **Developments in Soil Science**. v. 22. p. 651-658. 1993.

GERASIMOVA, M.; LEBEDEVA-VERBA, M. **Topsoils Mollic, Takyric and Yermic Horizons** In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Eds.). Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier: Amsterdam. p. 351-368. 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00016-7>

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, Á. P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C. On the Visual Evaluation of Soil Structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage. **Soil & Tillage Research**. v. 127. p. 60-64. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.004>

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**. v. 82. p. 121–145. 2005.

JACKSON, M. L.; HSEUNG, Y.; COREY, R. B.; EVANS, E. J.; VANDEN HEUVEL, R. C. Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments: II, Chemical weathering of layer silicates. **Soil Science Society of America Proceedings**. v. 16. p. 3-6. 1952.

JUHÁSZ, C. E. P.; COOPER, M.; CURSI, P. R.; KETZER, A. O.; TOMA, R. S. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**. v. 64. p. 344-354. 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162007000400005>.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**. v. 5. p. 17-40. 1997.

KILASARA, M. & TESSIER, D. Intérêt des mesures physiques sur échantillons non remaniés dans la caractérisation des sols ferrallitiques. Application à la couverture ferrallitique du district de Muhesa (Tanzanie) **Cah. Orstom, sér. Pédol.** v. 26. p. 91-103. 1991.

MULLER, J. P. Microstructuration des stutichrons rouges ferrallitiques, a` l`amont des modeles convexes (Centre-Cameroun). Aspects morphologiques. **Cahiers ORSTOM, Série Pédoologie**. v. 15. p. 239–258. 1977.

MULLER, J. P. Micro-organization of loose ferralitic materials in the Cameroons. In Bullock, P. & Murphy, C.P. (Eds.). **Soil Micromorphology**. Volume 2. Soil Genesis. AB Academic Publishers: Berkhamsted, UK, p. 655–666. 1983.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**. v. 259-260. p. 149-155. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.003>.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; SILVA, A. M. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 38. p. 819-826. 2003. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2003000700005>.

PEREIRA, T. C. T.; SCHAEFER, C. G. R.; KER, J. C.; ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, I. C. C. Micromorphological and microchemical indicators of pedogenesis in Ornithogenic Cryosols (Gelisols) of Hope Bay, Antarctic Peninsula. **Geoderma**. v. 193-194, p. 311-322. 2013.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 310-319. 2009.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 102 p.

SINGH, M.; SARKAR, B.; BISWAS, B.; BOLAN, N. S.; CHURCHMAN, G. J. Relationship between soil clay mineralogy and carbon protection capacity as influenced by temperature and moisture. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 109. p. 95 – 106. 2017.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M; COOPER, M; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 41. 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300016>

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of Oxisols in Parana, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 3. p. 899–906. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300031>

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F. & FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 25. p. 725-730. 2001.

TEIXEIRA, W.; CEDDIA, M.; OTTONI, M. DONNAGEMMA, G. (Eds.), **Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration**. Springer, Switzerland. 2014. 499p.

TSENG, T. L.; Alves, M. C.; Crestana, S. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, v. 318. p. 78–87. 2018.

VAZ, C.; TULLER, M.; LASSO, P.; CRESTANA, S. **New perspectives for the application of high-resolution benchtop X-ray microCT for quantifying void, solid and liquid phases in soils**. In: TEIXEIRA, W., CEDDIA, M., OTTONI, M., DONNAGEMMA, G. (Eds.), **Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration**. Springer, Switzerland, p. 261-281. 2014.

## CONCLUSÕES GERAIS

A qualidade física do solo foi impactada com a adoção dos diferentes sistemas de manejos do solo e o sistema de plantio direto não foi capaz de reduzir tais efeitos.

O desempenho não esperado com a adoção do plantio direto foi associado às dificuldades de produção e manutenção de palhada, que mais levariam à classificação deste tipo de preparo como cultivo mínimo e não plantio direto. Essa situação de não rotação efetiva de culturas na safra e de não investimento em plantas de cobertura no inverso têm sido frequente no Cerrado, onde a alta precipitação do verão ainda incrementa a decomposição do material orgânico. Disto resulta algumas recomendações de prática da escarificação ou subsolagem para tentar melhorar a qualidade do solo.

Os resultados obtidos por meio de avaliações de campo, de laboratório e de interpretação e diagnóstico por imagens utilizados no presente estudo, convergiram ao demonstrar as alterações nos indicadores de qualidade física, na dinâmica do carbono e na microestrutura do Latossolo de Cerrado de alta resistência ao manejo por sua conhecida estrutura forte.

Por se tratar de um estudo de longa duração (mais de 22 anos de adoção de práticas de manejo), maior confiabilidade pode ser atribuída aos resultados obtidos, não se descartando a possibilidade do uso de outras técnicas para a melhoria da acurácia dos mesmos.

Mesmo após longo tempo de uso e contínua capacidade produtiva, a qualidade física do Latossolo de Cerrado foi reduzida, merecendo atenção em decisões futuras.