

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**AGREGAÇÃO E ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA
EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS DE MANEJO DO
SOLO**

FÁBIO FARIAS AMORIM
(Dissertação de mestrado)

**Porto Alegre, RS
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**AGREGAÇÃO E ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA
EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS DE MANEJO DO
SOLO**

FÁBIO FARIAS AMORIM
Engenheiro Agrônomo (UFRB)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil

Março de 2016

CIP - Catalogação na Publicação

Amorim, Fábio Farias
Agregação e estabilidade da matéria orgânica em
sistemas conservacionistas de manejo do solo / Fábio
Farias Amorim. -- 2016.
68 f.

Orientador: Cimélio Bayer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-
RS, 2016.

1. Fração particulada. 2. Matéria orgânica . 3.
Plantio direto. 4. Sistemas de culturas. 5.
Sustentabilidade. I. Bayer, Cimélio, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FÁBIO FARIAS AMORIM

AGREGAÇÃO E ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS
CONSERVACIONISTAS DE MANEJO DO SOLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência
do Solo.

Aprovada em 08 de março de 2016
Homologada em 10 de abril de 2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Carlos Gustavo Tornquist
UFRGS

Prof. Paulo César do Nascimento
UFRGS

Dr. Luciano Kayser Vargas
FEPAGRO

Orientador - Prof. Cimélio Bayer
UFRGS

DEDICO

*Aos meus pais **Antônio** e **Iracema**, pelos exemplos de vida, pela compreensão, carinho e amor a mim dedicados, e que sempre acreditaram, incentivaram e investiram na minha formação moral, intelectual e profissional.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me amparar nas horas mais difíceis da minha vida, em todas as conquistas nesses anos e por me lembrar de que sempre sou mais forte do que penso.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo pela oportunidade e pelos ensinamentos.

Ao Professor Cimélio Bayer, pelo apoio, ensinamentos, compreensão e orientação.

Ao Grupo de manejo, Tonho, Fernando, Murilo, Diego, Tiago, Estefânia, Tati, Daiane, Cecilia, Anai, Anna, Vitor, Luana, Janqui, Dudu, Barok, Adriano, Dani, Fernanda, Jackson, Renan e Douglas, pelo companheirismo e inestimável colaboração nas fases de campo e de laboratório, necessários e importantes para a consecução desta pesquisa.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação e amigos, pela atenção, paciência e amizade, Prof^o PC, Elis, Nanda, Tiago Stumpf, Gabriel, Agi, Maurifran, Janderson, Alcinei, Claudia, Benito, Carol Valverde, Israel, Dena, Marcelo, Cezar, João Bonetti, Diego Cecagno, Daise, Felipe Artuzo, Marcus Fipke e Andrew.

Um agradecimento mais que especial a meus amigos da vida, pelo apoio e amizade irrestrita, Prof^o Joelito, Erivaldo, José Augusto “Zé Galinha”, Diego Cunha e Paulo Ronaldo.

Um super agradecimento à minha esposa Maria Reis, pelo amor, amizade, companheirismo, carinho e compreensão.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação e para a realização deste estudo, meu MUITO OBRIGADO.

AGREGAÇÃO E ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS DE MANEJO DO SOLO^{1/}

Autor: Eng. Agr. Fábio Farias Amorim
Orientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

RESUMO

A estabilidade de agregados é influenciada pelos sistemas de manejo do solo, com reflexo na estabilização da matéria orgânica e estoques de C e N no solo. O efeito de longo duração (30 anos) de dois sistemas de preparo [plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)] e de três sistemas de culturas: [aveia/milho (A/M), ervilhaca/milho (V/M) e aveia+ ervilhaca/milho+ caupi (A+V/M+C)] sobre os índices de agregação, conteúdo e frações de C e N de um Argissolo Vermelho distrófico típico, foram avaliados. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm e separadas em seis classes de agregados (>4,76; 4,76-2,00; 2,00-0,50; 0,50-0,250, 0,250-0,053 e <0,053 mm) por via úmida e seca, e avaliadas em relação ao teor de C e N e submetidas ao fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo (MOS). As concentrações de C e N no solo foram maiores no solo em PD e na camada de 0-5 cm. Os estoques de C e N foram 23 e 32% maiores respectivamente no sistema de culturas (0-20 cm) com elevado aporte de resíduos (A+V/M+C), em relação ao sistema com gramíneas (A/M). O diâmetro médio ponderado (DMP) e o índice de estabilidade dos agregados do solo [(DMPu/DMPs) x100], foram superiores no solo em PD em relação ao solo em PC, devido ao predomínio de macroagregados ($\geq 4,76-2,00$ mm). Nos estoques das frações da MOS, o carbono orgânico particulado (COP) e o nitrogênio particulado (NP) foram maiores nos sistemas de culturas com leguminosas no solo em PD, em relação ao PC, enquanto que o C e o N associado aos minerais foram influenciados somente pelos sistemas de culturas. As taxas anuais de acúmulo de C na camada de 0-20 cm nos sistemas de culturas variaram de 35,3 a 67,6 kg C ha⁻¹ ano⁻¹, o acúmulo de N variou de 4,7 a 16,7 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ sendo maiores no sistema A+V/M+C. Os estoques de C e N no solo foram influenciados em maior grau pelo sistema de culturas do que pelo sistema de preparo de solo. Esses resultados demonstram que em sistemas conservacionistas o aumento nos estoques de C e N do solo e a estabilidade dos agregados estão associados tanto com a não mobilização do solo quanto com o aporte de resíduos vegetais pelos sistemas de culturas.

^{1/}Dissertação de Mestrado em Ciência do solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (69 p) Março, 2016.

AGGREGATION AND SOIL ORGANIC MATTER STABILITY IN CONSERVATIONIST SOIL MANAGEMENT SYSTEMS^{1/}

Author: Agron. Eng. Fábio Farias Amorim
Adviser: Prof. Dr. Cimélio Bayer

ABSTRACT

The aggregate stability is influenced by soil management systems, with reflex on soil organic matter stabilization and C and N stocks. We evaluated the long term (30-yr) effect of two tillage systems [no-tillage (NT) and conventional tillage (CT)] and three cropping systems [oat/maize (O/M), vetch/maize (V/M), and oat + vetch/maize + cowpea (O+V/M+C)] on stability of soil aggregates, C and N content in total soil organic matter (OM) and particulate and mineral-associated fractions of a sandy clay loam Typic Paleudult. Soil samples were collected at 0-5, 5-10 and 10-20 cm. Disturbed soil samples were collected for C and N analysis and OM fractionation; undisturbed soil samples were collected for soil aggregates analysis. Aggregates were separated in six classes (> 4.76 ; 4.76-2.00; 2.00-0.50; 0.50-0.250, 0.250- 0.053 and <0.053 mm) by dry (d) and wet (w) methods, the mean weighted diameter (MWD) of aggregates and the stability index $[(MWD_w/MWD_d) \times 100]$ were calculated.). The concentrations of C and N in soil were higher in NT in 0-5 cm layer. The C and N stocks were 23 and 32% higher in cropping system (0-20 cm) with a high crop residue input (O+V/M+C) than of grasses only based cropping system (O/M). The average diameter and stability index of soil aggregates were higher in NT in relation to CT, mainly due to predominance of macroaggregates (≥ 4.76 to 2.00 mm). In SOM fractions, particulate organic carbon (POC) and particulate nitrogen (NP) were higher in legume-based cropping systems in NT, related to CT, while the C and N in mineral-associated soil organic matter was affected by only cropping systems. The annual rates of C accumulation at 0-20 cm in cropping systems ranged from 35.3 to 67.6 kg ha⁻¹ yr⁻¹, N accumulation ranged from 4.7 to 16.7 kg ha⁻¹ yr⁻¹ and it was higher in the system O+V/M+C. Soil C and N stocks were influenced mainly by cropping systems than the tillage systems. Our results highlight that increase of soil C and N stocks are related both by no soil disturbance plus higher C input under conservationist soil management systems.

^{1/} M.Sc. Dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, School of Agronomy, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre (69 p) in March 2016.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Sistemas de manejo do solo	4
2.2 Agregação e matéria orgânica do solo.....	5
2.3 Mecanismos de estabilização da matéria orgânica no solo	7
2.4 Fracionamento da matéria orgânica.....	9
3. HIPÓTESES E OBJETIVOS GERAIS	11
3.1 Hipótese	11
3.2 Objetivos gerais	11
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.1 Local de estudo.....	12
4.2 Amostragem do solo	13
4.3 Densidade do solo	13
4.4 Análise de carbono orgânico e nitrogênio total no solo.....	13
4.5 Estabilidade de agregados.....	15
4.6 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica	16
4.7 Análise estatística	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.1 Acúmulo de carbono orgânico e nitrogênio do solo	18
5.1.1 Efeito dos sistemas de preparo do solo	18
5.1.2 Efeito dos sistemas de culturas	21
5.2 Estoque de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) do solo	24
5.2.1 Estoques de carbono orgânico (C)	24
5.2.2 Estoques de nitrogênio total (NT)	28
5.2.3 Taxas anuais de acúmulo de carbono orgânico (C) e nitrogênio total (N)	30
5.2.4 Distribuição de tamanho de agregados	31
5.2.5 Estabilidade de agregados no solo.....	37
5.3 Fracionamento físico granulométrico da MOS	41
5.3.1 Carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM).....	41
5.3.2 Nitrogênio particulado (NP) e associado aos minerais (NAM)	45
6. CONCLUSÕES	49
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
9. APÊNDICE	64

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Densidade e massa do solo nas três camadas para os tratamentos amostrados em um Argissolo Vermelho sob sistemas conservacionistas de manejo do solo.....	15
Tabela 2. Estoque de carbono orgânico total (C) e nitrogênio total (N) em um Argissolo sob diferentes sistemas de manejo.	26
Tabela 3. Distribuição da massa do solo (%), quanto ao diâmetro dos agregados estáveis em água, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, sistemas de culturas e preparos do solo.	33
Tabela 4. Estoques de carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM) nas três camadas de um Argissolo Vermelho subtropical sob diferentes sistemas de manejo.	42
Tabela 5. Estoques de nitrogênio particulado (NP) e N associado aos minerais (NAM) nas três camadas de um Argissolo Vermelho subtropical sob diferentes sistemas de manejo	46
Tabela 6. Significância do tratamento nas variáveis dependentes do solo na profundidade de 0-20 cm e entre camadas, carbono orgânico total (C), nitrogênio total (N), estoques de carbono (EC) e nitrogênio (EN), carbono orgânico particulado (ECOP), carbono associado aos minerais (ECAM), nitrogênio particulado (ENP) e nitrogênio associado aos minerais (ENAM), classes de agregados, diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) e seco (DMPs) e o índice de estabilidade de agregados (IEA).....	67

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Concentrações: a) carbono orgânico total (COT) e b) nitrogênio total (NT) no perfil do solo em diferentes métodos de preparo (na média dos diferentes sistemas de culturas: PC= preparo convencional, PD= plantio direto), conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. A= aveia, V= ervilhaca, M= milho, C= caupi), barra na horizontal indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (Prep= método de preparo, Cult= sistema de culturas e Cam = camada de solo).20
- Figura 2.** Efeito da utilização dos sistemas de culturas sobre o acúmulo de carbono orgânico total e nitrogênio total do solo nos métodos de preparo em 3 camadas.22
- Figura 3.** Estoque de carbono orgânico total (COT) do solo na camada de 0-20 cm nos dois sistemas de preparo (na média dos três sistemas de culturas: PC= preparo convencional, PD= plantio direto) (a) e nos três sistemas de culturas (na média dos dois métodos de preparo: A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi) (b), conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (ns = efeito não significativo).27
- Figura 4.** Estoque de nitrogênio total (NT) do solo na camada de 0-20 cm nos dois sistemas de preparo (na média dos três sistemas de culturas: PC= preparo convencional, PD= plantio direto) (a) e nos três sistemas de culturas (na média dos dois métodos de preparo: A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi) (b), conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (ns = efeito não significativo).....29
- Figura 5.** Taxas anuais de acúmulo de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na camada de 0-20 cm em diferentes métodos de preparo e sistemas de culturas, conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. O sistema PC A/M foi tomado como referência. PC= preparo convencional, PD= plantio direto, A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi.

Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (ns = efeito não significativo).....30

Figura 6. Distribuição de agregados de solo estáveis em água, por classe de diâmetro de agregados, nos sistemas de culturas, preparo e camadas do solo. As barras verticais indicam o erro padrão. A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi. PC= Preparo convencional, PD= Plantio direto.36

Figura 7. Diâmetro médio ponderado úmido (DMPU) (a) e seco (DMPS) (b) dos agregados de solo e índice de estabilidade de agregados (IEA) (c) no perfil do solo, em diferentes métodos de preparo e sistemas de culturas, conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtrópico brasileiro por 30 anos. Letras minúsculas comparam sistemas de culturas dentro de cada método de preparo; letras maiúsculas comparam métodos de preparo dentro de cada sistema de cultura; e médias com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. PC= preparo convencional, PD= plantio direto, A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi.38

Figura 8. Estoques de carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM), na profundidade de 0-20 cm, em relação aos sistemas de preparo e culturas. Médias seguidas de mesma letra dentro de cada sistema de culturas não diferem entre si, enquanto isso, ns indica não significativo pelo teste de Tukey a 5%. As barras verticais indicam o erro padrão. Plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.44

Figura 9. Estoques de nitrogênio particulado (NP) e associado aos minerais (NAM), na profundidade de 0-20 cm, em relação aos sistemas de preparo e culturas. Médias seguidas de mesma letra dentro de cada sistema de culturas não diferem entre si, enquanto isso, ns indica não significativo pelo teste de Tukey a 5%. As barras verticais indicam o erro padrão. Plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.47

1. INTRODUÇÃO

A prática de plantio direto em longa duração geralmente implica maiores estoques de C e N no solo do que sob preparo convencional (PC), devido à preservação da matéria orgânica (MO) e menor mineralização dos resíduos na superfície do solo. No entanto, a diferença da quantidade e qualidade da MO entre os dois sistemas depende de fatores tais como textura, material de origem, clima regional, sistema de cultivo e propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Doran, 1987; Balesdent et al., 2000; Collins et al., 2000).

A proteção física da MO pela estrutura do solo é frequentemente citada como um fator importante para reduzir os impactos gerados por sistemas convencionais de preparo do solo na MOS, comparado ao PD (Balesdent et al., 2000). Nesse sentido, é importante considerar todos os níveis de complexidade e diversidade estrutural e as possibilidades de interação com a matriz mineral do solo em estudos sobre o efeito da proteção física no armazenamento do C e N em diferentes sistemas de preparo (Christensen, 2001).

As entradas de material orgânico fresco retidos em partículas ou coloides que estão associados com os minerais do solo são protegidos fisicamente, retardando a decomposição em comparação com resíduos deixados na superfície do solo, promovendo o desenvolvimento de microagregados estáveis dentro de macroagregados. (Plante & McGill, 2002). O revolvimento do solo pelos sistemas convencionais provoca alterações na distribuição e na estabilidade dos agregados, reduzindo a percentagem de macroagregados e aumentando a dos microagregados, expondo a matéria orgânica à atividade microbiana, principalmente de macroagregados, ocasionando maior exposição da MO à decomposição (Six et al., 1999). Por outro lado, a concentração de C no solo depende da quantidade adicionada e das condições do ambiente. Com isso o sistema de PD tem o potencial de retenção C em solos sob clima

subtropical quente e úmido devido à adição constante de resíduos vegetais na superfície do solo (Bayer et al., 2006; Zanatta et al., 2007), especialmente quando há uma elevada e diversificada oferta de biomassa na rotação de culturas (Madari et al., 2005; Tivet et al., 2013).

O solo em PD combinado a sistemas de culturas é outra prática de manejo que influencia no armazenamento e regulando os mecanismos de entrada e perdas de C e N no solo. Por conseguinte, tem sido observado que a inclusão de leguminosas em sistemas de culturas de cobertura contribui não só para a entrada de C mas de N atmosférico no solo, sendo muito importante para o aumento de COT e suas frações (Bayer et al., 2000a; Zanatta et al., 2007; Zotarelli et al., 2007; Conceição et al., 2013; Raphael et al., 2016)

A MO localiza-se em diferentes compartimentos com diferentes mecanismos de proteção e tempos de reciclagem (Duxbury et al., 1989). Estes compartimentos podem ser separados em frações que são física e quimicamente estabilizadas, por meio, respectivamente, de agregação ou de íntima associação com partículas de argila, ou bioquimicamente estabilizáveis devido a sua estrutura molecular (Six et al., 2002a). Cada fração apresenta diferente importância na dinâmica da MOS e ciclagem de nutrientes, respondendo de forma diferente as práticas de manejo do solo. Vários métodos foram desenvolvidos para isolar as frações da MO e quantificar o conteúdo de C no solo, a fim de avaliar os impactos e as relações entre o manejo e a distribuição de C nas frações da MOS (Hassink, 1997; Sohi et al., 2001; Six et al., 2002b). As técnicas de fracionamento físico, tais como fracionamento granulométrico, fracionamento densimétrico, e fracionamento por agregado, enfatizam o papel de minerais do solo na estabilização da MOS.

Desta forma, o fracionamento físico é uma ferramenta útil em estudos relacionados à estabilização da matéria orgânica pela interação organomineral e proteção física, sendo um importante indicador para mostrar diferenças significativas causadas pelo manejo do solo na dinâmica da matéria orgânica em um curto período de tempo sobre as taxas de decomposição e, conseqüentemente, acúmulo de matéria orgânica presente dentro e entre as diferentes frações de agregados do solo (Christensen, 2001; Nascente et al., 2013). Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito dos sistemas

de manejo na estabilidade dos agregados, conteúdo de C e N total e nas frações físicas da MOS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de manejo do solo

O preparo do solo é uma prática que afeta ou interage com uma série de características do perfil do solo, pois atua diretamente sobre sua estrutura (Matos et al., 2008). Em determinadas situações, é fundamental para o estabelecimento e desenvolvimento das culturas, e se constitui de práticas simples, que, utilizadas racionalmente proporcionam retorno econômico na produção de grãos. No entanto, o uso inadequado pode levar à degradação do solo em curto prazo.

Até o final da década de 70, se preconizava o que atualmente chamamos de preparo convencional (PC), caracterizado pelo elevado revolvimento do solo. Essa prática consiste no revolvimento das camadas superficiais do solo, em torno de 20 cm, para incorporar fertilizantes e corretivos, além de aumentar espaço poroso, elevar a permeabilidade e reduzir a retenção de água no solo (Braunack & Dexter, 1989). Porém, ao longo dos anos o uso inadequado desse sistema de preparo associado ao monocultivo, trouxe sérios problemas ao solo como erosão hídrica (Santos & Tomm, 2003), além de degradar vários atributos físicos, químicos e biológicos (Carneiro et al., 2009), dentre estes a redução dos teores de carbono orgânico. Esses excessos de revolvimento do solo desestabilizam a MOS e a tornam suscetível à ação microbiana com a liberação de CO₂ à atmosfera e, conseqüentemente, redução dos estoques de carbono do solo (Lal & Faleiro, 2008).

Neste aspecto, a adoção de sistemas de manejo do solo considerados conservacionistas, tais como o sistema plantio direto (PD) e o cultivo de espécies vegetais com grande capacidade fotossintética e de produção de resíduos tem-se apresentado como alternativas viáveis contra a perda de matéria orgânica (Rossetti & Centurion, 2015), favorecendo a manutenção e o acúmulo desta ao

longo do tempo (Bayer & Mielniczuk, 2008). De acordo com estes autores, além do acúmulo de resíduos na superfície, o uso desses sistemas de manejo pode fazer com que os teores de carbono orgânico, nutrientes e a capacidade de troca de cátions sejam maiores comparados a outros sistemas.

O solo no sistema de PD geralmente exibe um aumento de MOS e agregação em comparação com PC (Paustian et al., 1992; Smith et al., 1998; Diaz-Zorita & Grove, 2002; Amado et al., 2006). Isto tem sido explicado pela redução do revolvimento do solo que atua no rompimento dos agregados, levando à formação de macroagregados estáveis que estabilizam e protegem a MO durante um período mais longo (Six et al., 2000). Após vários estudos de longa duração (Paustian et al., 1997) observaram que na maioria dos casos houve um aumento no teor de C no solo em PD comparado com os sistemas de PC. Esses autores notaram que a redução da agregação tem relação direta com a redução dos níveis de MO em solos sob PC. Esta relação é resultado de efeitos indiretos sobre a agregação, além disso, sistemas de PC incorporam resíduos vegetais no solo afetando o microclima do solo, aumentando o contato dos resíduos com o solo, aumentando a decomposição e transformação de matéria orgânica (Beare et al., 1992; Cambardella & Elliott, 1993).

Nesse sentido, o solo no sistema de PD leva a um acúmulo de resíduos na superfície. Com isto, a taxa de decomposição é reduzida devido ao menor contato dos resíduos ao solo, o que retarda a ação dos microrganismos na decomposição (Salinas-Garcia et al., 1997). Esta situação também leva a um aumento na proporção de fungos na biomassa microbiana, os quais contribuem para a formação e estabilização dos agregados.

2.2 Agregação e matéria orgânica do solo

A relação entre agregados e dinâmica da MOS tem sido explicada em diversos estudos (Elliott, 1986; Jastrow, 1996; Six et al., 1998). Tisdall & Oades (1982), desenvolveram um modelo conceitual para a hierarquia de agregados em que a MO desempenha importante papel na estabilidade de agregados (< 20 mm) através de interações entre seus grupos funcionais que estão unidos em microagregados (20-250 μm) por agentes de ligação persistentes (ou seja, matéria orgânica humificada ou complexos com cátions polivalentes, óxidos e

aluminossilicatos. Estes microagregados estáveis, são ligados entre si em macroagregados (> 250 μm) por agentes ligantes temporários (hifas fungicas e/ou raízes), e transientes (polissacarídeos, microbial derivados de plantas ou microrganismos) (Six et al., 2004). De acordo com Six et al. (2004), o conceito de hierarquia de agregados proposta por Tisdall & Oades (1982) é provavelmente o avanço mais significativo na compreensão das interações entre agregados e MOS. Este modelo conceitual tem sido empregado para explicar a correlação positiva entre agregação e MOS com o cultivo (Elliott, 1986; Cambardella & Elliott, 1993; Beare et al., 1994a) e sequestro de C sob práticas de plantio direto e preparo convencional (Beare et al., 1994b; Beare et al., 1994a; Six et al., 1998). Em concordância com o modelo conceitual, Jastrow (1996) observou que quase 90% da MOS encontra-se dentro de agregados do solo.

De acordo com Jastrow (1996) e Six et al. (1998), maior atividade microbiana esgota a MOS, o que eventualmente leva à redução da biomassa microbiana e, conseqüentemente, uma menor produção de agentes de ligação e uma perda de agregação.

Oades (1984), acrescenta uma modificação importante para o conceito hierárquico de agregação, afirmando que as raízes e as hifas atuam como núcleos de formação de microagregados junto a macroagregado sendo os microagregados formados dentro dos macroagregados. Essa nova teoria veio a ser muito importante para a compreensão da dinâmica da MOS e agregados. Elliott (1986), em seguida, sugeriu que macroagregados elevam os teores de C no solo por causa da ligação da matéria orgânica nos microagregados e que esta matéria orgânica é lábil e menos processada pelos agentes orgânicos envolvidos na estabilização dos agregados do solo. Além disso, o revolvimento do solo geralmente resulta em estabilidade e quantidade reduzida de macroagregados, não afetando a estabilidade dos microagregados (Tisdall & Oades, 1982). Elliott (1986), propôs que agentes aglutinantes intermicroagregado são a fonte primária da matéria orgânica perdida quando os solos sob mata nativas são cultivados. Com este conceito, foi identificada pela primeira vez, a ligação direta entre as perturbações agrícola, redução da agregação e redução de MOS lábil (Six et al., 2004).

Entre os diversos enfoques relacionados à caracterização da qualidade da MOS (Tiessen & Stewart, 1983; Stevenson & Elliott, 1989; Christensen, 1992),

a análise das frações separadas fisicamente ocupa lugar de destaque, pois há evidências de que tais frações estão associadas a funções específicas na dinâmica da MOS (Stevenson & Elliott, 1989). O C pode acumular em frações lábeis ou estáveis da MO no solo, o que pode ter implicações na durabilidade do seu efeito quanto à retenção de C atmosférico, bem como nas alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos. Assim, visando identificar em quais compartimentos o C está acumulando, têm sido utilizadas técnicas de fracionamento físico da MO que podem ser granulométricas (Franzluebbers & Arshad, 1997), densimétricas (Golchin et al., 1994a), ou uma mistura de ambas (Six et al., 1998). O acúmulo de C em frações lábeis da MO tem sido relacionado à sua proteção física no interior de agregados, em consequência da inacessibilidade aos microrganismos e suas enzimas (Feller & Beare, 1997). A MO protegida no interior de agregados apresenta um tempo de permanência no solo maior do que a MO livre, sendo esta proteção maior nos microagregados do que nos macroagregados (Buyanovsky et al., 1994)

2.3 Mecanismos de estabilização da matéria orgânica no solo

O armazenamento de matéria orgânica do solo é o saldo líquido de entradas e saídas de C orgânico. Entradas de matéria orgânica são afetadas pela produtividade das culturas, relacionadas com o fornecimento de nutrientes, temperatura, umidade e (Chapin & Eviner, 2005) ou por sistemas de manejo do solo (por exemplo: uso de resíduos orgânicos). Saída de matéria orgânica é controlada principalmente por decomposição microbiana, o que é muito afetado pela umidade e temperatura (Kirschbaum, 1995). Além dos fatores ambientais, é amplamente aceito que a MOS pode ser protegida da decomposição microbiana de três formas – recalcitrância bioquímica, proteção física e estabilização química (Interação organomineral) (Sollins et al., 1996; Baldock & Skjemstad, 2000; Six et al., 2002a; Lützow et al., 2006).

A estabilidade bioquímica refere-se à recalcitrância como sendo um mecanismo que estabiliza a MO contra a decomposição microbiana. A MO é um material heterogêneo, composto, que inclui componentes de forma e níveis de degradação diferentes, tais como resíduos, biomassa microbiana, orgânicos solúveis em água, e húmus (Stevenson, 1994). Embora algumas substâncias

orgânicas decomponham-se rapidamente (por exemplo, amido e celulose) (Martin & Haider, 1986), algumas podem se decompor lentamente devido à complexidade da estrutura química (por exemplo, lignina não contém ligações hidrolíticas, compreende grupos aromáticos), e, portanto, são consideradas bioquimicamente recalcitrante (Berg et al., 1982; Stevenson, 1994; Schmidt & Noack, 2000). A recalcitrância pode ocorrer a partir do substrato original ou gerada através da decomposição parcial e a formação de metabolitos. A recalcitrância da MO tem sido considerada como um mecanismo de estabilização primária, conforme verificado em estudos com análises isotópicas de compostos específicos (Thevenot et al., 2010; Schmidt et al., 2011). Nesse sentido, tem sido observado que nenhuma substância orgânica são imune à atividade microbiana (Hamer & Marschner, 2005; Marschner et al., 2008).

A MOS pode ser fisicamente protegida dentro de agregados no solo (Tisdall & Oades, 1982; Oades & Waters, 1991; Christensen, 1996). Os agregados são ligados por hifas fúngicas e polissacárideos derivados de exsudato de raízes ou microrganismos (Tisdall & Oades, 1982). A MO oclusa nos agregados pode tornar-se espacialmente inacessível a enzima dos microrganismos. A proteção física exercida pelos agregados é atribuído a: (i) redução do acesso de microrganismos para o centro dos agregados, onde a maior parte do carbono orgânico (CO) é localizado, (ii) redução da difusão do oxigênio em macro e especialmente microagregados, e (iii) a localização espacial e, por conseguinte, a inacessibilidade das enzimas nos espaços intra-agregado (Six et al., 2002a). O tempo médio de residência da MO dentro de agregados é curto em relação aquele associado com partículas de silte e argila (Balesdent et al., 1987; Balesdent et al., 1988), sugerindo que enquanto os agregados representam proteção a curto e médio prazo, a estabilização a longo prazo é obtida através da associação com os minerais do solo (Balabane & Plante, 2004).

A matéria orgânica pode ser protegida por interações físico-químicas com os minerais do solo (Sollins et al., 1996; Kaiser & Guggenberger, 2003; Lützow et al., 2006). Através de troca de ligantes, ligações catiônicas, pontes de hidrogênio, ou forças de van der Waals, a matéria orgânica reage com minerais (Stevenson, 1994; Feng et al., 2005). A forte ligação química entre matéria orgânica e a superfície dos minerais, decorrente da associação entre

substâncias orgânicas e inorgânicas, ocorre relativa proteção quanto a decomposição microbiana. (Kell et al., 1994; Kaiser & Guggenberger, 2003; Mikutta et al., 2007). Por meio destas interações, a MO está associada a partículas de silte e argila para formar complexos organominerais. Nesse sentido, as interações entre os complexos organominerais constituem mais de 50% do total da MO (Christensen, 1996; Kahle et al., 2002), sendo pouco influenciadas pelos sistemas de manejo do solo, devido associação com os minerais ser considerado mais estável (Balesdent et al., 1988; Trumbore, 2000).

2.4 Fracionamento da matéria orgânica

Há muitas técnicas que tentam medir o tamanho e o 'turnover' dos reservatórios da MOS, e sendo utilizados para separar os compartimentos em lábil e recalcitrante. Estes métodos baseiam-se na separação química, física ou biológica (Doran et al., 1998). Métodos de fracionamento físico são considerados menos destrutivos do que os procedimentos de fracionamento químicos e resultados obtidos a partir de frações físicas do solo são esperados para se relacionar diretamente com a estrutura e função do MOS in situ (Christensen, 1992). O fracionamento físico do solo enfatiza a função de minerais do solo e da estrutura no 'turnover' da MOS (Christensen, 2001). Estas técnicas têm sido utilizadas para determinar a associação da MOS com partículas primárias e para quantificar as frações da matéria orgânica, entre e dentro dos agregados (Beare et al., 1994b; Six et al., 1998; Puget et al., 2000).

A recuperação do material do solo e da MO após fracionamento físico nunca é total devido a perdas de material, solução de matéria orgânica dissolvida, os erros de medição sobre o peso de frações de carbono e os erros de medição sobre o teor de carbono orgânico das frações individuais da MO. A recuperação pode depender da complexidade do fracionamento da MO. Quanto mais complexo o procedimento de fracionamento, maiores são as perdas e acúmulo de erros de medição. Os diversos tipos de fracionamento de solo utilizados em estudos da MO buscam justamente reduzir essa heterogeneidade, procurando separar frações homogêneas quanto à natureza, dinâmica e função (Christensen, 2001).

A escolha do método de fracionamento depende do objetivo do estudo que se conduz, seja ele para caracterização e identificação química de componentes específicos da MO ou para quantificação de compartimentos importantes da MO e sua relação com funções essenciais, como a ciclagem e liberação de nutrientes (Collins et al., 1997).

A avaliação da agregação do solo e seus impactos sobre dinâmica do C no solo pode ser realizada por métodos de fracionamento físico da MOS que podem ser classificados como métodos granulométricos (Cambardella & Elliott, 1992), densimétrico (Golchin et al., 1994b), ou uma mistura de ambos (Six et al., 1998). O método de fracionamento físico granulométrico tem como princípio a separação da MO por peneiramento. Assim, no método de separação granulométrico mais simples, a MOS é separada em duas frações a partir de dispersão e peneiramento (Cambardella & Elliott, 1992).

O carbono orgânico particulado (COP) é a fração da MOS retida na peneira (COP > 53 μm), sendo caracterizado como a fração mais lábil e, cuja permanência no solo está condicionada à proteção física desempenhada por agregados, portanto, mais sensível aos efeitos de manejo e considerada um importante indicador de qualidade do solo (Golchin et al., 1994a; Bayer et al., 2009; Campos et al., 2011; Figueiredo et al., 2013). O carbono associado aos minerais (COAM) é a fração da MOS associada às frações silte e argila do solo (COM < 53 μm), sendo definida como a fração da MOS que interage com a superfície das partículas minerais, formando complexos organominerais, estando protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (Christensen, 2001). Por outro lado, a fração COAM contém C e N com maior recalcitrância e, geralmente, concentra a maior parte do C e do N total do solo (Campos et al., 2011; Martins et al., 2012).

3. HIPÓTESES E OBJETIVOS GERAIS

3.1 Hipótese

Em plantio direto (PD) a redução do revolvimento do solo e o alto aporte de resíduos no solo favorece à agregação do solo, aumentando a proteção física da MOS e potencializando o sequestro de C no solo

3.2 Objetivos gerais

Avaliar o efeito dos sistemas de manejo do solo, plantio direto e preparo convencional associado a diferentes sistemas de culturas na dinâmica do conteúdo e estoque de C e N total;

Investigar o efeito dos sistemas de manejo em plantio direto e preparo convencional sobre estabilidade de agregados do solo e as frações físicas da MOS;

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

O estudo foi realizado em um experimento de longa duração instalado em 1985 na Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil (30 ° 50 ' 52 '' sul e 51 ° 38 ' 08 '' oeste), clima regional subtropical, temperatura média anual de 19,4 °C, e precipitação de 1.440 milímetros. O solo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2011). A distribuição de tamanho de partícula do solo é de 540 g kg⁻¹ de areia, 240 g kg⁻¹ de silte e 220 g kg⁻¹ de argila, com a fração argila dominada por caulinita (720 g kg⁻¹) e óxidos de ferro (109 g kg⁻¹ de Fe₂O₃).

Anterior à implantação do experimento, a área foi utilizada durante 16 anos sob PC, apresentando por ocasião da instalação, avançado grau de degradação das características físicas do solo (Bayer et al., 2000b) (Bayer et al., 2000). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com três repetições, com as fontes de variação arranjadas em parcelas subdivididas, sendo os métodos de preparo nas parcelas principais (15 x 20 m) e os sistemas de culturas nas subparcelas (5 x 20 m).

Os métodos de preparo utilizados foram o preparo convencional (PC) e o plantio direto (PD); e os sistemas de cultura foram constituídos por diferentes combinações de plantas de cobertura: (i) A/M = aveia (*Avena strigosa* Schreb)/milho (*Zea mays* L.), (ii) V/M= ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho, e (iii) A+V/M+C= aveia+ervilhaca/ milho+caupi (*Vigna unguiculata* L.). Em todos os tratamentos, nunca foi realizada a aplicação de nitrogênio (N) mineral, sendo as leguminosas e o N do solo as únicas fontes de N para as culturas. Segundo dados históricos do experimento, a adição anual média de C pelas culturas, ao

longo dos 30 anos do experimento, para os sistemas de culturas A/M, V/M e A+V/M+C, respectivamente, foi estimada em 4,77, 6,28 e 8,92 Mg ha⁻¹ no solo em PC e 5,21, 6,44 e 8,77 Mg ha⁻¹ no solo em PD. Nesta estimativa foi considerada a biomassa vegetal adicionada pela parte aérea das culturas e uma contribuição de 30% de adição de C pelo sistema radicular (Zanatta et al., 2007).

4.2 Amostragem do solo

O solo foi amostrado em setembro de 2014, ao final do ciclo das culturas de inverno, quando o experimento completou 30 anos de duração. Amostras de solo foram coletadas manualmente, com auxílio de espátula, em duas trincheiras por parcela, nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Amostras indeformadas foram utilizadas para avaliar o estado de agregação do solo e, amostras deformadas, para análise dos estoques de C e N do solo, do fracionamento granulométrico da MO.

4.3 Densidade do solo

Foram realizadas coletas em anéis volumétricos nas profundidades avaliadas 0-5, 5-10, e 10-20 cm. A densidade do solo foi determinada pela relação entre a massa e volume do solo após secagem das amostras durante 24 horas em estufa a 105° C (Embrapa, 2011).

4.4 Análise de carbono orgânico e nitrogênio total no solo

As amostras de solo foram secas ao ar e trituradas com um rolo de madeira para passar uma malha de 2 mm e uma sub-amostra de aproximadamente 20 g foi ainda triturado num almofariz para passar de uma malha de 0,250 mm e analisada em combustão seca analisador Termo Scientific, modelo Flash 2000 Organic Elemental Analyzer. Para calcular os estoques de C e N nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 cm, foi adotado o método da massa de solo equivalente, seguindo o procedimento utilizado por Ellert & Bettany (1995). Esta abordagem estabiliza o efeito do manejo na densidade do solo. O solo sob PC A/M foi a referência para a massa equivalente, (Equação 1) como sendo:

$$M_{\text{solo}} = \rho_{\text{s trat.}} \times E \times 10000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \quad (1)$$

onde:

M_{solo} = massa de solo por unidade de área (Mg ha^{-1});

$\rho_{\text{s trat.}}$ = densidade do solo no referido tratamento (Mg m^{-3});

E = espessura da camada (m).

O fator de correção para a espessura da camada do solo sob PD e PC foi determinado pela equação 2, a fim de obter-se massa de solo equivalente à obtida sob PC A/M.

$$FE = [(M_{\text{ref.}} - M_{\text{trat.}}) \times 0,0001 \text{ ha m}^{-2}] / \rho_{\text{s trat.}} \quad (2)$$

onde:

FE = espessura de solo a ser adicionada ou subtraída de determinada camada de um tratamento para atingir a massa da área de referência (massa equivalente) (m);

$M_{\text{ref.}}$ = massa equivalente de solo da respectiva camada na área de referência (Mg ha^{-1});

$M_{\text{trat.}}$ = massa de solo da respectiva camada no tratamento (Mg ha^{-1});

$\rho_{\text{s trat.}}$ = densidade do solo no referido tratamento (Mg m^{-3})

Após correção da espessura para obtenção da massa equivalente de solo, foi calculado o estoque de carbono orgânico (estoque equivalente de C) a partir da equação 3:

$$\text{Est.equiv.} = \text{Conc.C} \times \rho_{\text{s trat.}} \times E_{\text{corr}} \times 10000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \times 0,001 \text{ Mg kg}^{-1} \quad (3)$$

onde:

Est.equiv. = massa de C orgânico por unidade de área (Mg ha^{-1});

Conc.C = concentração de C (kg Mg^{-1} solo)

$\rho_{\text{s trat.}}$ = densidade do solo na camada amostrada do tratamento (Mg m^{-3});

E_{corr} = espessura corrigida da camada amostrada.

As densidades utilizadas e as respectivas massas de solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade e massa do solo nas três camadas para os tratamentos amostrados em um Argissolo Vermelho sob sistemas conservacionistas de manejo do solo.

Sist. Cult.	Camada (cm)	Densidades		Massa	
		PC	PD	PC	PD
		Mg m ⁻³		Mg ha ⁻¹	
A/M	0-5	1,49	1,42	743,22	711,90
	5-10	1,67	1,63	834,03	814,31
	10-20	1,73	1,68	1732,25	1681,50
V/M	0-5	1,46	1,29	729,14	645,25
	5-10	1,67	1,55	832,70	775,13
	10-20	1,71	1,63	1709,77	1628,08
A+V/M+C	0-5	1,50	1,21	750,83	602,71
	5-10	1,62	1,53	811,24	766,95
	10-20	1,68	1,64	1679,13	1643,43

PD= Plantio direto, PC= Preparo convencional, A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

4.5 Estabilidade de agregados

Os blocos de amostras de solo com estrutura preservada foram manualmente e suavemente destorroados para se obter agregados <9,51 mm de diâmetro, que foram secos ao ar. Em duplicatas, aproximadamente 50 g de agregados foram umedecidos por capilaridade durante a noite em um filtro de papel, suavemente transferidos para um cilindro de 1000 mL, contendo 500 ml de água, e agitada durante dois minutos a 16 rotações por minuto, de acordo com o método proposto por Tisdall (1978) e adaptado por Carpenedo & Mielniczuk (1990). A suspensão foi suavemente transferida para um agitador de oscilação vertical, composto de quatro recipientes com capacidade individual de 10 L, os agregados dispostos sobre um conjunto de cinco peneiras (> 4,76, 2,00, 0,50, 0,25 e < 0,053 mm), montado dentro de cada recipiente, agitadas em água, durante 15 minutos, com 42 oscilações por minuto. O material (<0,053 mm) que restou no recipiente com água tratou-se com 50 ml de alúmen de potássio (5% m/v) para promover a sua floculação, sendo posteriormente seco a 105° C.

A distribuição dos agregados via seca foi realizada segundo (Silva, 1993), com as mesmas proporções de amostra e conjunto de peneiras anteriormente citadas, com o auxílio de um vibrador Produtest, operando durante um minuto por amostras. Os agregados em cada peneira foram transferidos para recipientes de alumínio secos a 105 °C durante 24 h e quantificados em relação a sua massa.

O diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos por via úmida (DMPu), e o obtido por via seca (DMPs) foram calculados através do somatório dos produtos entre o diâmetro médio de cada classe de agregado e a proporção do peso da amostra presente na referida classe em relação ao peso total da amostra, que é obtido através da divisão do peso de agregados retidos em cada peneira pelo peso total da amostra corrigida em termos de umidade (Equação 4), onde relação entre os valores de diâmetro médio fornece o índice de estabilidade dos agregados (IEA) (Equação 5), indica a capacidade dos agregados resistir à energia de desagregação, sendo esta maior, quando o valor estiver mais próximo da unidade (Silva & Mielniczuk, 1997).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (4)$$

onde:

w_i = proporção de cada classe em relação ao total;

x_i = diâmetro médio das classes expressa em mm.

$$IEA = \frac{DMPU}{DMPS}$$

4.6 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica

O fracionamento da matéria orgânica, pelo método granulométrico descrito por Cambardella & Elliott (1992), foi realizado nas amostras das camadas de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm. Sub-amostras com 20 gramas de agregados, foram colocadas em frascos tipo “snap-cap” com capacidade para 100 ml, adicionados 60 ml de hexametáfosfato de sódio (5 g l⁻¹) e agitadas durante 16 horas em agitador horizontal (120 oscilações por minuto) a suspensão foi passada em peneira de 0,053 mm com auxílio de jato de água. O

material retido na peneira foi transferido para recipientes e seco em estufa a 50°C, pesado, moído e analisado quanto a concentração de COT em analisador de combustão seca, Termo Scientific, modelo Flash 2000 Organic Elemental Analyzer. O C do material retido na peneira corresponde ao carbono orgânico particulado (COP). O carbono da fração não retida na peneira, constituída de material de tamanho correspondente a silte e argila, foi considerado associado aos minerais (COAM). A concentração de carbono nesta fração foi obtida pela subtração do COT e o COP.

4.7 Análise estatística

As análises estatísticas foram efetuadas utilizando o pacote estatístico SAS 9.4 (SAS, 2014). Primeiramente, os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk ($p < 0,05$). Posteriormente, procedeu-se à análise de variância (ANOVA). Quando a ANOVA foi significativa ($p < 0,05$), a diferença entre médias foi avaliada pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os seguintes modelos estatísticos foram utilizados na ANOVA:

a) Distribuição das faixas de tamanho de agregados, DMPU, DMPS, IEA, concentrações de C e N, estoque de C e N e frações granulométricas da MO no perfil do solo:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + P_j + \text{Erro } a(ij) + S_k + SP_{jk} + \text{Erro } b(ijk) + C_l + \text{Erro } c(il) + PC_{jl} + SC_{kl} + PSC_{jkl} + \text{Erro } d(ijkl)$$

em que μ = média geral dos dados; B = bloco ($i = 1,2,3$); P = sistema de preparo ($j = 1,2$); S = sistema de culturas ($k = 1,2,3$); C = camadas ($l = 1,2,3$); Erro = erro experimental.

b) Estoques de COT e NT, taxa de acúmulo anual de C e N:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + P_j + \text{Erro } a(ij) + S_k + SP_{jk} + \text{Erro } b(ijk)$$

em que μ = média geral dos dados; B = bloco ($i = 1,2,3$); P = sistema de preparo ($j = 1,2$); S = sistema de culturas ($k = 1,2,3$); Erro = erro experimental.

No apêndice 1 e 2 encontra-se o resumo da avaliação estatística dos resultados obtidos, assim como os resultados das significâncias (Tabela 6).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Acúmulo de carbono orgânico e nitrogênio do solo

5.1.1 Efeito dos sistemas de preparo do solo

A distribuição das concentrações de C e N nas diferentes camadas de solo foi influenciada pelos sistemas de preparo, de modo que, foram verificados padrões de distribuição no perfil do solo diferenciados entre os sistemas de culturas avaliados (Figura 1). De modo geral verificou-se uma tendência de decréscimo nas concentrações de C e N à medida que se aumentou a profundidade do solo, similar ao observado na maioria do solo agrícolas. As concentrações de C e N foram maiores no solo em PD do que no PC, apenas na camada superficial 0-5 cm.

O solo nos sistemas de culturas A+V/M+C e V/M em PD apresentaram aumento no conteúdo de C e N de 56 e 60% e 59 e 54%, respectivamente, na camada de 0–5 cm em relação ao solo em PC, no sistema com gramíneas (A/M) esse aumento nas concentrações de C e N foram 38 e 43%. Na camada de 5-10, as concentrações de C e N nos sistemas de culturas sob PC tiveram tendência de serem maiores em relação ao solo no sistema de PD. O solo nos sistemas de culturas, A+V/M+C e V/M, a concentração de C na camada de 10 – 20 cm, obtiveram aumento de 21% no solo sob PC em relação ao sistema de PD. As concentrações de N nas camadas subsuperficiais tiveram tendência de serem maiores no solo sob PC em relação ao PD, não diferindo estatisticamente entre os sistemas de preparo.

Verifica-se que quando o solo é revolvido, mais substratos orgânicos tornam-se disponíveis para o ataque microbiano, resultando em aumento na

decomposição da MO, e, portanto, uma redução da concentração de C e N. Uma vez que os resíduos permanecem sobre a superfície em solos sob PD e os agregados de solo são menos perturbados, ocorrendo redução da interação solo-resíduo e concentrações de C e N mais elevadas são encontradas nas camadas superficiais do solo, reduzindo as taxas de mineralização, lixiviação do N e oxidação da matéria orgânica. No 18º ano de avaliações no mesmo experimento Conceição et al. (2013) observaram que as concentrações de C foram maiores na camada superficial (0-5 cm) no sistema de culturas A+V/M+C sob PD, com conteúdo 65%, por sua vez no sistema de culturas com gramíneas (A/M) o aumento na concentração de C no solo em PD foi menor, 55%, do que verificado no PC.

Estes resultados evidenciam que existe uma interação entre os sistemas de preparo e cultura em relação as concentrações de C e N no solo. Neste sentido, quando associado a sistemas de cultura com maior adição de resíduos, o PD apresenta um maior acúmulo de C e N em comparação ao solo sob PC. Avaliando os efeitos de sistemas de preparo, sob diferentes rotações de culturas nas concentrações de C, Madari et al. (2005) e Freixo et al. (2002) concluíram que o sistema de PD com rotação de culturas aumentou significativamente o acúmulo de C em relação ao solo em PC, e que o C do solo em áreas sob cultivo de longo duração reduziu 47% nos solos em PC e 23 à 29% em solos sob PD na camada de 0-5 cm.

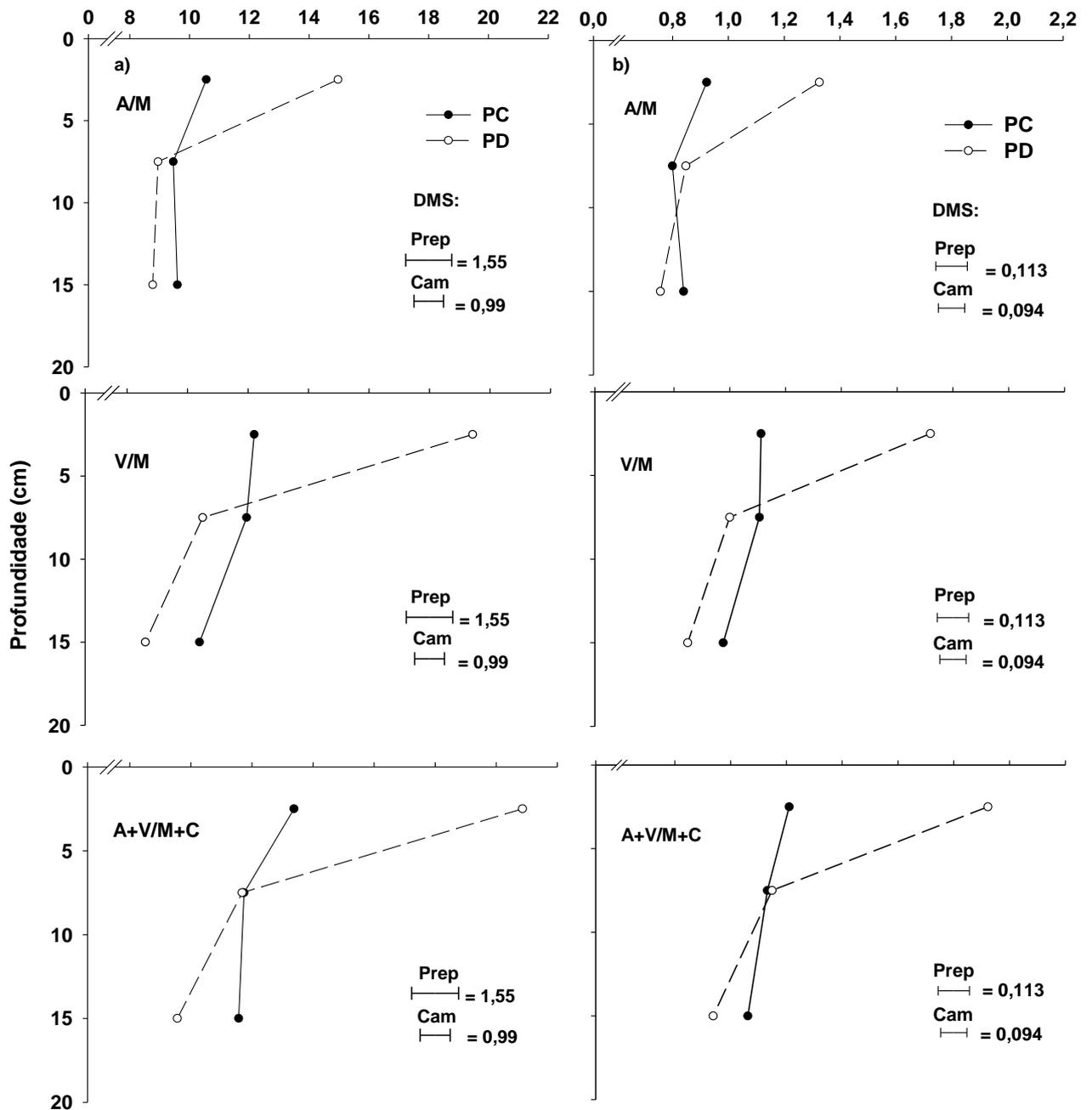


Figura 1. Concentrações: a) carbono orgânico total (COT) e b) nitrogênio total (NT) no perfil do solo em diferentes métodos de preparo (na média dos diferentes sistemas de culturas: PC= preparo convencional, PD= plantio direto), conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. A= aveia, V= ervilhaca, M= milho, C= caupi), barra na horizontal indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (Prep= método de preparo, Cult= sistema de culturas e Cam = camada de solo).

As concentrações de N no solo em PD corroboram com os resultados encontrado por Sá et al. (2001) e Dolan et al. (2006), onde o conteúdo de N foi significativamente maior em PD à longo prazo em relação ao PC na camada de 0-5 cm, e redução nas camadas subsuperficiais. Por outro lado, no solo em PC

a gradagem promove a incorporação de resíduos e a uma distribuição mais homogênea no perfil do solo na camada arável, apresentando tendência de maior concentração de N nas camadas subsuperficiais do que o solo em PD como é possível observar na Figura 1. O intenso revolvimento do solo acarreta em elevadas perdas de solo por erosão e auxilia a decomposição da MOS através da criação de condições de solo (umidade, aeração e temperatura) que são mais propícias à uma maior atividade biológicas, homogeneizando os resíduos entre a camada superficial para as subsuperficiais, onde ocorre o maior ataque de microrganismos e é uma zona onde as condições de umidade favorecem à mineralização, ocorrendo também a redução da proteção física dos agregados expondo a matéria orgânica à atividade enzimática.

5.1.2 Efeito dos sistemas de culturas

As concentrações de C e N no solo nos sistemas de culturas em ambos sistemas de preparo são apresentados na Figura 2. Estes resultados demonstram que houve aumento nas concentrações de C e N, principalmente na camada superficial nos sistemas de culturas com maior aporte de resíduos (A+V/M+C), e, esse aumento foi maior no sistema de PD.

A diversificação de culturas e inclusão de leguminosas em sistemas de culturas quando se visa a recuperação dos estoques de C e N, torna-se essencial não só pelo acúmulo de C, mas pela adição de N, via resíduos vegetais por fixação simbiótica do N₂ atmosférico. Segundo Bayer & Mielniczuk (2008), a mineralização do N dos resíduos, e o N orgânico acumulado no solo, aumentam o fornecimento deste nutriente a espécies não leguminosas que participam do sistema de rotação, o que contribui para a maior adição de C fotossintetizado ao solo.

No solo sob PD os sistemas de culturas que incluem leguminosas (A+V/M+C e V/M) não diferiram entre si em relação as concentrações de C e N. Somente houve diferença entre os sistemas com leguminosas e o sistema de cultura que apresenta gramíneas (A/M), mas esse efeito se restringiu à camada superficial do solo. As maiores concentrações de C ocorreram no sistema de culturas com leguminosas A+V/M+C e V/M no sistema de PD com 39 e 29%, respectivamente, maior que o sistema com gramíneas A/M. As concentrações

de N seguiram o mesmo comportamento com 45 e 29% para os sistemas de culturas A+V/M+C e V/M, respectivamente. No sistema de PC o aumento nas concentrações de C e N foram menos expressivos 26% e 15% para C e 31% e 20% para N. Al-Kaisi et al. (2005), avaliando os efeitos de diferentes sistemas de preparo com rotação milho e soja nas concentrações de C no solo, observaram que o sistema de PD aumentou o conteúdo CO em 41% na camada de 0-5 cm em comparação com o solo sob PC.

O aumento do aporte de resíduos pelos sistemas de culturas A+V/M+C no solo em PD se expressa mais do que no solo que se mantém altamente revolvido, devido a redução das taxas de decomposição e redução da atividade microbiana pela menor interação dos resíduos com o solo. Esses resultados indicam que a eliminação do revolvimento no solo é uma prática fundamental, quando se tem por objetivo a recuperação da matéria orgânica, através da manutenção de resíduos na superfície.

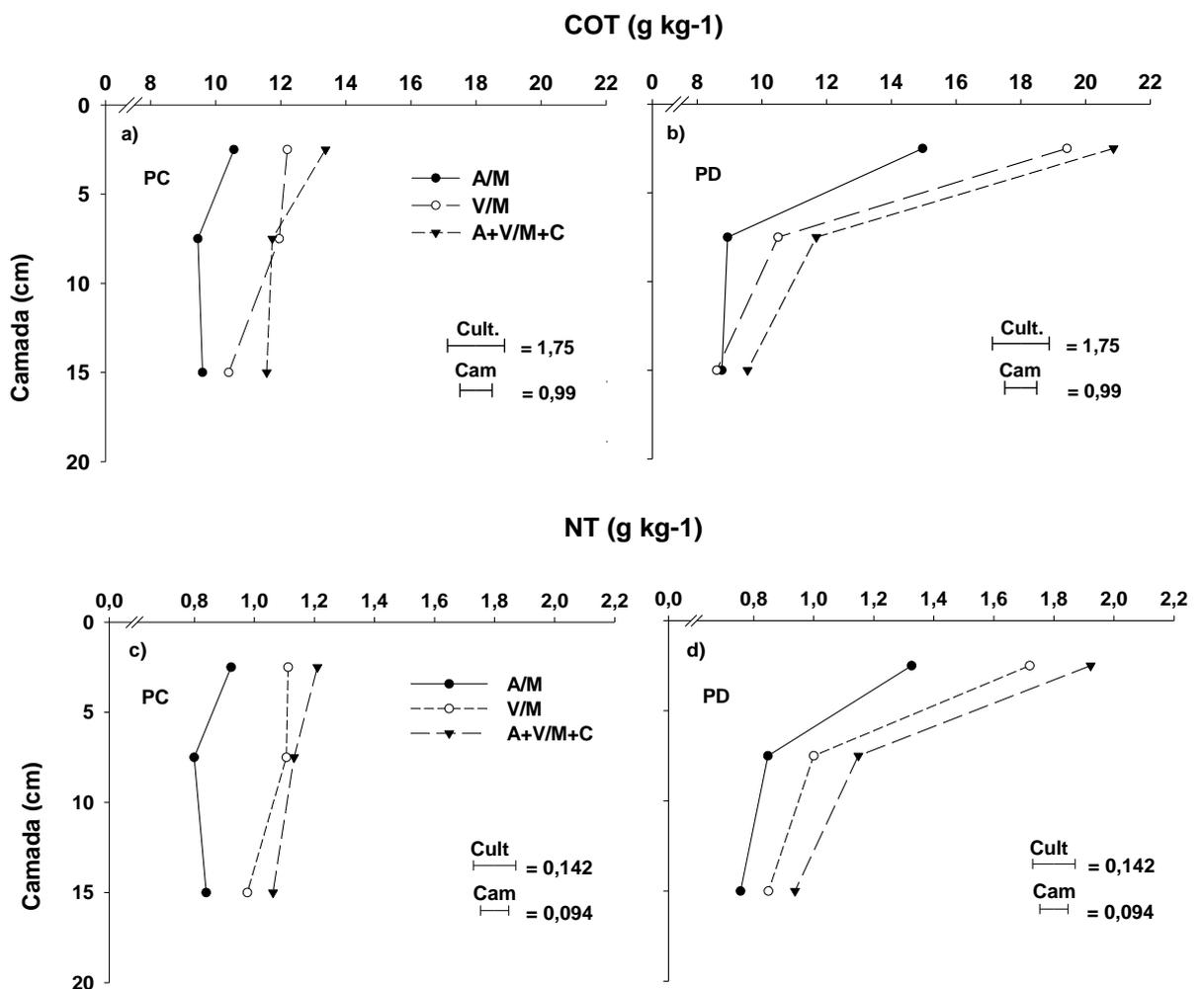


Figura 2. Efeito da utilização dos sistemas de culturas sobre o acúmulo de carbono orgânico total e nitrogênio total do solo nos métodos de preparo em 3 camadas. DMS: Diferença mínima significativa ($P < 0,05$) pelo teste de Tukey 5%. A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi. PC= Preparo convencional, PD= Plantio direto.

Estes resultados seguem o padrão natural, com maior concentração de C e N nas camadas superficiais, onde o armazenamento da matéria orgânica do solo ocorreu quando o sistema de PD foi combinado com sistema de culturas A+V/M+C, com elevado aporte de resíduos. Bayer et al. (2000b), no 9º ano do mesmo experimento observaram aumento nas concentrações de C e N no solo no sistema de culturas A+V/M+C sob PD, com 40% e 58% respectivamente, esse aumento no sistema de culturas foi menor no solo sob PC, com concentração de C e N de 8%. As maiores concentrações de C e N com a introdução de leguminosas na rotação de culturas mostra a importância da fixação biológica de N para o incremento de C e N no solo em PD (Raphael et al., 2016).

As concentrações de C e N reduziram significativamente com o aumento da profundidade do solo, e exibiu diferentes padrões de distribuição entre os sistemas de culturas dentro de cada sistema de preparo. Na camada de 5-10 cm no solo em PD o sistema de culturas com maior aporte de resíduos incluindo gramíneas e leguminosas (A+V/M+C) obteve concentração de C e N de 31% e 35%, seguido do sistema de culturas V/M com 17% e 16%, respectivamente, superiores em relação ao sistema de culturas A/M. No solo sob PC as concentrações de C e N foram de 24% e 26%, respectivamente para os sistemas de culturas A+V/M+C e V/M em relação ao sistema de culturas A/M.

Não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas de culturas no sistema de PD na camada do solo de 10-20 cm nas concentrações de C e N, sendo significativo apenas entre o sistema de cultura A+V/M+C e A/M no solo em PC. O sistema de culturas com maior aporte de resíduos (A+V/M+C) em solo sob PC obteve a concentração de C e N de 20% e 28%, respectivamente, superior em relação ao sistema de culturas contendo gramíneas (A/M) com reduzido aporte de resíduos, fato este que devido ao intenso revolvimento e exposição dos resíduos acelera a decomposição pelos microrganismos do solo. Estudando o mesmo experimento após 18 anos de implantação, Zanatta et al. (2007) observaram que no solo em sistema de PD os resíduos acima do solo foram deixados na superfície criou um gradiente entre os resíduos e o solo, reduzindo a concentração de C com a profundidade, enquanto que no PC cuja a perturbação transmitida por aração e gradagem levou

à incorporação de resíduos vegetais na camada arável, promovendo concentração mais uniforme de C à 20 cm de profundidade.

5.2 Estoque de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) do solo

5.2.1 Estoques de carbono orgânico (C)

O estoque de C foi influenciado de modo significativo pelos sistemas de preparo e sistemas de culturas nas camadas avaliadas. Entretanto, os impactos dos sistemas de preparo e culturas sob o estoque de C variaram de acordo com cada camada avaliada. Os estoques de C, as maiores variações foram observadas no solo em sistema de PD, no sistema de culturas com maior aporte de resíduos (A+V/M+C) e as maiores diferenças entre os sistemas de preparo e culturas ocorreram na camada superficial (0-5 cm). Nesta camada, o solo em PD os sistemas de culturas com plantas leguminosas (A+V/M+C) e (V/M) levaram ao aumento de 39% e 29% no estoque de C, respectivamente, enquanto que no solo em PC houve um aumento menor no estoque de C, 27% e 15 % para os sistemas, A+V/M+C e V/M, respectivamente, em relação ao sistema contendo gramíneas (A/M) Tabela 2.

Observa-se que a diversificação de plantas na rotação de culturas, beneficia o estoque de C em solos sob PD, onde o revolvimento do solo é reduzido e os resíduos das culturas permanecem na superfície do solo. Na camada de 0-5 cm, no solo em PD o estoque de C no sistema de culturas V/M o aumento foi de 59%, no sistema de culturas A+V/M+C de 56%, em relação ao PC, respectivamente, enquanto no sistema de culturas contendo somente gramíneas (A/M), houve tendência de aumento de 41% (Tabela 2). Nesse sentido, a introdução de práticas em que ocorre o intenso revolvimento do solo reduz os estoques de C na camada superficial, alocando esses resíduos para as camadas subsuperficiais, elevando o contato dos resíduos com o solo e facilitando a degradação pelos microrganismos. Com isso, as principais diferenças encontradas nos estoques de C entre os sistemas de preparo em cada sistema de culturas foram na camada de 0-5 e 10-20 cm, enquanto na camada de 5-10 observou tendência de aumento no estoque de C no solo em PC em todos os sistemas de culturas.

Na camada superficial no 9º ano nos mesmos tratamentos e camada de solo, Bayer et al. (2000b), observou uma diferença de 11,00 Mg ha⁻¹, entre os tratamentos PC A/M e PD A+V/M+C, no 13º ano Lovato et al. (2004) encontraram estoque de C no solo de 11,85 Mg ha⁻¹, no 30º ano o estoque de C no solo foi de 7,85 Mg ha⁻¹. Segundo Nicoloso (2009), o processo de saturação do C nos solos ocorre principalmente nas camadas superficiais do solo, em virtude de ser a área que concentra-se elevado aporte de resíduos, raízes e elevada atividade microbiana. No entanto, exista um limite à saturação de uma camada do solo em atingir a capacidade de armazenamento de C no solo, isto pode não indicar que o solo como um todo não seja capaz de acumular C em seu perfil (Bayer et al., 2011).

Para a camada de 10-20 cm, não houve diferença nos estoques de C no solo entre os sistemas de preparos no sistema de cultura A/M, enquanto, para os sistemas de culturas A+V/M+C e V/M o solo sob PC apresentou estoques de C superiores ao solo em PD. Com isso, a utilização de um sistema incluindo maior quantidade de espécies (A+V/M+C), com inclusão de leguminosas no inverno e no verão, levou ao aumento de 21% no estoque de C no solo sob PC, o mesmo ocorreu no sistema de culturas V/M com aumento de 20% em relação ao solo em PD.

Além dos efeitos benéficos da inclusão da cultura leguminosa na rotação para a produtividade das culturas, parece haver um efeito benéfico sobre a acumulação de C no solo quando associado ao PD. Sisti et al. (2004), estudando o efeito de três rotações de culturas diferentes, (R1 (trigo e soja), R2 (trigo/soja/ervilhaca e milho), R3 (trigo/soja/aveia e ervilhaca/milho/soja), sob plantio direto e preparo convencional em um experimento de longa duração (13 anos), observaram resultados semelhantes na camada superficial (0-5 cm), com aumento significativo do estoque de CO sob PD em ambas rotações de culturas em relação ao PC. Nas camadas subsuperficiais ocorreu aumento do estoque de CO, na rotação R2 e R3 em ambos sistemas de preparo. Esses resultados refletem o fato de que o revolvimento do solo com arado de disco uma vez por ano acarreta na incorporação dos resíduos da superfície para as camadas mais profundas aumentando o estoque de carbono no sistema em PC em relação ao PD.

Tabela 2. Estoque de carbono orgânico total (C) e nitrogênio total (N) em um Argissolo sob diferentes sistemas de manejo.

Sist. Cult.	Camada (cm)	Preparo do solo			
		PC	PD	PC	PD
		C (Mg ha ⁻¹)		N (Mg ha ⁻¹)	
A/M	0-5	7,85	11,12	0,68	0,98
	5-10	7,88	7,45	0,66	0,71
	10-20	16,62	15,18	1,45	1,31
	0-20	32,35	33,75	2,79	3,00
V/M	0-5	9,06	14,43	0,82	1,27
	5-10	9,97	8,73	0,92	0,83
	10-20	18,01	14,91	1,69	1,47
	0-20	37,04	38,07	3,43	3,57
A+V/M+C	0-5	9,94	15,50	0,84	1,42
	5-10	9,79	9,74	0,94	0,96
	10-20	20,04	16,56	1,72	1,62
	0-20	39,77	41,80	3,50	4,00
DMS (TUKEY 5%)					
Preparo		1,51		0,09	
Cultura		1,84		-	
Camada		1,84		0,11	

PD= Plantio direto, PC= Preparo convencional, A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

Os estoques de C na profundidade de 0-20 cm foram significativamente influenciados pelos sistemas de culturas. O sistema de cultura A+V/M+C contribuiu para a maior taxa de acumulo de CO no perfil do solo, com 40,79 Mg ha⁻¹, seguido do V/M 37,58 e do A/M com 33,06 Mg ha⁻¹ (Figura 3). Os sistemas de culturas com leguminosas A+V/M+C e V/M obtiveram aumento de 7,73 Mg ha⁻¹ e 4,52 Mg ha⁻¹, contribuindo com 23% e 13% a mais do que o sistema A/M. Estes resultados reforçam a significativa contribuição das culturas de cobertura de leguminosas para aumentar estoques de C em solos subtropicais sob sistema de PD (Burle et al., 1997; Bayer et al., 2000b).

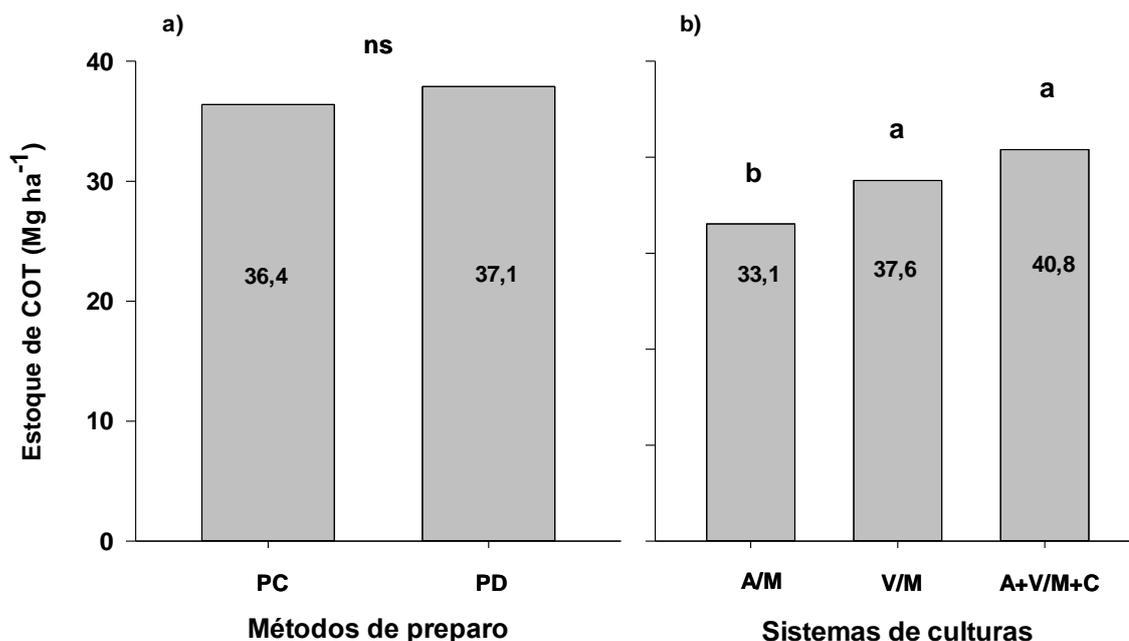


Figura 3. Estoque de carbono orgânico total (COT) do solo na camada de 0-20 cm nos dois sistemas de preparo (na média dos três sistemas de culturas: PC= preparo convencional, PD= plantio direto) (a) e nos três sistemas de culturas (na média dos dois métodos de preparo: A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi) (b), conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (ns = efeito não significativo).

No 18º ano do mesmo experimento Zanatta et al. (2007), observou resultados semelhantes, onde os estoques de C foram significativamente influenciado pelos sistemas de culturas na profundidade de 0-20 cm, e o maior estoque de C ocorreu no sistema de culturas A+V/M+C, com estoques intermediários para o V/M e o menor para o sistema de cultivo A/M. Em comparação com o sistema de cultura A/M, os sistemas de culturas com leguminosas no sistema de culturas tiveram maiores estoques de C na camada de 0-20 cm, 5,3 Mg ha⁻¹ para o A+V/M+C e 3,1 Mg ha⁻¹ para o V/M.

Esses resultados indicam que, em rotações de culturas, tão importante quanto a quantidade de biomassa depositada, é o equilíbrio da quantidade de N e da disponibilidade do mesmo, que deve ser tal que, permita o bom desempenho das culturas e ainda resulte em N excedente para acumular carbono no solo. Parece existir a necessidade de uma sincronia entre os tipos de resíduos que chegam ao solo, de forma a proporcionar liberação dos nutrientes para as plantas, mas sem afetar os fatores envolvidos na dinâmica da interação carbono orgânico/partículas minerais, (microrganismos, partículas de

matéria orgânica etc.) importante para o processo de acumulação de C no solo (Six et al., 2002b).

5.2.2 Estoques de nitrogênio total (NT)

Os estoques de N do solo, em geral, alteraram pouco entre os sistemas de preparo (Tabela 2). Para as camadas de 0-5 e 5-10 cm os estoques de N foram maiores em todos os sistemas de culturas no solo em PD. No entanto, devido ao revolvimento do solo e a permanência dos resíduos na superfície do solo, os estoques de N na camada de 10-20 cm foram superiores no solo sob PC em relação ao solo em PD. Os resultados mais expressivos entre os sistemas de preparo foram observados na camada de 0-5 cm onde houve diferença significativa, com valores de 1,23 Mg ha⁻¹ no solo em PD e 0,78 Mg ha⁻¹ sob PC, contribuindo com um aumento de 56% no estoque de N, no solo em PD. Estes resultados concordam com os encontrados por Bayer & Mielniczuk (1997), Corazza et al. (1999) e Zotarelli et al. (2005) que atribuíram o maior estoque de C e N na camada superficial em PD devido à localização dos resíduos vegetais. Entretanto, segundo Bayer et al. (2000a), a longo prazo, o acúmulo de matéria orgânica não se restringe somente a camada superficial, mas também em maiores profundidades no solo o que pode ser constatado no presente trabalho na camada de 5-10 cm.

Na camada de 10-20 cm, no solo sob PC houve aumento no estoque de N em relação ao solo em PD. O sistema de PC apresentou estoque de N de 1,62 Mg ha⁻¹ e no sistema de PD o estoque de N foi de 1,40 Mg ha⁻¹, o que representa um estoque de 15% a mais de N no solo sob PC em relação ao PD. Em PC, o revolvimento do solo desorganiza a sua estrutura, aumenta a disponibilização dos resíduos à ação dos microrganismos e deixa a superfície do solo descoberta aumentando a incidência direta dos raios solares. Todos esses fatores contribuem para maiores taxas de perda de N (Mielniczuk et al., 2003; Salton et al., 2008).

Observa-se que o revolvimento do solo para o cultivo das culturas contribuiu para intensificar os processos de perda da matéria orgânica (mineralização, erosão), fato esse demonstrado quando se compara a redução dos estoques de C e N em uma área em sistemas conservacionistas com outra

área em preparo convencional. Jantalia et al. (2003), observaram que com a introdução de sistemas de culturas com maior diversidade de espécies e elevado aporte de resíduos promoveram estoques de N significativamente maiores em PD, enquanto em PC estes efeitos foram nulos.

A maior parte do estoque do N total na profundidade de 0-20 cm, foi influenciado pelos sistemas de culturas com leguminosas (Figura 4). Semelhante ao que ocorreu na dinâmica de acúmulo de C no solo, o estoque de N no solo é determinado pela relação entre a taxa de adição de N ao solo e as taxas de perda. Dessa forma, o aumento nos estoques de N no sistema em leguminosas são devidos a maior entrada de N realizado por estas culturas (Teixeira et al., 1994). Em nossos resultados, nos sistemas com maior adição de resíduos de culturas (A+V/M+C) o estoque de N foi de 3,84 Mg ha⁻¹, V/M com 3,51 Mg ha⁻¹ e no sistema contendo gramíneas (A/M) o estoque de N foi de 2,90 Mg ha⁻¹. O sistema de culturas A+V/M+C contribuiu com 32% a mais no estoque de N em relação ao sistema A/M. Lovato et al., (2004) observaram relação positiva entre o N adicionado ao solo pelos sistemas de culturas e a variação nos estoques de N, notando que 50% do N adicionado foi retido como N total. Maiores estoques de NT em sistemas de culturas com leguminosas também foram observados por Sisti et al. (2004); Zotarelli et al. (2007); Weber & Mielniczuk (2009).

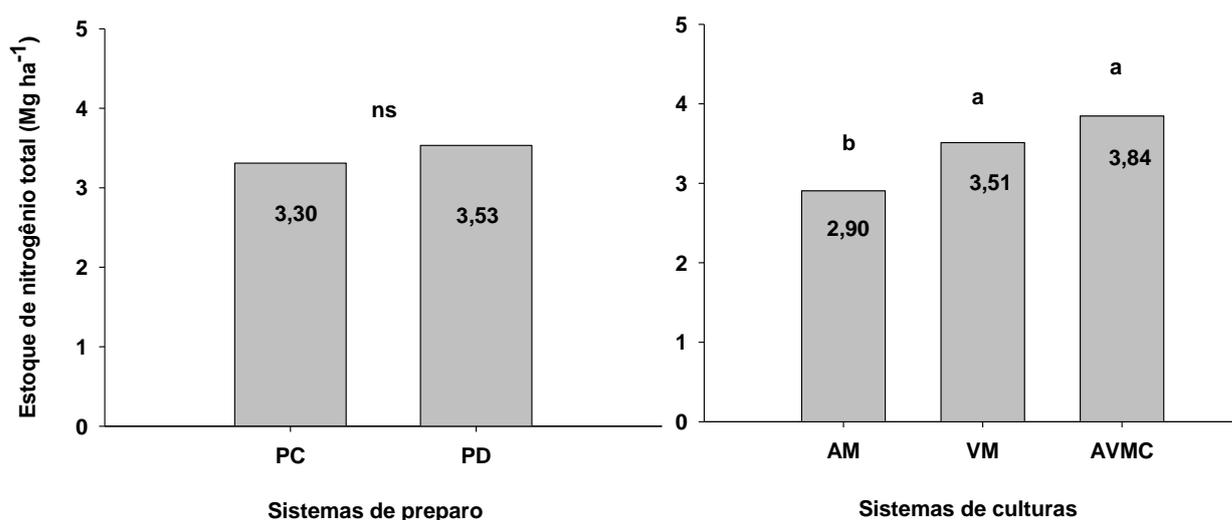


Figura 4. Estoque de nitrogênio total (NT) do solo na camada de 0-20 cm nos dois sistemas de preparo (na média dos três sistemas de culturas: PC= preparo convencional, PD= plantio direto) (a) e nos três sistemas de culturas (na média dos dois métodos de preparo: A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi) (b), conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropico brasileiro por 30 anos. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (ns = efeito não significativo).

Weber & Mielniczuk (2009), com o objetivo de avaliar o efeito do uso de diferentes sistemas de culturas de gramíneas e leguminosas sobre a disponibilidade e estoque de N no solo, em um experimento realizado por 22 anos, observaram que houve acúmulo de N total nos sistemas com leguminosas em relação ao início do experimento, resultado da adição de N por esses sistemas via fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizada pelas leguminosas.

5.2.3 Taxas anuais de acúmulo de carbono orgânico (C) e nitrogênio total (N)

O aumento do estoque de COT e NT no sistema A+V/M+C se refletiu nas maiores taxas de acúmulo desse elemento sob esse manejo, com destaque para as áreas em PD: cerca de 0,32 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e 40,3 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ a mais do que o sistema A/M PC, que foi o que menos acumulou C e N (Figura 5). A maior diferença entre os sistemas de preparo para o acúmulo de COT e NT ocorreu justamente no sistema A+V/M+C, onde o PD aumentou em 0,07 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e 11,3 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ as taxas de acúmulo, quando comparado ao PC (Figura 5).

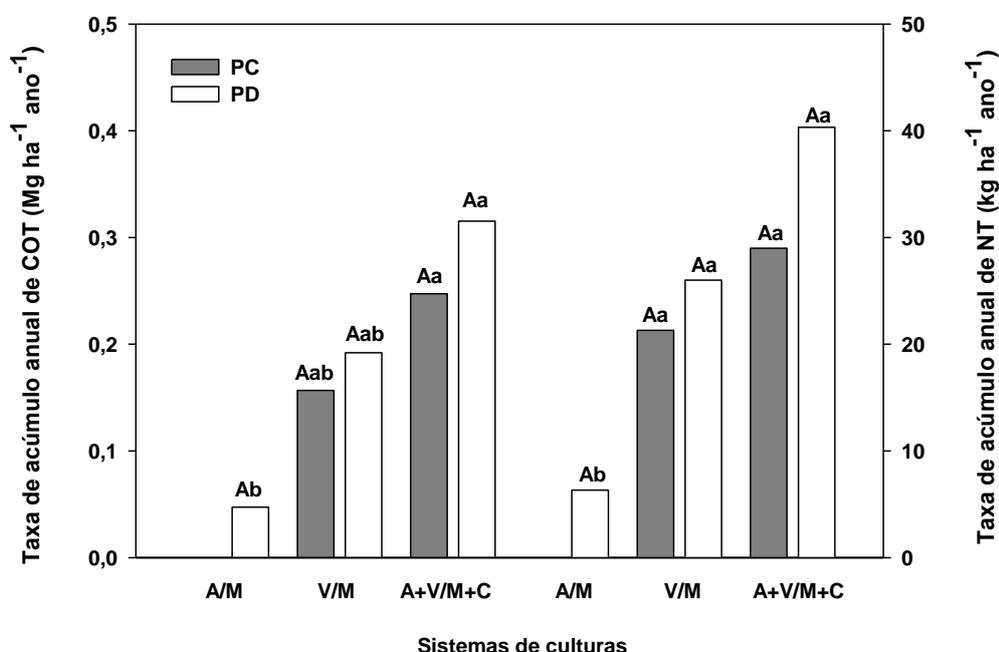


Figura 5. Taxas anuais de acúmulo de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na camada de 0-20 cm em diferentes métodos de preparo e sistemas de culturas, conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. O sistema PC A/M foi tomado como referência. PC= preparo convencional, PD= plantio direto, A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (ns = efeito não significativo).

As maiores concentrações (Figura 3), estoques (Figura 4 e Tabela 1) e acúmulo de C e N no solo (Figura 5) com a introdução de leguminosas nos sistemas de culturas, especialmente no PD, mostra a importância da fixação biológica de N (Dolan et al., 2006; Raphael et al., 2016). As leguminosas em sistemas similares aos avaliados podem aportar cerca de 130 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ a mais do que sistemas apenas com gramíneas, o que contribui para o maior aporte de resíduos e favorece o acúmulo de C no solo (Zanatta et al., 2007; Kramberger et al., 2009; Hubbard et al., 2013). Muñoz-Romero et al. (2013) relataram acúmulo de 93 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ depositado a partir de raízes de trigo, ou aproximadamente 40% do teor total de N assimilado por plantas de trigo, incluindo grãos.

Esses resultados levam em consideração as taxas de decomposição dos resíduos vegetais que são controlados pelas características qualitativas do material vegetal, como a relação C:N e o teor de lignina, além do manejo do resíduo e do tamanho dos fragmentos (Bortoluzzi & Eltz, 2000). Amado et al. (2000), avaliando as taxas de decomposição e liberação de N dos resíduos de três coberturas de solo, aveia, aveia+ervilhaca e ervilhaca, verificaram que a decomposição variou de acordo com a relação C:N dos materiais (48, 23 e 14, respectivamente), ou seja, foi mais rápida para os resíduos de menor relação C:N. Além da quantidade de biomassa, estudos recentes têm verificado maior eficiência no acúmulo de C e N no solo quando da adição de material orgânico de alta qualidade (Cotrufo et al., 2013).

5.2.4 Distribuição de tamanho de agregados

Os resultados referentes à distribuição percentual de agregados em todas as camadas, para cada sistema de preparo e culturas, podem ser observados na Tabela 3. Verificou-se que em todos os sistemas de preparo e culturas nas camadas avaliadas, proporcionaram elevados percentuais de microagregados, principalmente na classe de diâmetro entre 0,50-0,250 mm, sendo esses resultados mais evidentes no sistema de PC nos sistemas de culturas, A/M, V/M e A+V/M+C, respectivamente.

As diferenças mais evidentes da relação entre os sistemas de preparo, culturas e camadas, foram observadas nas classes de agregados entre $\geq 4,76$ -

2,00. A fração de agregados $\geq 4,76$ mm foi maior no sistema de PD no sistema de culturas A+V/M+C, seguido por V/M e A/M, e menor para o PC sob sistema de culturas A/M. Na camada de 0-5 cm, houve diferença significativa entre os sistemas de preparos, culturas e camadas na fração $\geq 4,76$ mm. No solo sob sistema de PD A+V/M+C a porcentagem de agregados foram mais evidentes em relação ao solo em PC com 20,36% e 7,74%, no sistemas de culturas V/M 16,53% e 5,52% e A/M, 14,56% e 2,38%, diferindo estatisticamente entre os sistemas de preparo dentro do mesmo sistema de culturas.

Na teoria de hierarquia de agregados, tal como definida por Tisdall & Oades (1982) em que os agregados se formam em torno das partículas de MOS, e que a estabilidade dos agregados aumenta à medida que diminui o tamanho dos agregados, devido a quantidade, qualidade da MO e efeito dos agentes ligantes, beneficiando a agregação no solo em PD especialmente, favorecendo agregados maiores nas camadas superficiais, como foi observado por Carpenedo & Mielniczuk (1990), Campos et al. (1995), e Mrabet et al. (2001).

Tabela 3. Distribuição da massa do solo (%), quanto ao diâmetro dos agregados estáveis em água, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, sistemas de culturas e preparos do solo.

Sist.Cult	Prep.	Camada (cm)	Classes de agregados					
			≥4,76	4,76–2,00	2,00–0,50	0,50–0,250	0,250–0,053	<0,053
A/M	PD	0-5	14,76	14,38	11,81	33,31	18,08	7,66
		5-10	17,41	15,88	13,11	33,04	14,21	6,35
		10-20	22,33	14,71	12,63	30,39	13,61	6,32
	PC	0-5	2,58	9,90	12,75	39,90	21,75	13,72
		5-10	7,80	13,41	13,04	35,86	20,80	9,08
		10-20	8,95	14,39	10,23	39,98	17,35	9,10
V/M	PD	0-5	16,43	14,28	10,60	32,93	16,52	9,23
		5-10	16,72	15,80	13,22	33,04	14,47	6,74
		10-20	12,37	14,13	16,12	36,76	14,44	6,18
	PC	0-5	5,52	9,46	13,36	39,14	17,14	15,37
		5-10	7,40	12,56	14,66	39,84	16,18	9,36
		10-20	10,24	14,33	13,94	36,81	17,00	7,67
A+V/M+C	PD	0-5	20,36	16,92	13,94	28,55	12,55	7,85
		5-10	19,01	20,83	13,04	27,82	13,40	5,90
		10-20	18,82	16,78	13,11	29,11	16,34	5,83
	PC	0-5	7,74	10,86	14,84	39,07	18,73	8,77
		5-10	10,08	12,27	14,81	39,28	15,06	9,51
		10-20	7,97	15,47	15,06	35,05	16,77	9,67
DMS TUKEY 5%								
Preparo			3,98	1,98			-	
Cultura			4,83	-			2,81	
Camada			4,83	2,41			2,81	

PD= Plantio direto, PC= Preparo convencional, A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

Fato comprovado por (Six et al., 2000), que observaram que o aumento em macroagregados quando os resíduos das culturas permanecem no solo pode ser explicado pela ligação da matéria orgânica particulada (MOP) em microagregados, reduzindo assim os microagregados livres e aumentando os macroagregados. Além disso, os resíduos das culturas afetam a composição e a diversidade microbiana, podendo levar a um aumento da atividade de agregação, por substâncias orgânicas proveniente da ação microbiana (Beare et al., 1997).

Nesse sentido, mais importante que a quantidade é a qualidade do resíduo. Estudos (Tisdall & Oades, 1982), tem demonstrado que, geralmente, materiais contendo relativamente grande quantidade de constituintes de fácil decomposição exercem um grande e rápido efeito agregante, ao passo que materiais relativamente mais resistentes requerem um tempo longo para exercer sua influência sobre a agregação e, aquelas substâncias extremamente resistentes ou inertes, tem pequena ou nenhuma influência sobre os agregados (Silva, 1993)

Na Figura 7 observa-se que nos solos em PD nas medias dos sistemas de culturas ocorreram maiores quantidade de macroagregados ($\geq 4,76-2,00$ mm) em relação ao solo em PC. Esses resultados se devem provavelmente, aos maiores teores de matéria orgânica e à maior distribuição de raízes nas camadas superficiais, as quais contribuem para maior estruturação do solo, principalmente nos sistemas de culturas com maior aporte de resíduos (A+V/M+C), onde a ação das raízes destas culturas produzem agregados estáveis ao suprirem resíduos orgânicos para a decomposição, promovendo alta proliferação microbiana na rizosfera (Oades, 1984), cujo efeito está diretamente relacionado as diversas fontes de polissacarídeos, enquanto, em profundidade, os teores de argila e óxidos de ferro não predominantes no processo de agregação do solo (Silva & Mielniczuk, 1997).

Fuentes et al. (2012), estudando o efeito de diferentes sistemas de manejo (Plantio direto (PD), preparo convencional (PC), rotações de culturas (monocultura de trigo, monocultura de milho e rotação de milho-trigo e diferentes manejos dos resíduos das culturas (com e sem resíduos no solo), observaram que a maior proporção de macroagregados se concentraram na camada de 0-5 cm, e que as parcelas com rotação de culturas, monocultura de milho e de trigo

com resíduos das culturas permanecendo no solo em PD proporcionaram aumento de 40% nos macroagregados em relação ao solo sob PC, enquanto que os microagregados aumentaram 27% no solo sob PC em relação ao solo em PD. A maior macroagregação no solo em PD em oposição ao PC relatado nestes estudos é consistente com os resultados de outros pesquisadores (Six et al., 2000; Peixoto et al., 2006).

Os agregados foram distribuídos principalmente nas classes de menor diâmetro nos tratamentos com menor aporte de resíduo e mais intensamente perturbada mecanicamente pelo PC. Conseqüentemente, estes tratamentos são mais propensos a perdas de solo por erosão. O revolvimento o solo através das práticas de PC, expõe e acelera a decomposição da matéria orgânica, (Zotarelli et al., 2007) e desestabiliza as ligações entre os agregados do solo o que leva a perdas substanciais de macro e macroagregados (Oades, 1984), enquanto o solo em PD preserva a estrutura do solo. (Six et al., 1999) desenvolveram um modelo conceitual do 'turnover' nos agregados, que mostra que o intenso revolvimento no solo em PC ocasiona degradação mais rápida dos macroagregados do que no solo em PD e resulta em menos macroagregados e mais microagregados livres estando presente no solo sob PC do que em PD. Nossos resultados apoiam esse modelo, uma vez que existem mais macroagregados no solo em PD do que sob PC e mais microagregados em PC do que no solo em PD (Figura 7).

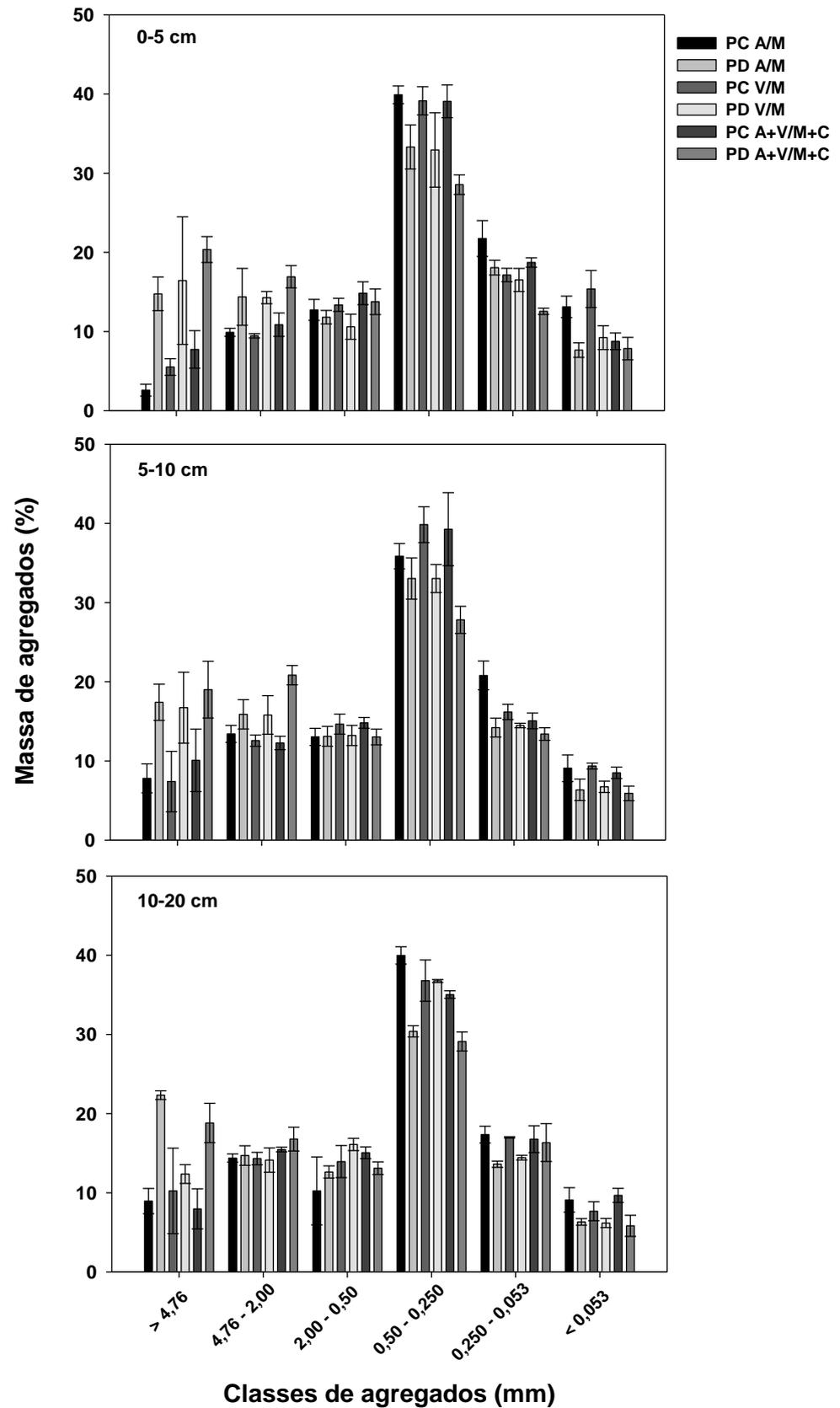


Figura 6. Distribuição de agregados de solo estáveis em água, por classe de diâmetro de agregados, nos sistemas de culturas, preparo e camadas do solo. As barras verticais indicam o erro padrão. A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi. PC= Preparo convencional, PD= Plantio direto.

5.2.5 Estabilidade de agregados no solo

As informações relacionadas à distribuição dos agregados do solo podem ser sintetizadas por meio do cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP), que permite comparar diversos sistemas de manejo quanto à organização da estrutura do solo. Para o solo estudado, submetido a diferentes sistemas de preparo e culturas, é apresentado na Figura 8, o DMP dos agregados por peneiragem via seca e via úmida, onde se observa que as maiores variações ocorrem sob via úmida. Além da distribuição do DMP dos agregados, é apresentada também, a relação entre DMP dos agregados obtidos a úmido/DMP dos agregados obtidos a seco (relação DMP_u/DMP_s), a qual representa um índice de estabilidade de agregados (IEA) que retrata a capacidade dos agregados resistirem à energia desagregante sem fragmentarem-se em agregados menores (Figura 8).

Observa-se que os valores do DMPs dos agregados são bastante próximos para os sistemas de preparo e culturas nas camadas do solo, ocorrendo diferença significativa para a interação preparo, culturas e camadas do solo. As diferenças significativas mais evidentes ocorreram em relação aos sistemas de culturas dentro do mesmo sistema de preparo nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. No entanto, na camada de 10-20 cm os valores foram maiores e as diferenças foram mais evidentes entre sistemas de preparo para o mesmo sistema de culturas e nos sistemas de culturas dentro do mesmo sistema de preparo. Esses resultados demonstram que esse índice não foi um bom indicador da qualidade estrutural do solo.

A elevada estabilidade de agregados a seco nas camadas do solo em PC, similar ao solo em PD, segundo Silva & Mielniczuk (1998), ocorre devido ao método empregado, que não distingue os agregados recentemente formados daqueles que, além de formados, já sofreram um processo de estabilização. Dessa forma, nos tratamentos submetidos a intenso revolvimento do solo, a agregação pode ter ocorrido por ação de compressão das partículas do solo, sem, entretanto, ocorrerem os mecanismos que contribuem para a estabilização desses agregados do solo e, conseqüentemente, das unidades estruturais.

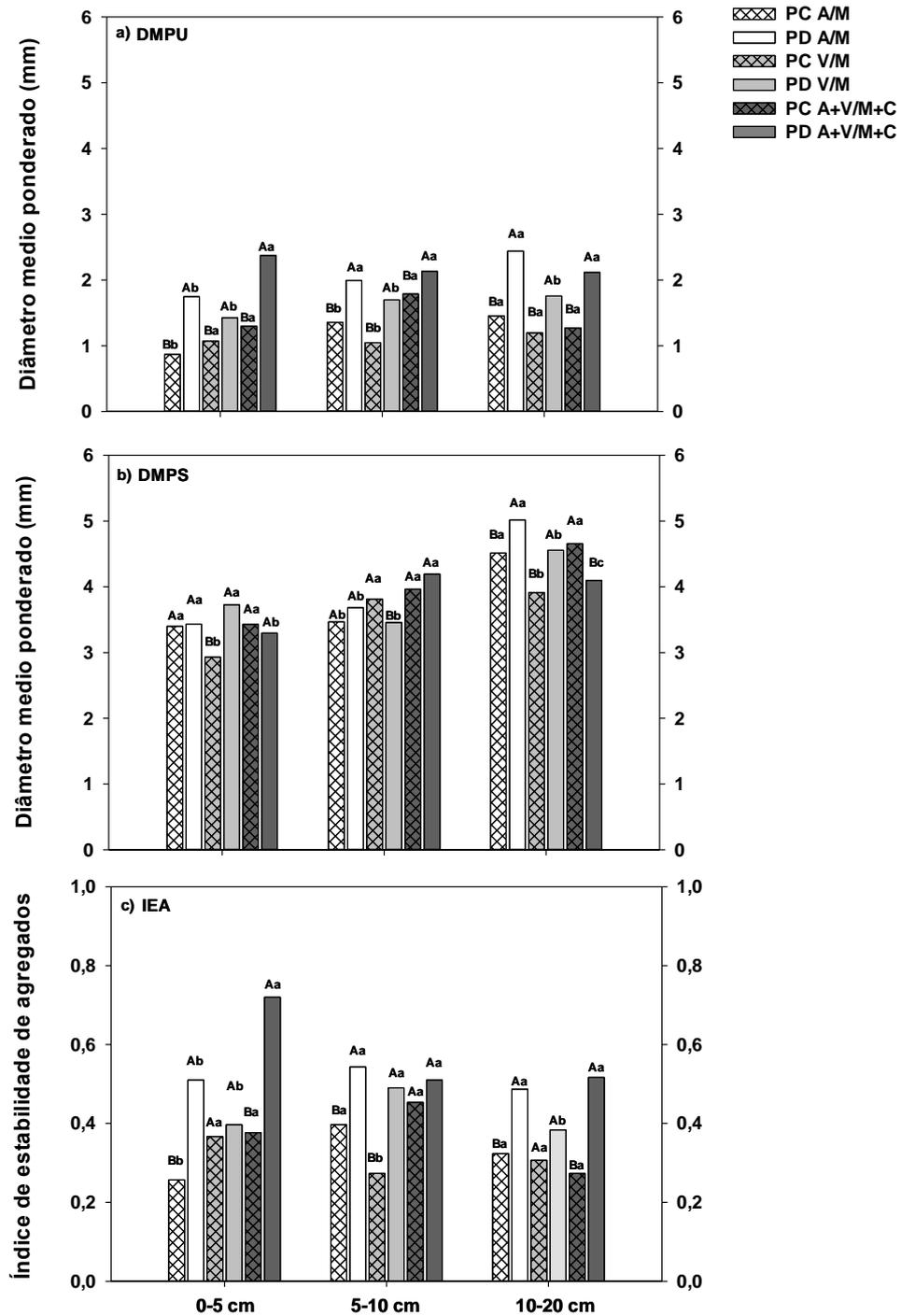


Figura 7. Diâmetro médio ponderado úmido (DMPU) (a) e seco (DMPS) (b) dos agregados de solo e índice de estabilidade de agregados (IEA) (c) no perfil do solo, em diferentes métodos de preparo e sistemas de culturas, conduzidos sobre um Argissolo Vermelho no subtropical brasileiro por 30 anos. Letras minúsculas comparam sistemas de culturas dentro de cada método de preparo; letras maiúsculas comparam métodos de preparo dentro de cada sistema de cultura; e médias com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. PC= preparo convencional, PD= plantio direto, A= aveia, V= ervilhaca, M= milho e C= caupi.

Esses resultados no DMPs não se confirmaram no DMPu, em que o solo no sistema de PD, e todos os sistemas de culturas foram superiores ao sistema de PC. Esses resultados evidenciam a contribuição dos sistemas de culturas com maior adição de resíduos no solo sob PD em aumentar o tamanho médios dos agregados estáveis, variando na camada de 0-5 cm, de 1,42, 1,75 e 2,37 mm, respectivamente para os sistemas de culturas V/M, A/M e A+V/M+C. OS menores valores foram observados no PC com 0,87, 1,07 e 1,30 mm, para os sistemas de culturas A/M, V/M e A+V/M+C. Em geral observa-se uma elevada contribuição do sistema com maior rotação de culturas (A+V/M+C), no DMPu sob o sistema de PD foi 82% maior que o PC. O efeito do sistema de culturas com gramíneas e leguminosas no verão e inverno na agregação do solo é atribuído a quantidade de resíduos que permanece no solo e a atividade radicular das culturas. A ação mecânica decorrente do crescimento e funcionamento das raízes, microrganismos e agentes de agregação, possuem efeitos combinados da composição bioquímica e quantidade de resíduos vegetais devolvidos aos solos e substâncias químicas liberadas a partir de plantas que afetam a taxa de estabilidade e de agregação (Bronick & Lal, 2005).

Com o objetivo de avaliar os mecanismos de proteção do carbono em diferentes reservatórios de MOS em agregados do solo e identificar a associação de Ca^{+2} com o carbono orgânico total (COT), sob a influência da calagem superficial em um Latossolo de textura média em experimento de longa duração sob sistema de plantio direto (PD), Briedis et al. (2012), observaram que o aumento do DMP pode ter ocorrido devido aos benefícios dos atributos de fertilidade do solo fornecidos pela calagem, resultando em uma maior produção de biomassa e de entrada de CO no sistema.

Nas camadas subsuperficiais os valores mais expressivos ocorreram na camada de 10-20 cm onde o sistema de PD superou o solo em PC apresentando maior estabilidade de agregados em todos os sistemas de culturas avaliados. Os valores aumentaram nos sistemas de culturas A/M e V/M em relação a camada superficial, no sistema com A+V/M+C esse valor decresceu, 2,43, 1,75 e 2,12 mm, em PC os valores se comportaram da mesma maneira, 1,45, 1,19 e 1,27 mm, respectivamente para os sistemas de culturas A/M, V/M e A+V/M+C, no DMPu. Conceição et al. (2013), observou que o DMPu no sistema de culturas A+V/M+C decresceu em profundidade em relação ao A/M. Este fato ocorre

principalmente, pelo preparo do solo, onde no PC a formação dos agregados ocorre por forças de compressão pelo revolvimento do solo, o que não ocorre no PD, onde as maiores estabilidade de agregados encontram-se na camada superficial devido aos sistemas de culturas com maior aporte de resíduos (Madari et al., 2005).

A constatação acima referida, também pode ser observada no índice de estabilidade de agregados (IEA), uma vez que quanto maior o valor (próximo a 1), maior é a estabilidade dos agregados em água. Assim, o IEA foi maior na camada superficial nos três sistemas de culturas no solo em PD, em relação ao PC Figura 9. No sistema PD, esse índice se manteve praticamente estável em profundidade nos sistemas de culturas e preparo, ocorrendo decréscimo somente no sistema A+V/M+C. Para a camada de 0-5 cm, o IEA foi superior, 0,72 no sistema de culturas A+V/M+C no solo em PD, no PC o valor foi de 0,39. A elevada entrada de resíduos e redução do revolvimento do solo (Fultz et al., 2013), auxiliam na formação de agregados maiores e estáveis à ação da água e uma maior estabilidade dos agregados em sistemas conservacionistas. O sistema de PD, ao acumular material vegetal na superfície aumenta a coesão dos agregados e apresenta maior concentração de carbono orgânico nessa camada em relação às demais e, também, em relação ao PC, contribuído para a maior estabilização de agregados do solo (Chenu et al., 2000).

A redução na estabilidade de agregados no PC é provavelmente um resultado da perturbação física com o cultivo repetido (Franzluebbbers & Arshad, 1996; Bronson et al., 2004; Grandy & Robertson, 2006), e redução do aporte de resíduos orgânicos em relação ao PD (Kong et al., 2005; Briar et al., 2011). Assim, além das forças disruptivas da ação mecânica, o solo revolvido fica exposto à desagregação pelo impacto das gotas da chuva que, somado à mineralização da matéria orgânica, diminui a estabilidade dos agregados (Marcolan & Anghinoni, 2006).

5.3 Fracionamento físico granulométrico da MOS

5.3.1 Carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM)

Na camada de 0-5 cm no solo em PD o sistema de culturas com maior aporte de resíduos (A+V/M+C) apresentou quantidades consideravelmente superiores de carbono orgânico particulado (COP >53 μm) em relação ao solo em PC. No entanto, nas camadas subsuperficiais 5-10 e 10-20 cm o sistema de PC apresentou tendência de aumento no estoque de COP em relação ao solo em PD, em todos os sistemas de culturas (Tabela 4). Esse comportamento sugere que, o solo em PD os resíduos favorecem mais o estoque em camadas superficial, enquanto em PC, por serem incorporados os resíduos, favorecem o estoque em camadas mais profundas, corroborando com os dados de maior acumulação de C no solo em PC na camada de 10-20 cm.

Entre os sistemas de culturas, houve aumento de 2,07 e 1,90 Mg ha^{-1} no estoque de COP pela utilização de sistemas com leguminosas, A+V/M+C e V/M, respectivamente, em relação ao sistema de cultura A/M para o solo em PD na camada de 0-5 cm, não ocorrendo efeito nas camadas subsuperficiais. Em PC houve um aumento menor para os mesmos sistemas de culturas, 0,83 e 0,34 Mg ha^{-1} . O carbono orgânico associado aos minerais (COAM) mostrou-se menos afetado pelos diferentes sistemas de preparo do solo e entre camadas dentro de cada sistema de cultura, do que observado no COP (Tabela 4). Isto se explica pelo fato do COAM ser uma fração mais protegida por interações químicas, como os argilominerais do solo e, conseqüentemente, mais estável. Já entre sistemas de culturas houve aumento de 2,31 e 1,41 Mg ha^{-1} no estoque de COAM entre os sistemas de culturas A+V/M+C e V/M, respectivamente, em relação ao sistema com A/M no solo em PD. No solo sob PC, o aumento foi menor, 1,27 e 0,88 Mg ha^{-1} . As diferenças entre os sistemas de preparo nos sistemas de culturas foram 41, 36 e 34%, respectivamente, para A+V/M+C, V/M e A/M. Para os mesmos sistemas de culturas as diferenças entre os sistemas de preparo para COP foram 138, 236 e 125%. Esses resultados mostram que a fração particulada (COP) é a fração mais afetada pela deposição de resíduos de culturas na superfície do solo e as interferências dos sistemas de preparo.

Tabela 4. Estoques de carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM) nas três camadas de um Argissolo Vermelho subtropical sob diferentes sistemas de manejo.

Sist. Cult.	Camada (cm)	Preparo do solo			
		PC	PD	PC	PD
		COP (Mg ha ⁻¹)		COAM (Mg ha ⁻¹)	
A/M	0-5	0,68	1,53	7,16	9,60
	5-10	0,40	0,51	7,49	7,05
	10-20	1,00	0,70	15,62	14,48
	0-20	2,08	2,74	30,27	31,13
V/M	0-5	1,02	3,43	8,04	11,01
	5-10	0,91	0,89	9,06	7,87
	10-20	1,30	0,40	16,71	14,51
	0-20	3,23	4,72	33,81	33,39
A+V/M+C	0-5	1,51	3,60	8,43	11,91
	5-10	0,81	0,75	8,98	8,99
	10-20	0,80	0,67	19,23	15,89
	0-20	3,02	5,02	36,64	36,79
DMS (TUKEY 5%)					
	Preparo	1,51		0,09	
	Cultura	1,84		-	
	Camada	1,84		0,11	

PD= Plantio direto, PC= Preparo convencional, A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

Os estoques de COP na profundidade de 0-20 cm foram significativamente influenciados pelos sistemas de preparo e culturas, não sendo significativa a interação entre preparo e culturas, enquanto, o COAM foi significativamente influenciado pelos sistemas de culturas, sendo os sistemas de preparo e a interação preparo e culturas, iguais estatisticamente (Figura 9)

O maior estoque de COP foi encontrado no solo em PD em relação ao PC, com 4,12 e 2,85 Mg ha⁻¹, respectivamente. A diferença entre os sistemas de preparo no estoque de COP foi de 1,26 Mg ha⁻¹, sendo o estoque de COP, 44% superior no solo em PD do que no PC (Figura 9). Conceição et al. (2013) e Tivet et al. (2013), em estudos com rotações de culturas e PD em longa duração, 13 e 29 anos, respectivamente, observaram que o solo em PD e diferentes sistemas de culturas, aumentou o estoque de COP de 39 à 60% em relação ao solo em PC. Esses resultados de maior estoque de COP em PD em relação a sistemas de preparo com revolvimento do solo indica que o aumento na estabilidade dos

macroagregados, resulta em uma maior estabilidade ao rompimento por agitação em água e maior proteção das frações de matéria orgânica intra e interagregados. Nesse sentido, associando os resultados do estoque de COP com o modelo conceitual de “turnover” de macroagregados proposto por Six et al. (1998), observa-se que o efeito do revolvimento do solo faz com que parte do C seja perdido do sistema, aumentando assim a ciclagem de macroagregados impedindo a formação de novos microagregados estáveis, dessa forma acumulando C nas camadas subsuperficiais do solo.

Os sistemas de culturas contribuíram para o aumento nos estoques de COP e COAM, de modo que os sistemas contendo leguminosas e gramíneas contribuíram para aumentar os estoques em relação ao sistema contendo somente gramíneas. Nos sistemas A+V/M+C e V/M foram 1,65 e 1,56 Mg ha⁻¹ maiores as concentrações de COP, contribuído com 68 e 64%, enquanto que para o COAM essas diferenças foram de 6,02 e 2,90 Mg ha⁻¹, sendo 19 e 9% superiores ao sistema A/M, respectivamente (Figura 9).

Os estoques de COAM do solo tiveram tendência em ser maiores no solo em PD em relação ao solo sob PC. No entanto, essas diferenças foram compensadas possivelmente pelos sistemas com elevado aporte de resíduos e pela qualidade de decomposição dos resíduos das culturas e sendo influenciado, entre outros fatores pelas variações no estoque de COP (Figura 9).

O maior estoque de C na fração mais estável (COAM) nos sistemas de culturas, indica que o processo de acúmulo de C é contínuo, e que o aumento de C na fração lábil (COP) pelo sistema de culturas com elevado aporte de resíduos (A+V/M+C), representa o benefício dos resíduos das culturas que são acumulados e subseqüentemente transformada pela atividade microbiana, contribuindo para o aumento da agregação no solo (Sá et al., 2008; Conceição et al., 2013).

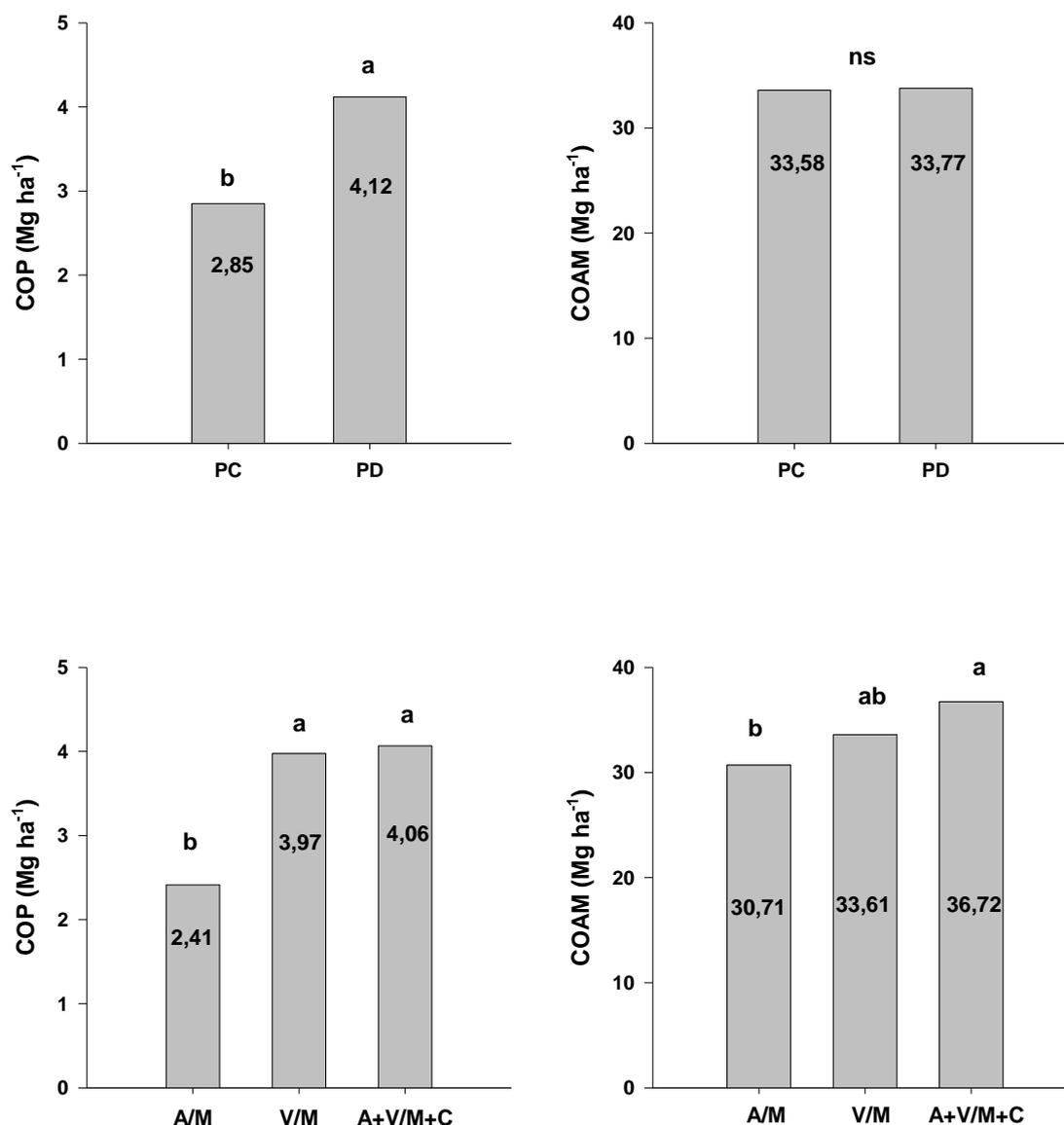


Figura 8. Estoques de carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM), na profundidade de 0-20 cm, em relação aos sistemas de preparo e culturas. Médias seguidas de mesma letra dentro de cada sistema de culturas não diferem entre si, enquanto isso, ns indica não significativo pelo teste de Tukey a 5%. As barras verticais indicam o erro padrão. Plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

Desse modo, verifica-se que o COP pode funcionar como indicador da qualidade da MOS em relação às alterações de manejo a curto prazo. Por sua vez, o COAM apresenta uma ciclagem mais lenta, no que se refere à sua formação e decomposição, sendo necessário um período maior para que a alteração dos sistemas de manejo tenha efeito no estoque de C desta fração (Bayer et al., 2004).

Os acúmulos anuais de COP e COAM apresentaram elevada variação com a profundidade. Na camada de 0-5 cm, em todos os sistemas de culturas,

foram observados acúmulos de COP e COAM, sendo maiores nos sistemas de culturas contendo espécies de leguminosas. O sistema de culturas que mais contribuiu para o COP foi V/M seguido do A+V/M+C, o sistema contendo somente gramíneas (A/M) foi o de menor contribuição, com valores de 80,33 e 69,67 e 28,33 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para os sistemas de culturas. No acúmulo de COAM o sistema com maior adição de resíduos das culturas (A+V/M+C) foi o que mais contribuiu, seguido do V/M e A/M, com valores de 116,99, e 81,33 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm ocorreram perdas expressivas de COP e COAM, em ambos sistemas de culturas. As taxas de perdas de COP em relação à camada de 0-5 cm, variaram de 3,67 à -10,00 kg ha⁻¹ ano⁻¹, no COAM as perdas foram de 0,33 à -111,33 kg ha⁻¹ ano⁻¹ Tabela 4.

5.3.2 Nitrogênio particulado (NP) e associado aos minerais (NAM)

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes aos estoques de N particulado e associado aos minerais do solo nos sistemas de preparo PC e PD com diferentes sistemas de culturas, A/M, V/M e A+V/M+C. O PD apresentou estatisticamente maiores estoques de NP e NAM na camada superficial do solo (0-5 cm) e menores estoques nas camadas subsuperficiais 10-20 cm, nos sistemas de culturas A/M e V/M quando comparado ao PC. Na camada de 0-5 cm em PD os sistemas de culturas contendo leguminosas contribuíram para um incremento nos estoques de NP e NAM, enquanto o sistema de culturas contendo gramíneas influenciou no NAM.

O sistema de culturas A+V/M+C, foi 305 e 41%, o sistema V/M, foi 255 e 27 %, superiores em relação ao sistema de culturas A/M, enquanto no solo sob PC esse aumento foi menor 123%, no estoque de NP no sistema de culturas A+V/M+C, no sistema de culturas V/M houve menor aumento no estoque de NP e NAM, 29 e 19%, respectivamente.

Na camada de 5-10 cm, os estoques de NP e NAM foram maiores no solo sob PC, sendo este superior ao PD, nos sistemas de culturas com leguminosas (A+V/M+C e V/M), não diferindo estatisticamente entre os sistemas de preparo.

Esses resultados são atribuídos ao acúmulo de material vegetal na superfície do solo no PD e à incorporação destes resíduos pelo revolvimento

ocasionado pelos implementos utilizados no PC, o que ocasiona diferentes locais de enriquecimento de N total no solo em sistema de PD (Amado et al., 2000; Bayer et al., 2000a). Os sistemas de culturas (A+V/M+C e V/M) apresentaram, em média, maior estoque de NP e NAM, quando comparados a monocultura aveia/milho (A/M), nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm (Tabela 5).

Tabela 5. Estoques de nitrogênio particulado (NP) e N associado aos minerais (NAM) nas três camadas de um Argissolo Vermelho subtropical sob diferentes sistemas de manejo

Sist. Cult.	Camada (cm)	Preparo do solo			
		PC		PD	
		NP (kg ha ⁻¹)		NAM (kg ha ⁻¹)	
A/M	0-5	4,2	7,8	680	980
	5-10	3,9	4,1	660	700
	10-20	19,6	11,4	1.430	1.290
	0-20	27,7	23,3	2.770	2.970
V/M	0-5	6,5	27,7	810	1.250
	5-10	7,9	7,2	910	850
	10-20	30,2	14,9	1.660	1.450
	0-20	44,6	49,8	3.380	3.520
A+V/M+C	0-5	9,4	31,4	880	1.390
	5-10	7,3	6,7	930	950
	10-20	20,0	17,6	1.820	1.600
	0-20	36,7	55,7	3.630	3.940
DMS (TUKEY 5%)					
Preparo		6,1		80	
Cultura		7,4		-	
Camada		7,4		100	

PD= Plantio direto, PC= Preparo convencional, A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

Na profundidade de 0-20 cm, os sistemas de preparo e culturas influenciaram significativamente o nitrogênio particulado (NP) (Figura 10). O maior estoque nas frações de NP, nos sistemas de culturas A+V/M+C e V/M, pode ser atribuído à presença da ervilhaca e do caupi no sistema com maior adição de resíduos, leguminosas que fixam N₂, ao contrário do sistema que contém exclusivamente gramíneas. Outro fato pode ser a maior produção de fitomassa nos sistemas A+V/M+C e V/M.

O aumento de C no solo proporcionado pela fitomassa da aveia, poderia levar a uma interação com o N, protegendo-o e aumentando seu estoque no solo, estimular a ação de fixadores assimbióticos de N_2 , que também seriam fonte deste elemento para o solo (Campos, 2006). As adições de N pela fixação assimbiótica normalmente não são consideradas (Lovato et al., 2004), entretanto, esta adição, principalmente em associações entre gramíneas e bactérias diazotróficas, pode ser expressiva (Döbereiner, 1992).

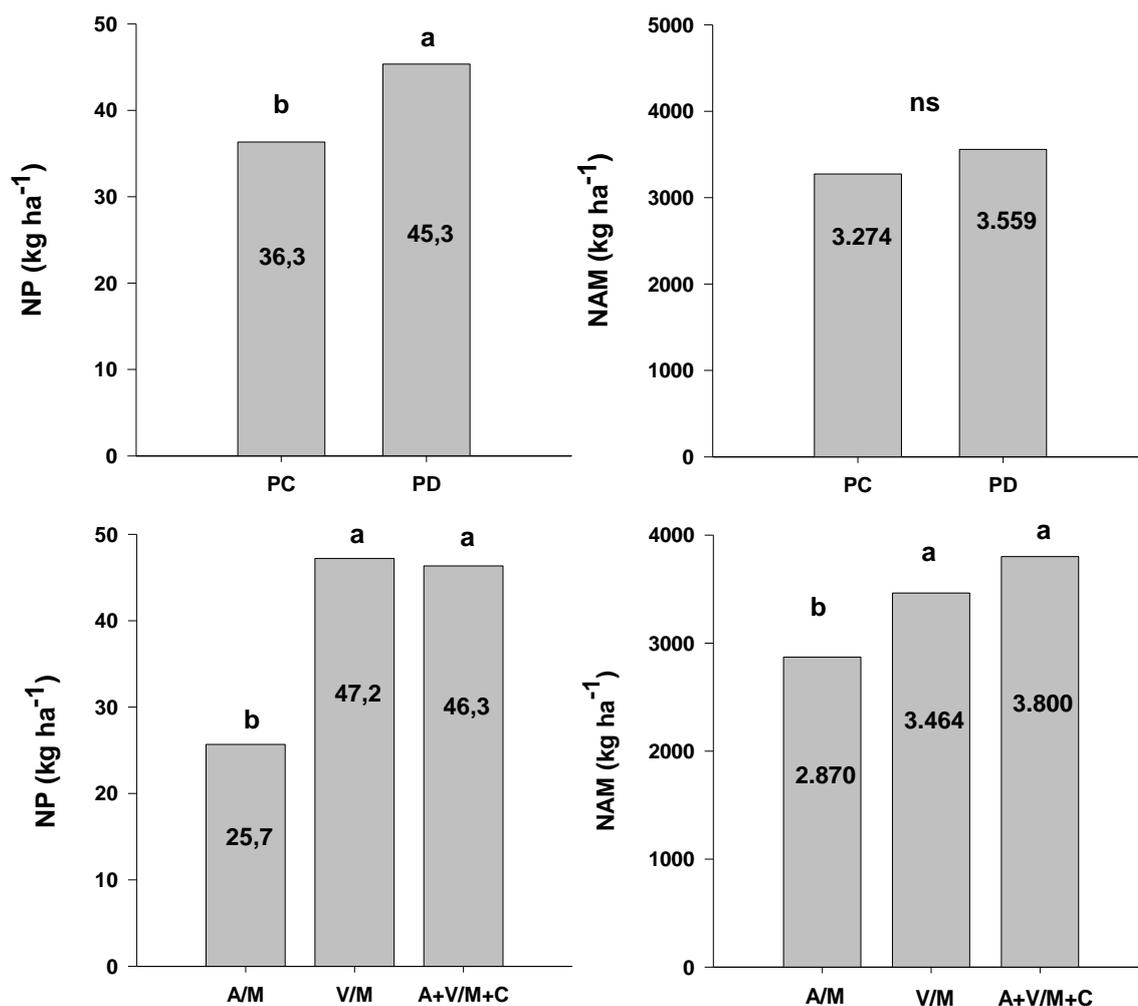


Figura 9. Estoques de nitrogênio particulado (NP) e associado aos minerais (NAM), na profundidade de 0-20 cm, em relação aos sistemas de preparo e culturas. Médias seguidas de mesma letra dentro de cada sistema de culturas não diferem entre si, enquanto isso, ns indica não significativo pelo teste de Tukey a 5%. As barras verticais indicam o erro padrão. Plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), A= Aveia, V= Ervilhaca, M= Milho e C= Caupi.

Os estoques na fração de N associada aos minerais na profundidade de 0-20 cm, foram influenciados pelos sistemas de culturas, não sendo verificado efeito do sistema de preparo (Figura 10). O sistema de cultura com maior adição de resíduos (A+V/M+C) apresentou maior estoque, não ocorrendo diferenças entre os sistemas com leguminosas, somente entre o sistema contendo gramíneas. Os sistemas A+V/M+C e V/M superaram em 31 e 20% o estoque de NAM, em relação à aveia+milho (A/M). Observa-se, que o sistema com elevado aporte de resíduos, o caupi apresenta alto teor de N e de lignina, o que pode ser favorável ao acúmulo de matéria orgânica na presente condição sem adubação nitrogenada, levando-se em conta, as entradas de N via fixação simbiótica, possibilitando a atividade microbiana e, por outro, o aporte de quantidades relativamente altas de lignina, principal fonte vegetal de cadeias polifenólicas para a síntese de matéria orgânica (Stevenson, 1994; Raphael., 2016).

6. CONCLUSÕES

O PD promoveu aumento do C e N no solo, principalmente, na camada superficial e quando associado a sistemas de culturas, com elevado aporte de resíduos.

Sistemas de culturas que utilizam leguminosas apresentam maiores estoques e aporte anual de C e N no solo na camada de 0-20 cm do que o sistema baseado apenas em gramíneas, o que pode estar relacionado a maior estabilização do C no solo.

A maior estabilidade de agregados, principalmente na camada superficial do solo, foi determinada pela utilização do sistema de PD combinado a sistema de culturas com alto aporte de resíduos.

O estoque de C e N da fração particulada foi influenciada pelos sistemas de preparo e de culturas, sendo maiores no solo em PD em relação ao PC e maior nos sistemas de culturas com leguminosas. A fração da MO associada aos minerais foi maior nos sistemas de culturas com maior aporte de resíduos vegetais e não sofreu influência dos sistemas de preparo, confirmando se tratar de uma fração com ciclagem mais lenta.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A condução de experimentos de longa duração torna-se importante para identificar técnicas de manejo de solo adequadas para produção das culturas sem degradação de solo e com mínimo impacto ambiental. Dentre as técnicas, o sistema de plantio direto, atualmente é caracterizado como um dos melhores sistemas de manejo conservacionista do solo.

Os resultados deste estudo comprovam a hipótese de que, o solo em sistema de plantio direto (PD) combinado a sistemas de culturas que proporcionam alto aporte de resíduos e a redução do revolvimento no solo favorece agregação do solo, aumentando a proteção física da MO e potencializando o sequestro de C no solo. Verifica-se, que o acúmulo de C e N no solo foi influenciado pelos sistemas de culturas com elevado aporte de resíduos no solo em PD na camada superficial e a inclusão de plantas leguminosas no sistema de culturas, mostrou-se ser muito importante, favorecendo não só o sequestro de carbono (CO_2) mas também a captura de nitrogênio atmosférico (N_2), reduzindo a adubação mineral e aumentando a capacidade de produção de grande quantidade de resíduos.

Nesse sentido, estudos de longa duração em solos tropicais são necessários para aprofundar os esclarecimentos sobre o potencial de diferentes sistemas de manejo do solo no acúmulo de C em camadas mais profundas, a fim de se identificar com exatidão os sistemas capazes de preservar e, ou, aumentar os estoques de C e a capacidade para proteger e estabilizar o C dentro dos agregados do solo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KAISI, M.M.; YIN, X.; LICHT, M.A. Soil carbon and nitrogen changes as affected by tillage system and crop biomass in a corn–soybean rotation. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 30, n. 3, p. 174-191, 2005.

AMADO, T.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 179-189, 2000.

AMADO, T.J.C., et al. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, 2006.

BALABANE, M.; PLANTE, A. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 55, n. 2, p. 415-427, 2004.

BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 31, n. 7, p. 697-710, 2000.

BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 19, n. 1, p. 25-30, 1987.

BALESDENT, J.; WAGNER, G.H.; MARIOTTI, A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 1, p. 118-124, 1988.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 3, p. 215-230, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 235-239, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. D. A., et al., Ed. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, vol. 2, Porto Alegre: Genesis. 2008. p.7-18.

BAYER, C., et al. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 95-104, 2000a.

BAYER, C., et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 677-683, 2004.

BAYER, C., et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 101-109, 2000b.

BAYER, C., et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 237-245, 2006.

BAYER, C., et al. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical no-till Sandy Acrisol. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v. 40, n. 9-10, p. 1499-1511, 2009.

BAYER, C., et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em ciência do solo**, v. 7, n. 55-118, 2011.

BEARE, M.; HENDRIX, P.; COLEMAN, D. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional-and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 3, p. 777-786, 1994a.

BEARE, M., et al. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional-and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 3, p. 787-795, 1994b.

BEARE, M., et al. Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 211-219, 1997.

BEARE, M.H., et al. Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. **Ecological Monographs**. 1992. p.569-591.

BERG, B., et al. Changes in organic chemical components of needle litter during decomposition. Long-term decomposition in a Scots pine forest. I. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 60, n. 8, p. 1310-1319, 1982.

BORTOLUZZI, E.; ELTZ, F. Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 449-457, 2000.

BRAUNACK, M.; DEXTER, A. Soil aggregation in the seedbed: a review. I. Properties of aggregates and beds of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 259-279, 1989.

BRIAR, S.S., et al. The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 43, n. 5, p. 905-914, 2011.

BRIEDIS, C., et al. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, n. 80-88, 2012.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

BRONSON, K.F., et al. Carbon and nitrogen pools of southern high plains cropland and grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 5, p. 1695-1704, 2004.

BURLE, M.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification*. **Plant and soil**, The Hague, v. 190, n. 2, p. 309-316, 1997.

BUYANOVSKY, G.; ASLAM, M.; WAGNER, G. Carbon turnover in soil physical fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 1167-1173, 1994.

CAMBARDELLA, C.; ELLIOTT, E. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CAMBARDELLA, C.; ELLIOTT, E. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 1071-1076, 1993.

CAMPOS, B.-H.C.D. **Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas** 2006. 188 p. (Tese de Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2006.

CAMPOS, B.-H.C.D., et al. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 805-817, 2011.

CAMPOS, B.D., et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 121-126, 1995.

CARNEIRO, M.A.C., et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CHAPIN, F.; EVINER, V. Biogeochemistry of Terrestrial Net Primary Production. In: Schlesinger, W.H. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 8, n. 1, p. 215-247, 2005.

CHENU, C.; LE BISSONNAIS, Y.; ARROUAYS, D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 4, p. 1479-1486, 2000.

CHRISTENSEN, B. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A., Ed. **Structure and organic matter storage in agricultural soils**, Boca Raton: Lewis. 1996. p.97-165.

CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In: STEWART, B. A., Ed. **Advances in soil science**, New York: Springer. 1992. p.1-90.

CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, n. 3, p. 345-353, 2001.

COLLINS, H., et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 2, p. 157-168, 2000.

COLLINS, H.P., et al. Characterization of soil organic carbon relative to its stability and turnover. In: PAUL, E. A., et al., Ed. **Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems Long Term Experiments in North America**, vol. 1, Boca Raton. 1997. p.51-72.

CONCEIÇÃO, P.C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, n. 40-47, 2013.

CORAZZA, E.J., et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

DÍAZ-ZORITA, M.; GROVE, J. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 165-174, 2002.

DÖBEREINER, J. Fixação de nitrogênio em associação com gramíneas. In: CARDOSO, E. J. B. N., et al., Ed. **Microbiologia do solo**, Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1992. p.173-180.

DOLAN, M.S., et al. Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 221-231, 2006.

DORAN, J. Microbial biomass and mineralizable nitrogen distributions in no-tillage and plowed soils. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 5, n. 1, p. 68-75, 1987.

DORAN, J.W., et al. Determinants of Soil Quality and Health. In: LAL, R., Ed. **Soil quality and soil erosion**, Ankeny: Soil and Water Conservation Society. 1998. p.17.

DUXBURY, J.M., et al. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C., et al., Ed. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**, vol. 2, Hawaii: University of Hawaii Press. 1989. p.33-67.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

ELLIOTT, E. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 3, p. 627-633, 1986.

EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos**, Brasília, v. 2, n. 230, 2011.

FELLER, C.; BEARE, M. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 69-116, 1997.

FENG, X.; SIMPSON, A.J.; SIMPSON, M.J. Chemical and mineralogical controls on humic acid sorption to clay mineral surfaces. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 36, n. 11, p. 1553-1566, 2005.

FIGUEIREDO, C., et al. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. **Soil Research**, Rome, v. 51, n. 2, p. 133-141, 2013.

FRANZLUEBBERS, A.; ARSHAD, M. Soil organic matter pools with conventional and zero tillage in a cold, semiarid climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 39, n. 1, p. 1-11, 1996.

FRANZLUEBBERS, A.; ARSHAD, M. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 5, p. 1382-1386, 1997.

FREIXO, A.A., et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, n. 3, p. 221-230, 2002.

FUENTES, M., et al. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. **Plant and soil**, The Hague, v. 355, n. 1-2, p. 183-197, 2012.

FULTZ, L.M., et al. Aggregate Carbon Pools after 13 Years of Integrated Crop-Livestock Management in Semiarid Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 5, p. 1659-1666, 2013.

GOLCHIN, A., et al. Soil structure and carbon cycling. **Soil Research**, Rome, v. 32, n. 5, p. 1043-1068, 1994a.

GOLCHIN, A., et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Soil Research**, Rome, v. 32, n. 2, p. 285-309, 1994b.

GRANDY, A.S.; ROBERTSON, G.P. Aggregation and organic matter protection following tillage of a previously uncultivated soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 4, p. 1398-1406, 2006.

HAMER, U.; MARSCHNER, B. Priming effects in soils after combined and repeated substrate additions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 128, n. 1, p. 38-51, 2005.

HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and soil**, The Hague, v. 191, n. 1, p. 77-87, 1997.

HUBBARD, R.K.; STRICKLAND, T.C.; PHATAK, S. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. **Soil and Tillage Research**, v. 126, n. 276-283, 2013.

JANTALIA, C., et al. Influência de rotações de culturas no estoque de carbono e nitrogênio do solo sob plantio direto e preparo convencional. **Agronomia**, Graça, v. 37, n. 2, p. 91-97, 2003.

JASTROW, J. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 28, n. 4, p. 665-676, 1996.

KAHLE, M.; KLEBER, M.; JAHN, R. Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area, cation exchange capacity and dithionite-extractable iron. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, n. 4, p. 639-644, 2002.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Mineral surfaces and soil organic matter. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, n. 2, p. 219-236, 2003.

KELL, R.G.; MONTLUCON, D.B.; PRAHLI, F.G. organic matter in marine sediments. **Nature**, London, v. 370, n. 18, 1994.

KIRSCHBAUM, M.U.F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 27, n. 6, p. 753-760, 1995.

KONG, A.Y., et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 4, p. 1078-1085, 2005.

KRAMBERGER, B., et al. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 103-109, 2009.

LAL, R.; FALEIRO, F.G. Savannas and global climate change: source or sink of atmospheric CO₂. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. D., Ed. **Savanas, desafios e Estrategias para o equilibrio entre sociedade, agronegocio e recursos naturais.**, vol. 1, Planaltina: Embrapa Cerrados. 2008. p.81-102.

LOVATO, T., et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.

LÜTZOW, M.V., et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

MADARI, B., et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, n. 1, p. 185-200, 2005.

MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 163-170, 2006.

MARSCHNER, B., et al. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? **Journal of plant nutrition and soil science**, Temuco, v. 171, n. 1, p. 91-110, 2008.

MARTIN, J.P.; HAIDER, K. Influence of Mineral Colloids on Turnover Rates of Soil Organic Carbon. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M., Ed. **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**, Madison,: Soil Science Society of America. 1986. p.283-304.

MARTINS, M.D.R.; ANGERS, D.A.; CORÁ, J.E. Carbohydrate composition and water-stable aggregation of an Oxisol as affected by crop sequence under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 2, p. 475-484, 2012.

MATOS, E.D.S., et al. Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 9, p. 1221-1230, 2008.

MIELNICZUK, J., et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N., et al., Ed. **Tópicos em ciência do solo**, vol. 3, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2003. p.209-248.

MIKUTTA, R., et al. Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 71, n. 10, p. 2569-2590, 2007.

MRABET, R., et al. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 4, p. 225-235, 2001.

MUÑOZ-ROMERO, V., et al. Nitrogen rhizodeposition by wheat under different tillage systems in a rainfed Vertisol. **Field Crops Research**, v. 144, n. 148-153, 2013.

NASCENTE, A.S.; LI, Y.C.; CRUSCIOL, C.A.C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 130, n. 52-57, 2013.

NICOLOSO, R.D.S. **Estoques e mecanismo de estabilização do carbono orgânico do solo em agroecossistemas de clima temperado e sub-tropical**. . 2009. 108p (Tese de Doutorado) - Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2009.

OADES, J.; WATERS, A. Aggregate hierarchy in soils. **Soil Research**, Rome, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and soil**, The Hague, v. 76, n. 1-3, p. 319-337, 1984.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 2, p. 476-488, 1992.

PAUSTIAN, K.; COLLINS, H.P.; PAUL, E.A. Management controls on soil carbon. In: PAUSTIAN, K., et al., Ed. **Soil organic matter in temperate**

agroecosystems: Long-term experiments in North America, Boca Raton: CRC Press. 1997. p.15-49.

PEIXOTO, R., et al. Soil aggregation and bacterial community structure as affected by tillage and cover cropping in the Brazilian Cerrados. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 16-28, 2006.

PLANTE, A.; MCGILL, W. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 79-92, 2002.

PUGET, P.; CHENU, C.; BALESSENT, J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, n. 4, p. 595-605, 2000.

RAPHAEL, J.P., et al. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 45-53, 2016.

ROSSETTI, K.D.V.; CENTURION, J.F. Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos¹. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 252-258, 2015.

SÁ, J.C.M.D., et al. Dinâmica da matéria orgânica nos Campos Gerais. In: SANTOS, G. D. A., et al., Ed. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, vol. 2, Porto Alegre: Genesis. 2008. p.443-461.

SÁ, J.C.M.D., et al. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 1486-1499, 2001.

SALINAS-GARCIA, J.; HONS, F.; MATOCHA, J. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 152-159, 1997.

SALTON, J.C., et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SANTOS, H.P.D.; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 477-486, 2003.

SCHMIDT, M.W.; NOACK, A.G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. **Global biogeochemical cycles**, Washington, v. 14, n. 3, p. 777-793, 2000.

SCHMIDT, M.W., et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, London, v. 478, n. 7367, p. 49-56, 2011.

SILVA, I.D.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 311-317, 1998.

SILVA, I.D.F.D. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 115 p. (Tese de Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1993.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SISTI, C.P., et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 5, p. 1350-1358, 1999.

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**, Elmsford, v. 32, n. 14, p. 2099-2103, 2000.

SIX, J., et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 5, p. 1367-1377, 1998.

SIX, J., et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and soil**, The Hague, v. 241, n. 2, p. 155-176, 2002a.

SIX, J., et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

SIX, J., et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1981-1987, 2002b.

SMITH, P., et al. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. **Global Change Biology**, Oxford, v. 4, n. 6, p. 679-685, 1998.

SOHI, S.P., et al. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 4, p. 1121-1128, 2001.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 65-105, 1996.

STEVENSON, F.; ELLIOTT, E. Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter. In: COLEMAN, D. C., et al., Ed. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**, Honolulu: University of Hawaii. 1989. p.173-199.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York. John Wiley & Sons. 1994.

TEIXEIRA, L.; TESTA, V.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 2, p. 207-214, 1994.

THEVENOT, M.; DIGNAC, M.-F.; RUMPEL, C. Fate of lignins in soils: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, n. 8, p. 1200-1211, 2010.

TIESSEN, H.; STEWART, J. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 3, p. 509-514, 1983.

TISDALL, J. Ecology of earthworms in irrigated orchards. In: EMERSON, W. W., et al., Ed. **Modification of soil structure**, Chichester: Wiley and Sons. 1978. p.297-303.

TISDALL, J.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of soil science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TIVET, F., et al. 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**, Amsterdam, v. 209, n. 1, p. 214-225, 2013.

TRUMBORE, S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. **Ecological Applications**, Tempe, v. 10, n. 2, p. 399-411, 2000.

WEBER, M.A.; MIELNICZUK, J. Estoque e disponibilidade de nitrogênio no solo em experimento de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 429-437, 2009.

ZANATTA, J., et al. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 510-519, 2007.

ZOTARELLI, L., et al. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 95, n. 1, p. 196-206, 2007.

ZOTARELLI, L., et al. Impact of tillage and crop rotation on aggregate-associated carbon in two Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 2, p. 482-491, 2005.

9. APÉNDICE

Apêndice 1.

Os itens de 1 a 7 correspondem ao procedimento utilizado na comparação dos resultados. A escolha de qual deles deverá ser adotado é determinada pela significância encontrada na análise da variância realizada para cada parâmetro de solo avaliado (Tabela 6).

1. Preparo:

Para comparar os métodos de preparo entre si deve-se fazer a média dos 3 sistemas de culturas e 3 profundidades em cada sistema de preparo. Utiliza-se o DMS para preparo para verificar a diferença entre estas médias.

2. Cultura:

Para comparar os sistemas de culturas entre si deve-se fazer a média dos 3 sistemas de preparo e 3 profundidades em cada sistema de cultura. Utiliza-se o DMS para cultura para verificar a diferença entre as médias.

3. Profundidade:

Para comparar as profundidades entre si deve-se fazer a média dos 3 sistemas de preparo e 3 sistemas de culturas em cada profundidade. Utiliza-se o DMS para profundidade para verificar a diferença entre as médias.

4. Interação entre preparo e sistema de cultura:

Para comparar os métodos de preparo dentro de cada sistema de cultura e dos sistemas de culturas dentro de cada sistema de preparo deve-se fazer as médias das profundidades dentro de cada sistema de preparo e de cada sistema de cultura. Utiliza-se o DMS para preparo para comparar os preparos dentro de cada sistema de cultura e o DMS para culturas para comparar os sistemas de culturas dentro de cada sistema de preparo.

5. Interação entre preparo e profundidade:

Para comparar os métodos de preparo dentro de cada profundidade e das profundidades dentro de cada preparo deve-se fazer a média dos sistemas de

culturas em cada sistema de preparo e em cada profundidade. Utiliza-se o DMS para preparo para comparar os prepares dentro de cada profundidade e o DMS para profundidade para comparar as profundidades dentro de cada método de preparo.

6. Interação entre sistema de cultura e profundidade:

Para comparar os sistemas de culturas dentro de cada profundidade e as profundidades dentro de cada sistema de cultura deve-se fazer a média dos sistemas de preparo dentro de cada sistema de cultura e de cada profundidade. Utiliza-se o DMS para culturas para comparar os sistemas de culturas dentro de cada profundidade e o DMS para profundidade para comparar as profundidades dentro de cada sistema de cultura.

7. Interação entre método de preparo, sistema de cultura e profundidade:

Não necessita calcular médias. Utiliza-se o DMS para preparo para comparar as médias dos prepares dentro de cada sistema de cultura e profundidade, o DMS para cultura para comparar os sistemas de culturas dentro de cada sistema de preparo e profundidade e o DMS para profundidade para comparar as profundidades dentro de cada sistema de preparo e sistema de cultura.

Apêndice 2.

Tabela 6. Significância do tratamento nas variáveis dependentes do solo na profundidade de 0-20 cm e entre camadas, carbono orgânico total (C), nitrogênio total (N), estoques de carbono (EC) e nitrogênio (EN), carbono orgânico particulado (ECOP), carbono associado aos minerais (ECAM), nitrogênio particulado (ENP) e nitrogênio associado aos minerais (ENAM), classes de agregados, diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) e seco (DMPs) e o índice de estabilidade de agregados (IEA).

Parâmetros de solo	Causas de Variação						
	Preparo (P)	Culturas (C)	P*C	Camadas (Ca)	P*Ca	C*Ca	P*C*Ca
P<F							
0-20 cm							
EC	0.4648	0.0008	0.9242				
EN	0.0577	0.0003	0.7683				
ECOP	0.0418	0.0026	0.1687				
ECOAM	0.9253	0.0065	0.8915				
ENP	0.0832	0.0005	0.0262				
ENAM	0.0637	0.0003	0.7785				
Camadas							
EC	0.1142	0.0007	0.6744	0.0001	0.0001	0.0045	0.0404
EN	0.0100	0.0001	0.5306	0.0001	0.0001	0.0247	0.0496
ECOP	0.4648	0.0008	0.9242	0.0001	0.0001	0.1245	0.0480
ECOAM	0.0031	0.0001	0.2332	0.0001	0.0001	0.9904	0.2333
ENP	0.0418	0.0026	0.1687	0.0015	0.0001	0.0002	0.0086

Continuação...

Parâmetros de solo	Causas de Variação						
	Preparo (P)	Culturas (C)	P*C	Camadas (Ca)	P*Ca	C*Ca	P*C*Ca
			P<F				
			Camadas				
ENAM	0.9253	0.0065	0.8915	0.0001	0.0001	0.4601	0.3076
			Agregados				
≥ 4,76	0.0114	0.0082	0.1798	0.0708	0.3541	0.0008	0.0128
4,76-2,00	0.0129	0.1892	0.3879	0.1670	0.0040	0.9988	0.5246
2,00-0,50	0.1656	0.1968	0.7133	0.4580	0.6405	0.3342	0.2987
0,50-0,250	0.0713	0.1835	0.3594	0.7011	0.4707	0.7453	0.1148
0,250-0,053	0.0458	0.0989	0.2920	0.0801	0.5816	0.0298	0.0910
< 0,053	0.0582	0.0606	0.4464	0.1026	0.4361	0.0923	0.2157
DMPU	0.0077	0.0042	0.3021	0.0264	0.0800	0.0004	0.0276
DMPS	0.0864	0.0415	0.0178	0.0001	0.3025	0.0004	0.0001
IEA	0.0115	0.0159	0.1964	0.0546	0.2095	0.0085	0.0010