

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

CAROLINE AMADORI

**AGREGAÇÃO E PROTEÇÃO FÍSICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA DE
INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO EM EXPERIMENTO
DE LONGA DURAÇÃO**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2014

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

CAROLINE AMADORI

**AGREGAÇÃO E PROTEÇÃO FÍSICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA DE
INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO EM EXPERIMENTO
DE LONGA DURAÇÃO**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2014

CAROLINE AMADORI

**AGREGAÇÃO E PROTEÇÃO FÍSICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM
LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA DE
INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO EM EXPERIMENTO
DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Conceição
Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Casali

PATO BRANCO

2014

A481a

Amadori, Caroline

Agregação e proteção física da matéria orgânica em Latossolo Vermelho sob plantas de cobertura de inverno e sistemas de preparo do solo em experimento de longa duração. / Caroline Amadori -- 2014.
69 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Conceição

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Casali

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Pato Branco, 2014.

Bibliografia: f. 60 - 66

1. Agregação do Solo. 2. Matéria Orgânica do Solo. 3. Plantas de Cobertura de Inverno. 4. Sistemas de Preparo. I. Conceição, Paulo Cesar, orient. II. Casali, Carlos Alberto, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDD (22. ed.) 630

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Câmpus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Agronomia



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n° 100

**AGREGAÇÃO E PROTEÇÃO FÍSICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM LATOSSOLO
VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE
PREPARO DO SOLO EM EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO**

por

CAROLINE AMADORI

Dissertação apresentada às treze horas e trinta minutos do dia nove de junho de dois mil e quatorze, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM AGRONOMIA, Linha de Pesquisa – Sistemas de Produção Vegetal, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Dra. Michely Tomazi
EMBRAPA - CPAO

Profa. Dra. Nilvania Aparecida de Mello
UTFPR - PB

Prof. Dr. Carlos Alberto Casali
UTFPR - DV

Prof. Dr. Paulo Cesar Conceição
UTFPR
Orientador

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Idalmir dos Santos
Coordenador do PPGAG

*Aos meus pais, Lurdes e Laudir
Aos meus irmãos, Sandra e Rodrigo
Ao meu sobrinho, João Eduardo
Dedico este trabalho!*

AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar meu caminho.

Ao Professor Paulo Cesar Conceição pela oportunidade da orientação, pela confiança depositada, pelos ensinamentos repassados, pelo exemplo de profissionalismo e pela amizade.

Ao Professor Carlos Alberto Casali pela oportunidade da co-orientação, pelo auxílio com o trabalho e pela amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UTFPR Câmpus Pato Branco pela oportunidade do mestrado e aos Professores do PPGAG pelos ensinamentos repassados com tanta competência.

À Capes pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao IAPAR Pato Branco pela concessão do experimento, em especial ao Pesquisador Ademir Calegari pela oportunidade do desenvolvimento deste trabalho.

À todos os colegas que durante este período fizeram parte do Grupo de Pesquisa em Ciência do Solo da UTFPR Câmpus Dois Vizinhos: Augusto, Mauricio, Jaque, Ana, Cíntia, Regiane, Laurês, Cristiane, Jaqueline, Gilvanei, Nilson, Anderson, Carlos, Dionata, Cidimar, Tais, Thyara, pelo auxílio em todas as horas e pela amizade.

À Cíntia Boeira Batista pelo auxílio e suporte com as análises de carbono e pela amizade.

Aos amigos, pelas conversas, apoio e torcida em todos os momentos, em especial a Luana e a Jaque.

À minha família, meu porto seguro.

À todos que de alguma forma auxiliaram e contribuíram com este trabalho. De longe e de perto. E que estiveram ao meu lado nesta etapa de muito crescimento profissional e pessoal.

Muito Obrigada!

RESUMO

AMADORI, Caroline. Agregação e proteção física da matéria orgânica em Latossolo Vermelho sob plantas de cobertura de inverno e sistemas de preparo do solo em experimento de longa duração. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

Os sistemas de manejo do solo promovem alterações à agregação e ao estoque de matéria orgânica do solo (MOS). O objetivo foi avaliar a influência do cultivo de plantas de cobertura de inverno e de sistemas de preparo à agregação e ao estoque de carbono (C) no solo e nas frações da MOS. O experimento teve início no ano de 1986 no Instituto Agrônomo do Paraná, em Pato Branco, sobre um Latossolo Vermelho aluminoférrico. Os tratamentos são uma combinação entre plantas de cobertura de solo: aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro, tremoço azul, trigo e pousio, e sistemas de preparo: plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), dispostos em parcelas subdivididas com três repetições. As amostras de solo foram coletadas em novembro de 2012 nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. No estudo 1 avaliaram-se a estabilidade de agregados por meio de tamisamento a úmido, o índice de diâmetro médio ponderado (DMP), a distribuição de agregados em classes de diâmetro e o teor de carbono orgânico (CO) dos agregados. No estudo 2 foram utilizadas apenas amostras das parcelas com aveia preta, nabo forrageiro e pousio, sob PD e PC, na realização do fracionamento densimétrico da MOS para obtenção das frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO). Os teores de C da FLL, FLO e do solo integral foram analisados por combustão seca, sendo o C da fração pesada (FP) obtido por diferença. Foram calculados o estoque de C do solo e das frações da MOS e o índice de manejo do carbono (IMC). No estudo 1 foi verificado que para todas as camadas, o solo sob PD apresentou maior quantidade de agregados grandes que o PC, o que refletiu em maior DMP dos agregados. As plantas de cobertura de inverno não interferiram significativamente no DMP dos agregados. O PD apresentou maior teor de CO nos agregados para as três classes de diâmetro na camada de 0-5 cm em relação ao PC. Os maiores teores de CO foram encontrados nas classes de diâmetro > 2 e $< 0,25$ mm nas três camadas de solo. No estudo 2, para a camada de 0-5 cm, o solo sob PD apresentou maior estoque de C total, na FLL e FLO em relação ao solo sob PC. E entre as coberturas de inverno, o solo cultivado com nabo obteve o maior estoque de C para a FLL na camada superficial. A FP da MOS foi a que promoveu acúmulo superior de C para todos os sistemas de manejo e camadas de solo. O sistema de PD promove aumento da agregação e do estoque de C do solo, pois permite maior ação dos mecanismos de proteção da MOS, indicando a maior qualidade do sistema em relação ao PC.

Palavras-chave: Agregação do solo. Matéria orgânica do solo. Plantas de cobertura de inverno. Sistemas de preparo.

ABSTRACT

AMADORI, Caroline. Aggregation and physical protection of organic matter in Oxisol under winter cover crops and soil tillage systems in a long-term experiment. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Federal University of Technology - Paraná. Pato Branco, 2014.

The soil management systems cause changes to the aggregation and the stock of soil organic matter (SOM). The aim was to evaluate the influence of the winter cover crops and the tillage systems in aggregation and carbon (C) stock in soil and SOM fractions. The experiment started in 1986 at the Agronomic Institute of Paraná, in Pato Branco, in an Oxisol. The treatments are a combination of winter cover crops: black oat, rye, hairy vetch, common vetch, oilseed radish, blue lupine, wheat and fallow, and tillage systems: no tillage (NT) and conventional tillage (CT), in split plot design with three replications. Soil samples were collected in November 2012, in layers 0-5, 5-10 and 10-20 cm. In study 1, the aggregate stability were performed through wet sieving for determination of the mean weight diameter (MWD) and the aggregate distribution in diameter classes, and also the organic carbon (OC) in the aggregate. In study 2 only samples of plots black oat, oilseed radish and fallow, under NT and CT, were used in performing the density fractionation of SOM to obtain the free particulate organic matter (free-POM) and occluded particulate organic matter (occluded-POM) was performed. The concentration of C in soil and in free-POM and occluded-POM were analyzed by dry combustion, but the C concentration in mineral-associated organic matter (min-OM) was obtained by calculating the difference. The stock of C in soil and fractions of SOM and carbon management index (CMI) were calculated. In study 1, for all layers, the soil under NT had higher amounts of large aggregates than CT, which resulted in higher MWD of aggregates. The winter cover crops had no significant influence on the MWD of aggregates. The NT showed higher OC content of aggregates for the three diameter classes in the 0-5 cm layer compared to the CT. The highest levels of OC were found in the diameter classes >2 and <0.25 mm in the three soil layers. In study 2, for the 0-5 cm layer, the NT had higher C stocks in soil, free-POM and occluded-POM compared to CT. And for winter cover crops, the soil with radish had the highest C stock for the free-POM in the surface layer. The min-OM promoted greater accumulation of C for all management systems and soil layers. The NT promotes an increase in the aggregation and soil C stock, and it enables greater action of protection mechanisms of SOM, indicating the higher quality of this system compared to CT.

Keywords: Soil aggregation. Soil organic matter. Winter cover crops. Tillage systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de agregados do solo por classes de diâmetros nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, para os sistemas de preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e de floresta nativa (mata). UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014...31

Figura 2 – Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados para os sistemas de preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e de floresta nativa (mata) em três camadas de solo. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.35

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Histórico de cultivo de espécies de inverno e verão durante o período de 1986 a 2012, em experimento localizado na Estação Experimental do IAPAR Pato Branco. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.26
- Tabela 2 - Distribuição de agregados e carbono orgânico em classes de agregados, > 2 mm, 2-0,25 mm e < 0,25 mm, em solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e floresta nativa (mata), nas camadas de solo, 0-5, 5-10 e 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.33
- Tabela 3 – Distribuição de agregados e carbono orgânico em classes de agregados, > 2 mm, 2 - 0,25 mm e < 0,25 mm, e diâmetro médio ponderado (DMP), para as coberturas de solo e área de floresta nativa (mata) nas camadas de solo 0-5, 5-10, 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014. .36
- Tabela 4 – Histórico de cultivo de espécies de inverno e verão durante o período de 1986 a 2012, em experimento localizado na Estação Experimental do IAPAR Pato Branco. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.46
- Tabela 5 - Estoque de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), pesada (FP), e no solo (COT), e relações de cada fração com o COT, em solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e plantas de cobertura, além de floresta nativa (mata), nas camadas de solo, 0-5 e 5-10 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.52
- Tabela 6 - Estoque de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), pesada (FP), e no solo (COT), e relações de cada fração com o COT, em solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e plantas de cobertura, além de floresta nativa (mata), na camada de solo de 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.53
- Tabela 7 – Relação entre estoque de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP) e no solo (COT) entre os sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), e entre as camadas 0-5 e 0-20 cm do solo. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.55
- Tabela 8 – Estoque de carbono na fração leve (FL) e pesada (FP) e no solo (COT), labilidade do carbono (LC), índice de labilidade do carbono (ILC), índice de estoque de carbono (IEC) e índice de manejo de carbono (IMC) do solo para os sistemas preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob plantas de cobertura e área de floresta nativa (mata) na camada de solo de 0-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.57

LISTA DE SIGLAS

CO	Carbono orgânico
COT	Carbono orgânico total
DMP	Diâmetro médio ponderado
FL	Fração leve
FLL	Fração leve livre
FLO	Fração leve oclusa
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
IEC	Índice de estoque de carbono
ILC	Índice de labilidade do carbono
IMC	Índice de manejo do carbono
LC	Labilidade do carbono
MOS	Matéria orgânica do solo
PC	Preparo convencional do solo
PD	Plantio direto
PPGAG	Programa de pós-graduação em Agronomia
PR	Unidade da federação – Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ABREVIATURAS

C	Carbono
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de carbono
g	Gramma
h	Hora
ha	Hectare
J	Joules
K ₂ O	Óxido de potássio
kg	Quilograma
m	Metro
M	Massa molar
Mg	Megagrama
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetros
N	Nitrogênio
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
μm	Micrômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
<	Menor
>	Maior
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1 AGREGAÇÃO DO SOLO	17
1.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	19
1.3 HIPÓTESE	21
2 CAPÍTULO I – AGREGAÇÃO DE LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO	22
2.1 RESUMO.....	22
2.2 ABSTRACT	22
2.3 INTRODUÇÃO	23
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	24
2.4.1 Caracterização do Experimento	24
2.4.2 Amostragem do Solo	27
2.4.3 Estabilidade de Agregados do Solo	27
2.4.4 Carbono Orgânico nos Agregados do Solo	28
2.4.5 Análise Estatística	29
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
2.6 CONCLUSÕES	39
3 CAPÍTULO II – FRACIONAMENTO DENSIMÉTRICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DE LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO	41
3.1 RESUMO.....	41
3.2 ABSTRACT	41
3.3 INTRODUÇÃO	42
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.4.1 Caracterização do Experimento	44
3.4.2 Amostragem do Solo	47
3.4.3 Fracionamento Densimétrico da Matéria Orgânica do Solo	47
3.4.4 Estoque de Carbono	48
3.4.5 Índice de Manejo do Carbono	48
3.4.6 Análise Estatística	49
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
3.6 CONCLUSÕES	57
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICES.....	67

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é capaz de expressar os efeitos causados pelos sistemas de produção em suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Atualmente, o sistema de plantio direto (PD) se apresenta como o sistema de manejo mais expressivo para a produção agrícola no país (FEBRAPDP, 2014; CASÃO JUNIOR; ARAÚJO; LLANILLO, 2012). O sistema de preparo convencional (PC) do solo foi durante muitos anos o sistema mais adotado para a produção agrícola brasileira, porém as operações de aração e gradagem amplificaram problemas com erosão hídrica e, em consequência, intensificaram a degradação do solo (GUADAGNIN et al., 2005; BERTOL et al., 2007).

O PD iniciou visando reduzir estes problemas, baseando-se em três princípios essenciais, quais sejam a cobertura permanente do solo, o mínimo revolvimento do solo e a rotação de culturas (DERPSCH; FRIEDRICH, 2009; FAO, 2014). Adotando esses princípios para o manejo do solo espera-se que o PD promova redução da erosão hídrica, melhoria na agregação, maior infiltração e retenção de água, aumento no teor de matéria orgânica, sequestro de CO₂ atmosférico, maior ciclagem dos nutrientes no solo, elevação da atividade da biomassa microbiana e conseqüentemente maior produção vegetal (HERNANI; KURIHARA; SILVA, 1999; ZANATTA et al., 2007; DALMAGO et al., 2009; CAMPOS et al., 2011; PORTELLA et al., 2012; LANZANOVA et al., 2013).

O PD no Brasil teve início em 1972 com o agricultor Herbert Bartz, no município de Rolândia – PR, e recentemente atingiu 31,81 milhões de hectares na safra 2011/2012 no Brasil (FEBRAPDP, 2014). Paralelamente ao aumento do PD houve a expansão da utilização de plantas destinadas à cobertura e a adubação verde do solo, principalmente as espécies anuais utilizadas no ciclo de inverno, devido a predominância de cultivo das culturas anuais de verão como cultura de interesse econômico (DERPSCH; FRIEDRICH, 2009; CASÃO JUNIOR; ARAÚJO; LLANILLO, 2012). Entre elas destacam-se a aveia preta, o centeio, a ervilhaca comum, a ervilhaca peluda, o nabo forrageiro e o tremoço, que são consideradas excelentes plantas para a cobertura do solo, capazes de melhorar as propriedades

do mesmo (GIACOMINI et al., 2003; CALEGARI et al., 2008; SILVA et al., 2011-a; DONEDA et al., 2012).

Entre os benefícios das plantas de cobertura está a formação de uma camada de palha que proporciona a cobertura do solo, protegendo este do impacto das gotas da e, conseqüentemente, dos processos erosivos que acarretam perdas de solo, água e nutrientes (CARDOSO et al., 2012; LANZANOVA et al., 2013). A palhada contribui com o aumento na taxa de infiltração de água, a manutenção da umidade e a diminuição das oscilações térmicas do solo. Além disso, há o aumento do teor e do estoque de matéria orgânica do solo (AMADO et al., 2001; CALEGARI et al., 2008), que provoca melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas (CALEGARI, 1990; MONEGAT, 1991), como a agregação (CAMPOS et al., 1999; CALEGARI, 2006), refletindo em maior produção da cultura subsequente (GIACOMINI et al., 2004; CARVALHO et al., 2007; DAHLEM, 2013).

1.1 AGREGAÇÃO DO SOLO

A agregação está relacionada com os demais atributos físicos do solo como densidade, porosidade, aeração, infiltração e retenção de água no solo (DEXTER, 1988), expressando efeitos indiretos no crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, bem como na qualidade do solo e sustentabilidade do sistema (DA-SILVA et al., 2012).

Os agregados do solo são formados pela interação entre matéria orgânica, organismos, raízes e minerais presentes no solo (SIX et al., 2002-a) e são resultantes de dois processos de formação e estabilização, um em que os agregados são formados seguindo uma hierarquia (TISDALL; OADES, 1982) e outro no qual a agregação ocorre em núcleos orgânicos (GOLCHIN et al., 1994).

A formação de agregados seguindo uma hierarquia, teoria proposta por Tisdall; Oades (1982) define que através da ligação entre microagregados (< 0,25 mm) por agentes cimentantes orgânicos ocorre a formação de macroagregados (> 0,25 mm). Os agentes cimentantes são classificados quanto a sua resistência a ação microbiana, em transicionais, temporários e persistentes. Os agentes transicionais, como polissacarídeos, e os agentes temporários, como hifas de fungos

e raízes, atuam na formação e estabilização de macroagregados, enquanto que os agentes persistentes, como materiais orgânicos humificados associados a óxidos de ferro e alumínio e a cátions polivalentes, interagem com as partículas coloidais do solo para a formação de microagregados (TISDALL; OADES, 1982).

Esta teoria é predominante para solos de clima temperado com menor nível de intemperização, mas para os solos de clima tropical com textura argilosa e elevada presença de argilominerais e óxidos de ferro e alumínio, esta é menos expressiva devido a forte ação cimentante dos minerais (OADES; WATERS, 1991; SIX et al., 2000).

Outro processo proposto define que a formação e estabilização de agregados ocorrem com adição de resíduos vegetais ao solo, os quais servem de fonte de carbono para a atividade dos microrganismos, que promovem a liberação de metabólitos servindo como agentes ligantes de partículas (GOLCHIN et al., 1994). Essa interação entre partículas de argila, resíduos vegetais e compostos orgânicos forma um núcleo orgânico. Com o tempo, a matéria orgânica disponível para os microrganismos diminui, reduzindo a estabilidade destes macroagregados, que quando rompidos liberam agregados de menor tamanho. Mas com a adição constante de resíduos vegetais esse processo se torna contínuo e os macroagregados são formados e reformados, e permanecem estáveis por mais tempo (GOLCHIN et al., 1994).

Apesar da expressiva ação dos argilominerais e óxidos na formação e estabilização dos agregados em Latossolos argilosos, as práticas de manejo apresentam uma grande importância, pois são capazes de influenciar fatores como acúmulo de matéria orgânica, atividade microbiana e desenvolvimento das raízes, que podem proporcionar o aumento da agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; CALEGARI, 2006; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011; COSTA JUNIOR et al., 2012). Nesse aspecto, o cultivo de plantas de cobertura associado ao PD pode promover melhorias na qualidade estrutural do solo (DA-SILVA et al., 2012).

1.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida, teoricamente, como sendo composta predominantemente de todo o carbono orgânico (CO) presente no solo, desde resíduos vegetais e animais, até a porção viva no solo, a micro, meso e macro fauna, formando um conjunto heterogêneo de compostos orgânicos (ROSCOE; MACHADO, 2002). Sua importância é justificada pela relação com a maioria dos atributos do solo e do ambiente como estabilidade de agregados, resistência a erosão, infiltração e retenção de água, atividade biológica, capacidade de troca de cátions, disponibilidade de nutrientes às plantas e liberação de gases para a atmosfera (MIELNICZUK, 2008).

O estoque de MOS é regulado por processos de adição e perda. As adições de MOS são dependentes principalmente da taxa de adição de resíduos vegetais ao solo, enquanto que as perdas ocorrem pela decomposição microbiana dos resíduos orgânicos, erosão do solo e lixiviação de compostos orgânicos solúveis (BAYER; MIELNICZUK, 2008). O sistema de manejo, as condições climáticas e o tipo de solo interferem tanto nos processos de adição e perda de MOS (SÁ et al., 2013), como na estabilização desta no solo (ZOTARELLI et al., 2007), que ocorre por três mecanismos de proteção sendo eles, recalcitrância molecular, interação organomineral e proteção física (SOLLINS et al., 1996; SIX et al., 2002-b).

A recalcitrância molecular refere-se a complexidade das características moleculares da MOS, as quais indicam a resistência da molécula a degradação microbiana. As estruturas aromáticas, como a lignina, possuem maior energia de ligação em relação as alifáticas, como os carboidratos, por isso são mais difíceis de sofrerem decomposição pelas enzimas microbianas (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2002; SIX et al., 2002-b; BAYER et al., 2006). A proteção física por oclusão em macro e microagregados limita a ação dos microrganismos e de suas enzimas sobre os substratos orgânicos devido ao impedimento físico aos microrganismos e a diminuição da disponibilidade de oxigênio e água aos processos de decomposição (SOLLINS et al., 1996; SIX et al., 2002-b; CONCEIÇÃO, 2006). Na interação organomineral, a MOS está estabilizada através das ligações entre as

superfícies minerais e os compostos orgânicos, pois estas ligações demandam muita energia para quebra pelos microrganismos (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2002; SOLLINS et al., 1996; BAYER et al., 2006).

Os mecanismos de proteção da MOS podem ser estudados através de técnicas de fracionamento da MOS que pode ser conduzidas por métodos físicos ou químicos, dependendo do objetivo do estudo. O método físico densimétrico baseia-se na diferença de densidade entre a fração orgânica e a mineral, separando as frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP), através de dispersão e separação de partículas, onde a dispersão pode ocorrer devido às vibrações produzidas por ultrassom, e a separação através da flotação em uma solução com densidade conhecida (GOLCHIN et al., 1994; ROSCOE; MACHADO, 2002; CONCEIÇÃO et al., 2008).

A FLL representa o material orgânico que não está interagindo com as partículas minerais do solo, comumente materiais adicionados recentemente e de composição mais lábil do que as demais frações da MOS (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002; PINHEIRO et al., 2004). A FLO representa o material orgânico contido no interior dos agregados do solo, mas que não está interagindo com as partículas minerais e geralmente é constituída por compostos orgânicos com grau de decomposição mais avançado do que a FLL (PINHEIRO et al., 2004; CONCEIÇÃO, 2006; TOMAZI, 2008). A FP da MOS é caracterizada pelos compostos orgânicos que estão ligados as partículas minerais do solo, sendo constituída por compostos humificados (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002; PINHEIRO et al., 2004).

Relacionando o estoque de C nas frações da MOS é possível expressar a qualidade dos sistemas de manejos agrícolas, através do índice de manejo de carbono (IMC), que é o produto entre o índice de estoque de carbono (IEC) e o índice de labilidade de carbono (ILC) (BLAIR et al., 1995; DIEKOW et al., 2005-a; CONCEIÇÃO et al., 2014). O IEC e o ILC são obtidos através da relação entre o estoque de C (IEC) e a labilidade do C (ILC) do tratamento analisado com o estoque e a labilidade do C do solo utilizado como referência, comumente áreas de vegetação nativa, as quais recebem índices de valor igual a 1,00 (BLAIR et al., 1995). Valores de IMC inferiores ao da referência indicam que o sistema de manejo está promovendo um impacto negativo a MOS. Por outro lado valores superiores

indicam a capacidade do sistema de manejo melhorar a quantidade e a qualidade da MOS e conseqüentemente a qualidade do solo (BLAIR et al., 1995; SILVA et al., 2011-b; ROSSI et al., 2012).

O cultivo agrícola em regiões tropicais e subtropicais acelera os processos bioquímicos dos solos e, quando associado a práticas de manejo inadequadas, provocam a diminuição do estoque de C do solo (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Para tanto, sistemas de manejo com mínimo de revolvimento, sistema rotacionado de culturas com alto aporte de resíduos são considerados capazes de modificar a quantidade e qualidade da MOS e conseqüentemente a qualidade do solo (VEZZANI et al., 2008).

1.3 HIPÓTESE

O uso de plantas de cobertura de solo no inverno associado ao sistema de plantio direto em Latossolo Vermelho de textura muito argilosa após 27 anos de cultivo aumenta a estabilidade dos agregados do solo e propicia maior proteção física da matéria orgânica do solo, modificando os compartimentos desta e elevando o estoque de carbono orgânico do solo.

2 CAPÍTULO I – AGREGAÇÃO DE LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

2.1 RESUMO

A agregação do solo é resultado da interação entre matéria orgânica, organismos, raízes e minerais do solo. Os sistemas de manejo são capazes de influenciar esses fatores e conseqüentemente a agregação do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência do cultivo de plantas de cobertura de inverno e de sistemas de preparo, na estabilidade e no teor de carbono orgânico dos agregados. O experimento teve início no ano de 1986 no Instituto Agronômico do Paraná, em Pato Branco, sob um Latossolo Vermelho aluminoférrico. Os tratamentos são uma combinação entre plantas de cobertura de solo: aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro, tremoço azul, trigo e pousio, e os sistemas de preparo plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), dispostos em parcelas subdivididas com três repetições. As amostras de solo foram coletadas em novembro de 2012, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Foi avaliada a estabilidade de agregados, por meio de tamisamento a úmido, o índice de diâmetro médio ponderado (DMP), a distribuição de agregados em classes de diâmetro e o teor de carbono orgânico (CO) dos agregados. A agregação do solo foi mais influenciada pelos sistemas de preparo do que pelas plantas de cobertura. O solo sob PD, em todas as camadas, apresentou maior quantidade de agregados grandes que o PC, o que refletiu em maior DMP dos agregados. As plantas de cobertura de inverno não interferiram significativamente no DMP dos agregados. O PD apresentou maior teor de CO nos agregados para as três classes de diâmetro na camada de 0-5 cm em relação ao PC. Os maiores teores de CO foram encontrados nas classes de diâmetro maior que 2 mm e também nas menores que 0,25 mm nas três camadas de solo. O PD promove melhorias à agregação do solo em relação ao PC, pois apresenta maior quantidade de agregados grandes, maior DMP e maior acúmulo de CO nos agregados.

2.2 ABSTRACT

The soil aggregation is the result of interaction between organic matter, organisms, roots and soil minerals. The management systems are able to influence these factors and consequently soil aggregation. The aim was to evaluate the influence of the winter cover crops and the tillage systems in stability and organic carbon content of the aggregates. The experiment started in 1986 at the Agronomic Institute of Paraná, in Pato Branco, in an Oxisol. The treatments are a combination of cover crops: black oat, rye, hairy vetch, common vetch, oilseed radish, blue lupine, wheat and fallow, and tillage systems no tillage (NT) and conventional tillage (CT), in split plot design with three replications. Soil samples were collected in November 2012, in layers 0-5, 5-10 and 10-20 cm. The aggregate stability were performed through wet sieving for determination of the mean weight diameter (MWD) and the aggregate distribution in

diameter classes, and also the organic carbon (OC) in the aggregate. The soil aggregation was more influenced by tillage systems than by cover crops. The soil under NT, for all layers, had higher amounts of large aggregates than CT, which resulted in higher MWD of aggregates. The winter cover crops had no significant influence on the MWD of aggregates. The NT showed higher OC content of aggregates for the three diameter classes in the 0-5 cm layer compared to the CT. The highest levels of OC were found in the diameter classes > 2 and < 0.25 mm in the three soil layers. The NT improves soil aggregation compared to the CT, because it presents greater amount of large aggregates, greater MWD and greater accumulation of OC in the aggregates.

2.3 INTRODUÇÃO

Os agregados do solo são formados pela interação entre matéria orgânica, organismos, raízes e minerais presentes no solo (SIX et al., 2002-a), e, portanto, podem ser suscetíveis aos efeitos provocados pelos sistemas de manejo do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; CALEGARI, 2006; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011; COSTA JUNIOR et al., 2012).

Em solos de clima tropical, com maior nível de intemperização, textura argilosa e com presença de argilominerais e óxidos de ferro e alumínio, a formação e estabilização dos agregados ocorre predominantemente pela forte ação cimentante dos minerais (OADES; WATERS, 1991; SIX et al., 2000). Enquanto que em solos de clima temperado, a MOS exerce um papel essencial na formação e estabilização de agregados de forma hierárquica (TISDALL; OADES, 1982).

Apesar da expressiva ação dos argilominerais e óxidos na formação e estabilização dos agregados em Latossolos argilosos, a MOS apresenta importantes efeitos de melhoria da agregação. Isto pode ser verificado no trabalho de Castro Filho et al. (1998) no qual houve correlação positiva entre o teor de carbono orgânico do solo e a percentagem de agregados nas classes 2-1 e > 2 mm, e correlação negativa com a percentagem de agregados na classe $< 0,25$ mm, para a camada de 0-10 cm em um Latossolo. Esses resultados indicam que o maior estoque de MOS promove o aumento da quantidade de agregados grandes do solo (WENDLING et al., 2005; SALTON et al., 2008; COSTA JUNIOR et al., 2011).

Em relação aos sistemas de preparo do solo, o PC, com intenso revolvimento, apresenta menor quantidade de macroagregados, pois estes são

rompidos com a mobilização frequente do solo, causando a diminuição dos estoques de MOS (MADARI et al., 2005; WENDLING et al., 2005; PORTELLA et al., 2012). No entanto, em sistemas conservacionistas como o PD com reduzida mobilização do solo e elevada adição de resíduos vegetais, há a formação de agregados mais estáveis que promovem maior proteção física da MOS (PORTELLA et al., 2012; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013).

Além do sistema de preparo de solo, as plantas cultivadas também podem interferir na agregação do solo. Da-Silva et al. (2012) verificou aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados do solo conduzido com rotação bianual de ervilhaca-milho-trigo-soja em relação a sucessão trigo-soja, indicando que a utilização de plantas de cobertura no inverno promove melhorias na agregação do solo (CAMPOS et al., 1999; CASALI, 2012).

Por outro lado, o solo deixado em pousio invernal diminui a quantidade de macroagregados, por reduzir gradativamente o estoque de CO do solo (DIEKOW et al., 2005-b). Assim, Calegari (2006) verificou que o solo sob pousio apresentou menor DMP, diferindo das plantas de cobertura, justificado pelo menor aporte de resíduos vegetais ao solo, concordando com os resultados de Campos et al. (1999).

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência do cultivo de plantas de cobertura de inverno e de sistemas de preparo do solo após 27 anos na estabilidade e no teor de carbono orgânico dos agregados do solo.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Caracterização do Experimento

O experimento está instalado na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) na cidade de Pato Branco – Paraná, localizado nas coordenadas geográficas 52° 41' W e 26° 07' S. A altitude local é de 700 m, com relevo suave ondulado e declividade com pendentes entre 4 e 7%. O clima é caracterizado como subtropical úmido, do tipo Cfb (Köppen), com verão fresco, temperatura média do mês mais quente < 22 °C e do mês mais frio > 18 °C, sem

estação seca definida, com precipitação média anual variando de 1200 a 1500 mm (CALEGARI, 2006).

O solo é classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico (EMBRAPA, 2006), com material de origem de rocha basalto, apresentando 720 g kg⁻¹ de argila, 140 g kg⁻¹ de silte e 140 g kg⁻¹ de areia. A composição mineralógica deste solo, no horizonte A (0 a 1 m), é de 680 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 1:1 (caulinita e haloisita), 132 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 2:1 (vermiculita e/ou montmorilonita), 140 g kg⁻¹ de óxidos de ferro, e 50 g kg⁻¹ de gibsita. E, no horizonte Bw (1 a 2 m), encontram-se 710 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 1:1 (caulinita e haloisita), 128 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 2:1 (vermiculita e/ou montmorilonita), 140 g kg⁻¹ de óxidos de ferro, e 20 g kg⁻¹ de gibsita (COSTA, 1996).

A vegetação nativa da região é Floresta Ombrófila Mista, a qual foi derrubada na área experimental, no ano de 1976, para o cultivo convencional de culturas anuais de milho e feijão que seguiu durante 10 anos. Em março de 1986, toda a área sofreu aração e gradagem do solo para a instalação do experimento.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial de parcelas subdivididas, com três repetições, sendo as espécies de cobertura alocadas na parcela principal (20 x 12 m) e os sistemas de preparo do solo nas subparcelas (20 x 6 m).

Os tratamentos são uma combinação de coberturas de solo e sistemas de preparo. As espécies de inverno avaliadas foram: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), centeio (*Secale cereale* L.), ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), além de uma parcela mantida em pousio no inverno. E os sistemas de preparo do solo avaliados foram o preparo convencional (PC) com uma aração e duas gradagens e o plantio direto (PD). Além das parcelas, uma área de floresta nativa (mata) foi utilizada como referência de solo sem efeitos antrópicos.

Tabela 1 – Histórico de cultivo de espécies de inverno e verão durante o período de 1986 a 2012, em experimento localizado na Estação Experimental do IAPAR Pato Branco. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Ano	Espécies de inverno	Cultura de verão
1986	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1987	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1988	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1989	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
1990	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
1991	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1992	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1993	Pousio em todas as parcelas	Soja
1994	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1995	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1996	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
1997	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1998	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1999	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
2000	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
2001	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
2002	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2003	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
2004	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2005	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
2006	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Sem cultivo
2007	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2008	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
2009	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2010	Aveia preta + ervilhaca peluda em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
2011	*Espécies previstas no delineamento experimental (aveia branca no lugar de aveia preta)	Milho
2012	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho

*Aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro, tremço e trigo.

Fonte: Adaptado de Calegari (2006) e Casali (2012).

As espécies de inverno que compõe o tratamento foram implantadas em 14 dos 27 cultivos realizados (Tabela 1). As plantas sempre foram controladas na fase de pleno florescimento através de rolo-faca (aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro e tremço azul) ou pela aplicação de

herbicidas (pousio). As parcelas com trigo foram colhidas até o ano de 1995, e seus resíduos deixados na superfície do solo ou incorporados antes da semeadura da cultura de verão, conforme os sistemas de preparo. Nos demais anos o trigo foi manejado como as demais plantas de cobertura.

Os cultivos de verão, soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea maiz* L.) receberam adubação mineral durante todos os anos, totalizando 1660 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 865 kg ha⁻¹ de K₂O e 566 kg ha⁻¹ de N. O fósforo e o potássio foram aplicados na semeadura e a aplicação de nitrogênio foi realizada apenas no milho, sendo de 1/3 da dose na semeadura e 2/3 em cobertura para cada safra. A aplicação de calcário dolomítico foi realizada em superfície, em sete momentos, totalizando 13,5 Mg ha⁻¹ (CASALI, 2012).

2.4.2 Amostragem do Solo

As amostras de solo foram coletadas em novembro de 2012, época de intervalo entre o manejo das plantas de cobertura de inverno e a introdução da cultura de verão. Foram abertas mini-trincheiras no solo para a coleta de blocos indeformados, nas camadas de solo de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, os quais foram desagregados cuidadosamente até toda a porção passar por uma peneira de 19 mm de malha (CASTRO FILHO et al., 2002; MADARI et al., 2005), armazenados e posteriormente secos ao ar em local protegido.

2.4.3 Estabilidade de Agregados do Solo

A determinação da estabilidade de agregados do solo foi realizada através de metodologia adaptada de Castro Filho et al. (1998). Foram utilizados 50 g de amostra, em duplicata, para o tamisamento via úmido, com um conjunto de peneiras de malha 8; 4; 2; 1; 0,5 e 0,25 mm. O umedecimento da amostra foi realizado por capilaridade através de um papel filtro disposto na primeira peneira do conjunto. Após 10 min de umedecimento, foi retirado o papel filtro para a agitação vertical com 30 oscilações por min, durante 15 min. Os agregados retidos em cada

peneira foram transferidos para latas com auxílio de jato de água e secados em estufa a 60 °C por 24 h para posterior quantificação da sua massa. O material menor do que 0,25 mm, que ficou disperso na água do tanque foi floculado com a adição de 50 mL de solução de sulfato de alumínio a 5% e, também secado em estufa, sendo que sua massa foi obtida pela diferença entre a massa inicial da amostra de solo e o somatório da massa das outras classes de agregados. A determinação da umidade das amostras foi realizada secando 50 g de solo em estufa a 60 °C por 48 h, para posterior correção nos cálculos dos índices.

Para o cálculo do índice de diâmetro médio ponderado (DMP) e da distribuição de agregados (AGR) em cada classe foram utilizadas as fórmulas 1 e 2, respectivamente:

$$\text{DMP} = \sum (m\text{AGR}_i * c_i) / \sum m\text{AGR}_i \quad (1)$$

Onde DMP = diâmetro médio ponderado (mm), $m\text{AGR}_i$ = massa total de agregados da classe i , $\sum m\text{AGR}_i$ = massa total de agregados das n -classes, c_i = valor médio da classe de agregado obtido por $c_i = (\text{malha superior} + \text{malha inferior}) / 2$.

$$\text{AGR} = (m\text{AGR}_i / \sum m\text{AGR}_i) * 100 \quad (2)$$

Onde AGR = distribuição de agregados por classe de diâmetro (%), $m\text{AGR}_i$ = massa total de agregados da classe i , $\sum m\text{AGR}_i$ = massa total de agregados das n -classes.

2.4.4 Carbono Orgânico nos Agregados do Solo

As amostras de solo das classes de diâmetro de agregados, 19-8; 8-4; 4-2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25 e < 0,25 mm foram utilizadas para a determinação do teor de carbono orgânico (CO). Estas foram previamente secas em estufa a 60 °C e as amostras das classes de diâmetro > 2 mm moídas em gral de porcelana.

A análise do teor de CO foi realizada pelo método adaptado de Yeomans; Bremner (1988). Uma amostra com 0,3 g foi submetida a digestão com 5 mL de uma solução de dicromato de potássio 0,167 M e 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado em bloco digestor pré-aquecido a 150 °C durante 30 min. Após o esfriamento, o conteúdo dos tubos de digestão foi transferido para erlenmeyers com utilização de água destilada até completa retirada da solução. Na sequência, foram adicionados 1 mL de ácido ortofosfórico e 5 gotas do indicador de difenilamina para a titulação com uma solução de sulfato ferroso 0,5 M. As amostras controle (branco) consistiram de 3 amostras aquecidas no bloco digestor e 3 amostras controle não aquecidas. O cálculo do teor de CO foi realizado pelas fórmulas 3 e 4:

$$\text{CO (g kg}^{-1}\text{)} = A * 0,5 * 3 * 1000 / \text{peso da amostra (mg)} \quad (3)$$

Onde 0,5 = molaridade do sulfato ferroso, 3 = relação de equivalência do carbono, 1000 = fator de diluição. Para a determinação do fator A, foi seguida a fórmula (4):

$$A = [(V_{ba} - V_{am}) (V_{bn} - V_{ba}) / V_{bn}] + (V_{ba} - V_{am}) \quad (4)$$

Onde A = volume de sulfato ferroso, V_{ba} = volume de sulfato ferroso gasto na titulação do branco aquecido, V_{am} = volume de sulfato ferroso gasto na titulação da amostra, V_{bn} = volume do sulfato ferroso gasto na titulação do branco normal, sem aquecimento.

2.4.5 Análise Estatística

Os dados foram submetidos a análise da variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa computacional Assistat.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais efeitos à agregação do solo foram encontrados para os sistemas de preparo, sendo que não houve interação significativa entre plantas de cobertura e preparos de solo. A distribuição de agregados no solo sob PC se manteve muito similar nas diferentes camadas, apresentando as maiores percentagens de agregados nas classes de diâmetro 2-1 mm e < 0,25 mm (Figura 1). Já no solo sob PD as maiores percentagens de agregados foram encontradas nas classes 4-2 e 2-1 mm. Assim, analisando todas as camadas de solo, a maior proporção de agregados encontra-se na classe 2-1 mm para o solo sob PC e na classe 4-2 mm para o solo sob PD. Considerando o efeito da profundidade do solo sobre a distribuição de agregados, embora não tratado estatisticamente como um fator, percebe-se que para o PD, houve uma diminuição do percentual dos agregados das classes 19-8 mm e 8-4 mm com o aumento da profundidade do solo (Figura 1).

Para a classe 19-8 mm, o solo sob PD apresentou 8,66% de agregados, na camada de 0-5 cm, enquanto que para o solo sob PC apenas 0,16% da massa de solo se encontrava nessa classe (Figura 1). Esse mesmo comportamento foi observado para a classe 8-4 mm na camada superficial e na camada de 5-10 cm. A quantificação de agregados por classes permite visualizar o efeito da formação e estabilização de agregados grandes em sistemas conservacionistas, como o PD, em relação ao PC, o que expressa um melhor estado de agregação do solo (MADARI et al., 2005; BARRETO et al., 2009).

Nas duas camadas superficiais, mais influenciadas pelo aporte de resíduos e pelo sistema radicular das culturas (MERTEN; MIELNICZUK, 1991; BORDIN et al., 2008), o PD apresentou maiores médias para as classes de diâmetro 19-8, 8-4 e 4-2 mm em relação ao PC (Figura 1). Esta diferença ainda se manteve para a classe 4-2 mm na camada de 10-20 cm de profundidade, embora a inversão de camada promovida pelo PC permita o depósito de material orgânico em profundidade.

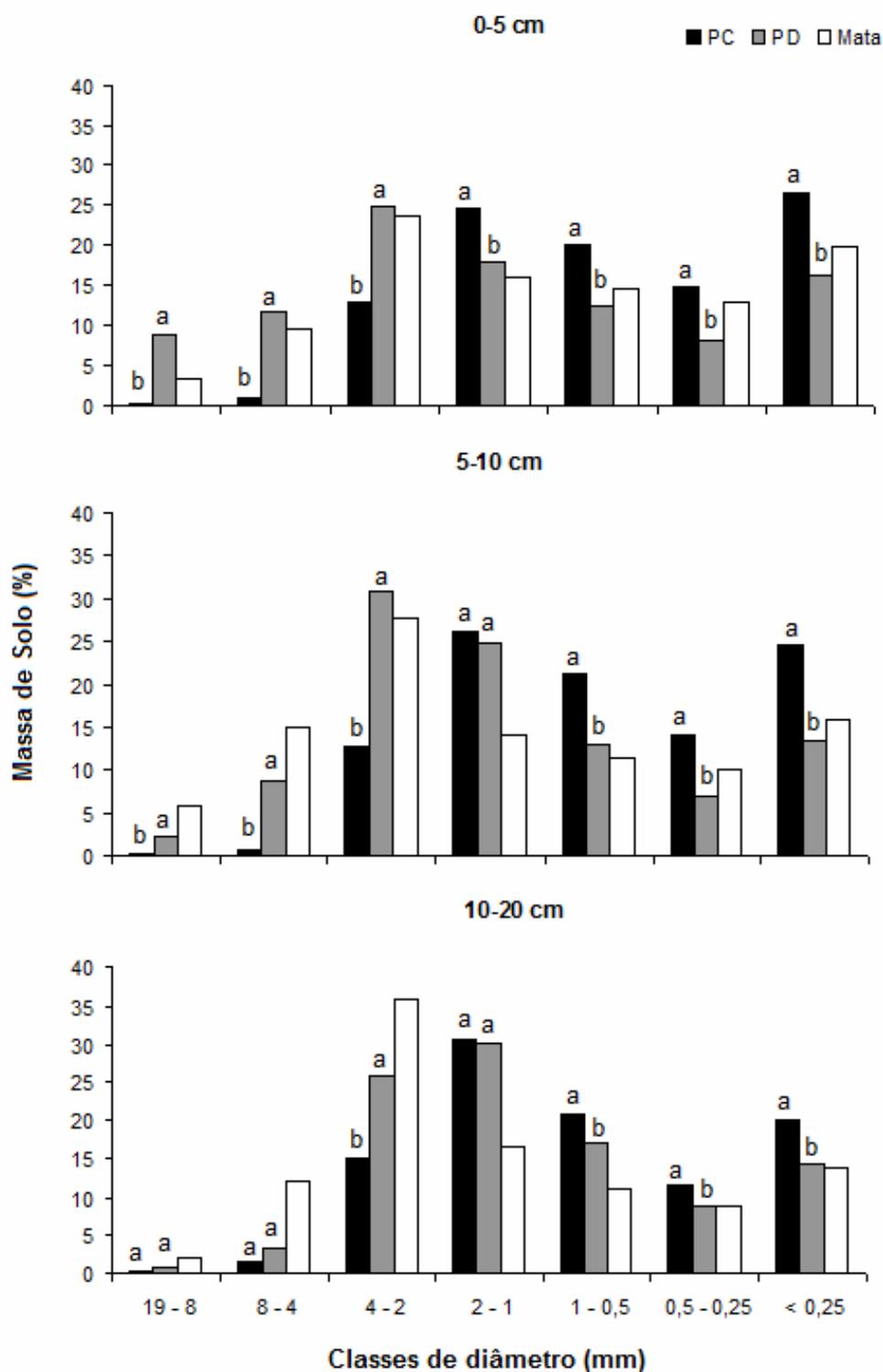


Figura 1 – Distribuição de agregados do solo por classes de diâmetros nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, para os sistemas de preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e de floresta nativa (mata). Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada camada de solo e da classe de diâmetro não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Por outro lado para o solo sob PC, as maiores médias em todas as camadas de solo, comparativamente ao solo sob PD, ocorreram para as classes de diâmetro de agregados 1-0,5, 0,5-0,25 e < 0,25 mm, sendo que somente na camada superficial, a classe 2-1 mm foi maior em relação ao PD (Figura 1). Assim, percebe-se um efeito diferencial entre os sistemas de preparo, pois enquanto o solo sob PD tende a favorecer a manutenção de agregados grandes (classes superiores a 2 mm de diâmetro), o efeito do manejo do solo em PC tende a proporcionar acúmulo de agregados de menor tamanho (agregados menores que 1 mm de diâmetro).

Com isso, as alterações na agregação do solo provocadas pelos sistemas de manejo são refletidas principalmente nos agregados de tamanho > 2 mm, os quais são influenciados positiva ou negativamente (SALTON et al., 2008; COSTA JUNIOR et al., 2012; PORTELLA et al., 2012). Dessa maneira, o efeito do PD na manutenção dos agregados grandes também pode ser observado, se considerarmos uma redistribuição dos agregados em classes de diâmetro maiores do que 2 mm, entre 2 e 0,25 mm e menores do que 0,25 mm (Tabela 2). O solo sob PD obteve maior percentagem de agregados na classe > 2 mm em comparação com o solo sob PC em todas as camadas de solo analisadas. Essa menor quantidade de agregados > 2 mm para o PC pode ser decorrente do revolvimento frequente do solo neste sistema, que promove o rompimento dos agregados grandes e a diminuição da estabilidade dos agregados formados (CASTRO FILHO et al., 1998; MADARI et al., 2005; PORTELLA et al., 2012). Além disso, a maior percentagem de agregados na classe de diâmetro 2 – 0,25 mm para o PC em relação ao PD, também indica o efeito do revolvimento, pois os agregados grandes (> 2 mm) são quebrados em agregados de tamanho inferior com a aração e a gradagem do solo, sendo que para o PC, aproximadamente 60% da massa de agregados está nesta classe.

Tabela 2 - Distribuição de agregados e carbono orgânico em classes de agregados, > 2 mm, 2-0,25 mm e < 0,25 mm, em solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e floresta nativa (mata), nas camadas de solo, 0-5, 5-10 e 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de Preparo	Distribuição de agregados			Carbono orgânico nos agregados		
	> 2 mm	2 - 0,25 mm	< 0,25 mm	> 2 mm	2 - 0,25 mm	< 0,25 mm
	----- % -----			----- g kg ⁻¹ -----		
	0-5 cm					
PC	13,88 b	59,72 a	26,40 a	28,74 b	23,49 b	25,95 b
PD	45,32 a	38,42 b	16,26 b	35,95 a	32,11 a	35,49 a
Mata	36,65	43,50	19,86	58,73	49,74	58,43
CV (%)	29,71	13,68	17,67	17,76	8,22	9,11
	5-10 cm					
PC	13,73 b	61,60 a	24,67 a	27,14 b	23,72 b	25,44 ns
PD	41,89 a	44,82 b	13,29 b	30,85 a	25,45 a	25,83
Mata	48,41	35,76	15,83	42,59	38,13	41,13
CV (%)	32,48	14,49	14,46	15,12	7,78	9,67
	10-20 cm					
PC	16,94 b	62,92 a	20,14 a	31,32 ns	23,86 ns	24,64 a
PD	29,64 a	55,93 b	14,43 b	30,44	23,06	23,30 b
Mata	49,87	36,25	13,87	30,77	25,30	26,28
CV (%)	36,42	11,76	13,19	37,23	6,72	8,33

Médias seguidas pela mesma letra dentro da classe de diâmetro, e dentro de cada camada de solo, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: médias não apresentaram diferença significativa ao teste F a 5% de probabilidade.

A maior proporção de agregados > 2 mm para o solo sob PD promoveu a diminuição da percentagem de microagregados (< 0,25 mm) em comparação ao solo sob PC, pois na média, o solo sob PD obteve aproximadamente 15% de microagregados, e o solo sob PC aproximadamente 24% de agregados < 0,25 mm (Tabela 2). Essa diminuição dos microagregados pode estar relacionada com a formação de agregados grandes através dos núcleos orgânicos, onde a interação entre resíduos orgânicos, partículas de argila e compostos orgânicos microbianos pode acarretar a formação de agregados estáveis que, em sistemas conservacionistas com mínima mobilização do solo, são estabilizados no solo por um período maior de tempo, em comparação a sistemas com revolvimento, como o PC (GOLCHIN et al., 1994; CASTRO FILHO et al., 1998; PORTELLA et al., 2012).

Além disso, para o solo sob PD observou-se maior teor de CO nos agregados nas três classes de diâmetro da camada de 0-5 cm de solo, em comparação ao solo sob PC (Tabela 2), indicando que a manutenção dos resíduos vegetais na superfície, bem como a mínima mobilização do solo permitem o maior acúmulo de MOS dentro dos agregados do solo na camada superficial (MADARI et al., 2005; CALEGARI, 2006; TIVET et al., 2013). Considerando as classes de diâmetro > 2 mm e 2 – 0,25 mm, observaram-se maiores teores de CO para os agregados do solo sob PD em relação ao solo sob PC para as camadas de 0-5 e 5-10 cm, enquanto que na camada de 10-20 cm, os teores de CO entre os sistemas foram similares. Embora no PC ocorra a adição de resíduos vegetais em profundidade, através da inversão de camada provocada pela aração, o teor de CO nos agregados foi superior ao PD apenas para os microagregados do solo, nos quais, o acúmulo de CO ocorre pelas ligações organominerais muito importantes para Latossolos com presença de óxidos de ferro e alumínio (SOLLINS et al., 1996), pois promovem a formação e estabilização destes microagregados, e também a proteção da MOS (SIX et al., 2000; DENEFF et al., 2007).

A maior quantidade de agregados grandes no solo sob PD refletiu no maior DMP dos agregados deste sistema em comparação ao solo sob PC, para todas as camadas de solo analisadas (Figura 2). A diferença mais expressiva entre os sistemas de preparo foi observada para a camada superficial, na qual o solo sob PC obteve DMP de agregados de 1,12 mm e no solo sob PD de 3,17 mm, valor 2,8

vezes maior do que o DMP dos agregados do solo sob PC. Com o aumento da profundidade do solo, houve um decréscimo do DMP dos agregados do PD. Apesar disso, o DMP dos agregados do solo sob PD foi 2,1 vezes superior para a camada de 5-10 cm e 1,3 vezes maior para a camada de 10-20 cm. Essa diferença do DMP dos agregados entre os sistemas, pode indicar o melhor estado de agregação do solo conduzido em PD. Isso também foi verificado por Portella et al. (2012) em Latossolo Vermelho distroférico, analisando PC e PD conduzidos por 20 anos. Os autores afirmam que a estabilidade do solo foi inversamente proporcional a perturbação do solo, pois a área de floresta nativa, analisada juntamente com os sistemas de preparo, obteve o maior DMP em comparação com o solo em PD e o solo em PC para todas as camadas de solo analisadas.

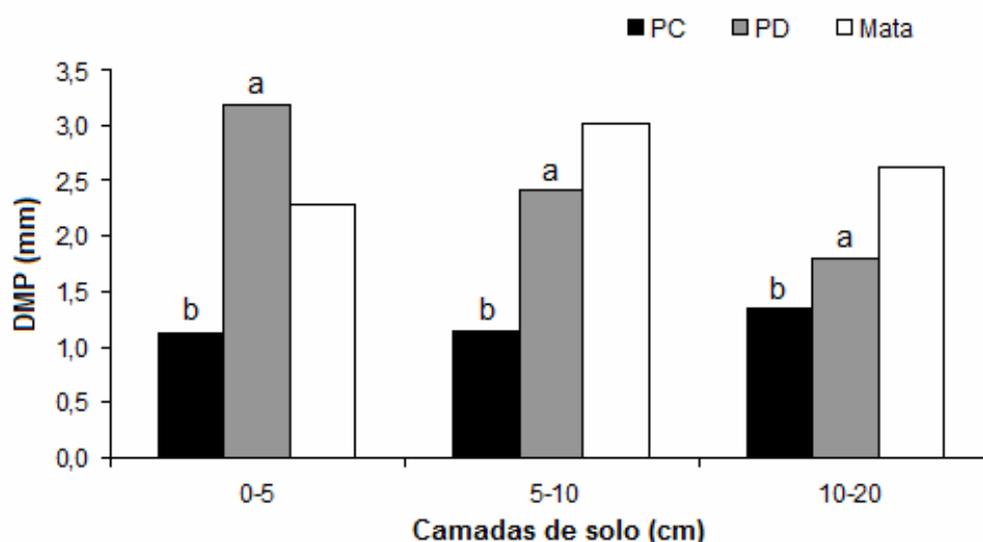


Figura 2 – Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados para os sistemas de preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e de floresta nativa (mata) em três camadas de solo. Médias seguidas pela mesma letra dentro da classe de diâmetro, e dentro de cada camada de solo, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

As plantas de cobertura expressaram seus principais efeitos na camada de 0-5 cm de solo, na qual, o solo cultivado com plantas de cobertura diferiu do solo mantido em pousio no inverno para a distribuição de agregados na classe de diâmetro > 2 mm e para o teor de CO na classe de diâmetro < 0,25 mm (Tabela 3).

Tabela 3 – Distribuição de agregados e carbono orgânico em classes de agregados, > 2 mm, 2 - 0,25 mm e < 0,25 mm, e diâmetro médio ponderado (DMP), para as coberturas de solo e área de floresta nativa (mata) nas camadas de solo 0-5, 5-10, 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Plantas de Cobertura	Distribuição de agregados			DMP	Carbono orgânico nos agregados		
	> 2 mm	2 - 0,25 mm	< 0,25 mm		> 2 mm	2 - 0,25 mm	< 0,25 mm
	----- % -----				----- g kg ⁻¹ -----		
	0-5 cm						
Aveia	29,11 ab	50,58 ns	20,31 ns	2,14 ns	33,03 ns	27,33 ns	29,59 ab
Centeio	27,50 ab	50,15	22,35	2,06	35,58	27,36	28,95 ab
Ervilhaca Comum	30,41 ab	49,09	20,50	2,18	31,62	27,68	31,18 ab
Ervilhaca Peluda	32,07 ab	47,99	19,93	2,14	30,29	28,47	32,30 ab
Nabo	31,82 ab	47,86	20,32	2,50	32,45	29,07	31,36 ab
Pousio	19,00 b	55,19	25,81	1,47	28,12	24,75	27,33 b
Tremoço	32,17 ab	45,92	21,91	2,25	36,19	29,77	34,58 a
Trigo	34,75 a	45,75	19,50	2,45	31,48	27,99	30,47 ab
Mata	36,65	43,50	19,86	2,30	58,73	49,74	58,43
CV (%)	23,54	12,65	16,14	24,47	14,52	10,29	9,49
	5-10 cm						
Aveia	33,07 ns	50,70 ns	16,23 ns	1,92 ns	29,91 ns	25,46 ns	26,38 ns
Centeio	24,83	55,39	19,78	1,63	29,01	23,63	24,97
Ervilhaca Comum	29,40	52,20	18,39	1,80	28,13	24,80	25,55
Ervilhaca Peluda	26,48	53,23	20,29	1,78	28,66	24,13	25,80
Nabo	31,21	51,28	17,51	2,00	28,48	25,04	25,57
Pousio	17,78	60,89	21,32	1,30	29,34	23,00	24,49
Tremoço	30,89	48,70	20,41	1,92	29,70	25,97	26,77
Trigo	28,80	53,32	17,88	1,90	28,73	24,66	25,56
Mata	48,41	35,76	15,83	3,03	42,59	38,13	41,13
CV (%)	28,72	12,88	14,90	24,50	18,57	13,24	12,18

(continua...)

Plantas de Cobertura	Distribuição de agregados			DMP	Carbono orgânico nos agregados		
	> 2 mm	2 - 0,25 mm	< 0,25 mm		> 2 mm	2 - 0,25 mm	< 0,25 mm
	----- % -----				----- g kg ⁻¹ -----		
	10-20 cm						
Aveia	25,21 ns	58,29 ns	16,50 ns	1,67 ns	34,83 ns	24,13 ns	25,81 ns
Centeio	28,60	55,28	16,12	1,86	28,04	21,92	21,81
Ervilhaca Comum	23,17	59,04	17,79	1,49	29,09	23,77	24,09
Ervilhaca Peluda	27,08	57,35	15,56	1,68	29,08	22,73	24,62
Nabo	21,64	60,24	18,12	1,52	32,04	23,69	23,48
Pousio	18,25	62,34	19,40	1,32	25,12	22,34	23,29
Tremoço	20,78	61,27	17,96	1,48	37,59	24,58	24,32
Trigo	21,56	61,58	16,85	1,51	31,26	24,52	24,32
Mata	49,87	36,25	13,87	2,63	30,77	25,30	26,28
CV (%)	47,19	15,41	19,94	32,26	36,49	11,51	13,92

Médias seguidas pela mesma letra dentro da classe de diâmetro, e dentro de cada camada de solo, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: médias não apresentaram diferença significativa ao teste F a 5% de probabilidade.

O cultivo de trigo como cobertura de solo proporcionou massa média de 34,75% dos agregados na classe de diâmetro > 2 mm, enquanto que o solo mantido em pousio no inverno obteve média de 19,00% de agregados > 2 mm (Tabela 3). Embora as demais plantas de cobertura não difiram do pousio percebe-se que a massa agregada na classe de diâmetro > 2 mm na média das plantas de cobertura foi aproximadamente 64% superior a massa agregada do pousio (19% versus 31%). A menor percentagem de agregados grandes (> 2 mm) para o solo mantido em pousio no inverno em comparação com o solo cultivado com o trigo, pode ser decorrente do menor aporte de resíduos vegetais ao solo durante o inverno, como verificado por Casali (2012) em trabalho no mesmo experimento.

Apesar da ausência de diferença estatística nas demais camadas do solo (Tabela 3), verificou-se uma tendência de maiores percentagens de agregados grandes (> 2 mm) para os sistemas com plantas de cobertura em relação ao pousio, e uma maior quantidade de microagregados ($< 0,25$ mm) para o pousio, indicando que a utilização de cobertura de solo, independente da espécie vegetal adotada, pode promover melhor estado de agregação do que a manutenção do solo sob vegetação espontânea no inverno (CAMPOS et al., 1999; CALEGARI, 2006). Considerando que há ainda na atualidade muitas áreas mantidas em pousio hibernal (FIORIN; SCHNELL; RUEDELL, 2007) é fundamental que sejam adotadas estratégias para inclusão de espécies de cobertura do solo nessas áreas promovendo a melhoria da qualidade do solo e propiciando condições para uma maior produtividade das culturas comerciais.

Para o índice de DMP dos agregados, não foram verificadas diferenças estatísticas entre as coberturas de solo (Tabela 3), apesar disso, houve uma tendência do solo sob pousio apresentar valor de DMP numericamente menor em relação ao solo cultivado com plantas de cobertura para todas as camadas analisadas, o que também corrobora com os resultados deste mesmo experimento encontrados por Calegari (2006). Sistemas com rotação de culturas e utilização de plantas de cobertura melhoram a qualidade estrutural do solo, trazendo benefícios como melhor resistência a penetração, maior aeração, maior taxa de infiltração de água e diminuição do escoamento superficial (DA-SILVA et al., 2012).

Em relação ao teor de CO nos agregados do solo, a classe de diâmetro de agregados < 0,25 mm apresentou diferença estatística na camada de 0-5 cm. O solo sob tremoço obteve o maior teor de CO (34,58 g kg⁻¹), diferindo do solo mantido em pousio com 27,33 g kg⁻¹ (Tabela 3). Em avaliação deste mesmo experimento Casali (2012) verificou que o pousio foi o tratamento com menor produção de resíduos vegetais em relação as plantas de cobertura, resultando em menor teor de CO nas classes de agregados na camada superficial. O maior teor de CO nos microagregados para o tremoço que não diferiu das demais plantas de cobertura indica que o cultivo no inverno de espécies destinadas a cobertura do solo foi favorável a estabilização dos microagregados e a proteção do CO presente nos agregados (SIX et al., 2000; DENEFF et al., 2007).

O solo sob floresta nativa, utilizado como uma referência neste estudo, expressa a condição de agregação natural do solo, na qual, pode-se observar a elevada quantidade de agregados grandes estáveis, refletida pelo índice de DMP dos agregados (Figura 2), além dos elevados teores de CO nos agregados (Tabela 2, Tabela 3). Embora o solo sob floresta nativa não tenha sido comparado estatisticamente com os tratamentos deste estudo, o valor de DMP foi numericamente superior ao DMP dos solos sob sistemas de manejo agrícolas para as camadas de solo de 5-10 e 10-20 cm. Além disso, o solo sob floresta nativa obteve os maiores teores de CO para as três classes de diâmetro de agregados nas camadas de 0-5 e 5-10 cm em relação ao PC e PD (Tabela 2) o que também foi verificado na comparação com as coberturas do solo (Tabela 3). Dessa maneira, o contínuo aporte de resíduos orgânicos ao solo sob mata e a preservação do solo sem distúrbios promove o maior acúmulo de CO, principalmente na camada superficial (BARRETO et al., 2009; PORTELLA et al., 2012).

2.6 CONCLUSÕES

O plantio direto promove aumento na agregação dos agregados grandes do solo em relação ao preparo convencional, pois apresenta maior quantidade de agregados maiores do que 2 mm no solo. Enquanto que, o preparo

convencional apresenta predomínio de agregados pequenos no solo, com maior quantidade de agregados nas classes de diâmetro menores do que 2 mm.

O plantio direto promove maior acúmulo de carbono orgânico nos agregados para as camadas de 0-5 cm e 5-10 cm em relação ao preparo convencional que somente possui maior teor de carbono orgânico nos microagregados na camada de 10-20 cm.

O solo cultivado com plantas de cobertura tende a acumular agregados grandes em comparação ao solo sob pousio principalmente na camada superficial.

O diâmetro médio ponderado dos agregados do solo sob plantio direto foi superior ao dos agregados do solo sob preparo convencional em todas as camadas estudadas.

3 CAPÍTULO II – FRACIONAMENTO DENSIMÉTRICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DE LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTAS DE COBERTURA E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

3.1 RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) tem relação com os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, e por isso, sofre alterações pelos sistemas de manejo adotados no solo, e essas alterações podem ser verificadas no estoque de carbono (C) no solo e nas frações físicas da MOS. O objetivo do estudo foi avaliar a influência do cultivo de plantas de cobertura de inverno e de sistemas de preparo do solo no estoque de carbono no solo e nas frações físicas da matéria orgânica. O experimento teve início no ano de 1986 no Instituto Agrônomo do Paraná, em Pato Branco, sob um Latossolo Vermelho aluminoférrico. Os tratamentos analisados neste estudo são uma combinação entre plantas de cobertura de solo aveia preta, nabo forrageiro e pousio, e sistemas de preparo plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), dispostos em parcelas subdivididas com três repetições. As amostras de solo foram coletadas em novembro de 2012, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Foi realizado o fracionamento densimétrico da MOS para obtenção das frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO). Os teores de C do solo integral, da FLL e da FLO foram analisados por combustão seca, sendo o C da fração pesada (FP) obtido por diferença. Foram calculados o estoque de C do solo e das frações da MOS e o índice de manejo do carbono (IMC). O PD apresentou maior estoque de C no solo, na FLL e na FLO para a camada de 0-5 cm em relação ao PC. Entre as plantas de cobertura, o solo cultivado com nabo obteve o maior estoque de C para a FLL na camada superficial. A FP da MOS foi a que promoveu acúmulo superior de C para todos os sistemas analisados e nas camadas de solo. O PD promove maior estoque de C no solo e maior IMC em comparação com o PC, pois permite maior ação dos mecanismos de proteção da MOS.

3.2 ABSTRACT

The soil organic matter (SOM) is related to the physical, chemical and biological soil properties, and therefore, it is modified by soil managements, and these changes can be verified by the stock of carbon (C) in soil and physical fractions of SOM. The aim of this study was to evaluate the influence of winter cover crops and the tillage systems in carbon stock in soil and organic matter physical fractions. The experiment started in 1986 at the Agronomic Institute of Paraná, in Pato Branco, in an Oxisol. The treatments are a combination of cover crops black oat, oilseed radish and fallow, and tillage systems no tillage (NT) and conventional tillage (CT), in split plot design with three replications. Soil samples were collected in November 2012, in layers 0-5, 5-10 and 10-20 cm. The density fractionation of SOM to obtain the free particulate organic matter (free-POM) and occluded particulate organic matter (occluded-POM) was performed. The concentration of C in soil and in free-POM and occluded-POM

were analyzed by dry combustion, but the C concentration in mineral-associated organic matter (min-OM) was obtained by calculating the difference. The stock of C in soil and fractions of SOM and carbon management index (CMI) were calculated. The NT had higher C stocks in soil, free-POM and occluded-POM to 0-5 cm compared to CT. And for winter cover crops, the soil with radish had the highest C stock for the free-POM in the surface layer. The min-OM promoted greater accumulation of C for all analyzed systems and soil layers. The NT promotes greater carbon storage in soil and higher CMI compared to the CT, and it enables greater protection mechanisms of action of SOM.

3.3 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS), composta predominantemente de todo o carbono orgânico (CO) presente no solo (ROSCOE; MACHADO, 2002), está relacionada com a maioria dos atributos do solo e do ambiente (MIELNICZUK, 2008). Portanto, o sistema de manejo, as condições climáticas e o tipo de solo interferem no estoque de C do solo, pois atuam tanto nos processos de adição e perda de MOS, como na estabilização desta no solo (ZOTARELLI et al., 2007), que pode ocorrer por três mecanismos de proteção sendo eles, recalitrância molecular, interação organomineral e proteção física (SOLLINS et al., 1996; SIX et al., 2002-b). A recalitrância molecular protege a MOS através da resistência dos compostos moleculares a decomposição microbiana (SOLLINS et al., 1996; BAYER et al., 2006), já a interação organomineral através da forte interação da MOS com minerais (SOLLINS et al., 1996; CONCEIÇÃO, 2006), e a proteção física, pela inacessibilidade dos microrganismos a MOS oclusa nos agregados (SOLLINS et al., 1996; BAYER et al., 2006).

A interação organomineral pode ser o principal mecanismo de proteção e estabilização da MOS em solos tropicais e subtropicais, pelo maior estoque de C na fração da MOS associada a minerais, como encontrado por Tomazi (2008), Rosa et al. (2011) e Santos et al. (2013). Apesar disso, Conceição; Dieckow; Bayer (2013) afirmam que a proteção física também é muito importante para a estabilização da MOS, principalmente em sistemas conservacionistas.

Para o solo sob PD a oclusão tem grande importância na estabilização e acúmulo de C se comparado ao solo sob PC (SIX et al., 2000), e este maior acúmulo de C pode ocorrer devido a menor taxa de *turnover* dos macroagregados

do solo. Os fragmentos de resíduos vegetais aprisionados dentro dos macroagregados em solo sob PD tem maior tempo de permanência e interação com os microagregados e com as partículas minerais do solo. Diferente do que ocorre no solo sob PC, no qual o revolvimento promove o rompimento dos macroagregados liberando a MOS e tornando-a acessível à decomposição pelos microrganismos (SIX et al., 2000; ZOTARELLI et al., 2007).

O estudo dos mecanismos de proteção da MOS pode ser realizado pelo fracionamento densimétrico da MOS, o qual se baseia na diferença de densidade entre a fração orgânica e a mineral, separando as frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP), através de dispersão e separação de partículas (GOLCHIN et al., 1994; ROSCOE; MACHADO, 2002; CONCEIÇÃO et al., 2008).

Os sistemas de manejo afetam de maneira mais imediata a FLL da MOS, devido a sua menor proteção e conseqüente maior acessibilidade aos organismos decompositores (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2002; PINHEIRO et al., 2004). Mas também podem interferir na FLO da MOS, pois esta está localizada no interior dos agregados do solo, que se rompidos podem expor a MOS aos processos de decomposição (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2002; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). A FP corresponde a MOS associada aos minerais do solo e de maior estabilidade, pois esta relacionada a textura do solo (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2002; SANTOS et al., 2013).

Em relação a isso, Conceição et al. (2008) demonstrou que os teores e os estoques de C na FLL da MOS para o solo sob PD foram mais elevados em comparação com o solo sob PC, na camada superficial do solo, enquanto que na profundidade de 10-20 cm, Freixo et al. (2002) encontraram resultados indicando maiores teores de C na FLL para o PC em relação ao PD, o que pode ser devido a prática de revolvimento do solo e incorporação dos resíduos vegetais.

A cobertura vegetal com gramíneas e o mínimo revolvimento do solo geraram maior quantidade de C nas frações leves da MOS em relação aos sistemas com menor aporte de resíduos e algum tipo de revolvimento no solo, em trabalho realizado por Pinheiro et al. (2004). E quanto a FLO, a maior estabilidade de agregados do solo, que pode ser proveniente do maior acúmulo de material vegetal

em sistemas conservacionistas, como o PD, ocasiona maior teor de C na FLO (CONCEIÇÃO et al., 2008) e maior estoque de C na FLO (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013) em relação ao PC e a FLL da MOS.

Para avaliar a qualidade dos sistemas de manejo agrícolas pode se utilizar o índice de manejo de carbono (IMC), o qual relaciona a quantidade e a qualidade de C no solo, através do índice de estoque de carbono (IEC) e do índice de labilidade de carbono (ILC) (BLAIR et al., 1995; DIEKOW et al., 2005-a; CONCEIÇÃO et al., 2014).

Avaliando sistemas de culturas e adubação nitrogenada em Argissolo, Diekow et al. (2005-a) verificaram que o solo cultivado com guandu e milho sob PD com adubação nitrogenada obtiveram IEC, ILC e IMC de 1,34, 1,91 e 256, respectivamente, superiores aos índices do solo descoberto e da sucessão aveia/milho, afirmando que sistemas em PD com cultivo de leguminosas e alto aporte de resíduos vegetais ao solo são estratégias apropriadas para elevar os estoques de C e nitrogênio no solo.

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência do cultivo de plantas de cobertura e de sistemas de preparo do solo após 27 anos, no estoque de carbono no solo e nas frações físicas da matéria orgânica.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Caracterização do Experimento

O experimento está instalado na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) na cidade de Pato Branco – Paraná, localizado nas coordenadas geográficas 52° 41' W e 26° 07' S. A altitude local é de 700 m, com relevo suave ondulado e declividade com pendentes entre 4 e 7%. O clima é caracterizado como subtropical úmido, do tipo Cfb (Köppen), com verão fresco, temperatura média do mês mais quente < 22 °C e do mês mais frio > 18 °C, sem estação seca definida, com precipitação média anual variando de 1200 a 1500 mm (CALEGARI, 2006).

O solo é classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico (EMBRAPA, 2006), com material de origem de rocha basalto, apresentando 720 g kg⁻¹ de argila, 140 g kg⁻¹ de silte e 140 g kg⁻¹ de areia. A composição mineralógica deste solo, no horizonte A (0 a 1 m), é de 680 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 1:1 (caulinita e haloisita), 132 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 2:1 (vermiculita e/ou montmorilonita), 140 g kg⁻¹ de óxidos de ferro, e 50 g kg⁻¹ de gibsita. E, no horizonte Bw (1 a 2 m), encontram-se 710 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 1:1 (caulinita e haloisita), 128 g kg⁻¹ de argilominerais silicatados 2:1 (vermiculita e/ou montmorilonita), 140 g kg⁻¹ de óxidos de ferro, e 20 g kg⁻¹ de gibsita (COSTA, 1996).

A vegetação nativa da região é Floresta Ombrófila Mista, a qual foi derrubada na área experimental, no ano de 1976, para início do cultivo convencional de culturas anuais de milho e feijão, que seguiu por 10 anos. Em março de 1986, toda a área sofreu aração e gradagem do solo para a instalação do experimento.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial de parcelas subdivididas, com três repetições, sendo as espécies de cobertura alocadas na parcela principal (20 x 12 m) e os sistemas de preparo do solo nas subparcelas (20 x 6 m). Os tratamentos do experimento são uma combinação de plantas de cobertura de solo e sistemas de preparo. As espécies de inverno avaliadas neste estudo foram aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), além de uma parcela mantida em pousio no inverno. E os sistemas de preparo do solo avaliados foram o PC com uma aração e duas gradagens e o PD. Além das parcelas, uma área de floresta nativa (mata) foi utilizada como referência de solo sem efeitos antrópicos.

As espécies de inverno foram implantadas em 14 dos 27 cultivos realizados (Tabela 4) e estas sempre foram controladas na fase de pleno florescimento através de rolo-faca ou pela aplicação de herbicidas (pousio). Os cultivos de verão, soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea maiz* L.) receberam adubação mineral durante todos os anos, totalizando 1660 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 865 kg ha⁻¹ de K₂O e 566 kg ha⁻¹ de N. O fósforo e o potássio foram aplicados na semeadura e a aplicação de nitrogênio foi realizada apenas no milho, sendo de 1/3 da dose na semeadura e 2/3 em cobertura para cada safra. A aplicação de calcário dolomítico foi realizada em superfície, em sete momentos, totalizando 13,5 Mg ha⁻¹.

Tabela 4 – Histórico de cultivo de espécies de inverno e verão durante o período de 1986 a 2012, em experimento localizado na Estação Experimental do IAPAR Pato Branco. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Ano	Espécies de inverno	Cultura de verão
1986	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1987	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1988	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1989	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
1990	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
1991	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1992	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1993	Pousio em todas as parcelas	Soja
1994	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
1995	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1996	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
1997	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1998	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1999	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
2000	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
2001	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
2002	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2003	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
2004	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2005	*Espécies previstas no delineamento experimental	Soja
2006	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Sem cultivo
2007	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2008	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho
2009	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2010	Aveia preta + ervilhaca peluda em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
2011	*Espécies previstas no delineamento experimental (aveia branca no lugar de aveia preta)	Milho
2012	*Espécies previstas no delineamento experimental	Milho

*Aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro, tremoço e trigo

Fonte: Adaptado de Calegari (2006) e Casali (2012).

3.4.2 Amostragem do Solo

As amostras de solo foram coletadas em novembro de 2012, época de intervalo entre o manejo das plantas de cobertura de inverno e a introdução da cultura de verão. Foram abertas mini-trincheiras no solo para a coleta de blocos indeformados, nas camadas de solo de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, os quais foram desagregados cuidadosamente até toda a porção passar por uma peneira de 19 mm de malha (CASTRO FILHO et al., 2002; MADARI et al., 2005), armazenados e posteriormente secos ao ar em local protegido.

3.4.3 Fracionamento Densimétrico da Matéria Orgânica do Solo

O fracionamento densimétrico da MOS foi realizado, mediante metodologia descrita por Conceição et al. (2008) adaptada para o tamanho de agregados deste estudo.

Uma amostra de 10 g de solo com granulometria < 19 mm foi adicionada a um tubo de centrífuga de 100 mL juntamente com 80 mL de solução de politungstato de sódio [$\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40})$], com densidade de $2,0 \text{ g cm}^{-3}$ (CONCEIÇÃO et al., 2007). O tubo de centrífuga foi fechado com rolha e invertido lenta e manualmente por cinco vezes, para a liberação da FLL, sem que ocorresse o rompimento dos agregados. A suspensão foi centrifugada a 1591 g por 45 min, e o sobrenadante com a FLL foi filtrado, sob vácuo, em filtro Whatman GF/C, previamente quantificado quanto a sua massa. Após, o conjunto filtro + FLL foi lavado com água destilada para remoção do excesso de PTS, seco em estufa a 50°C por 24 h e quantificado sua massa. Para obter a FLO, a solução de PTS retornou ao tubo de centrífuga que continha o *pellet*, que foi suspenso novamente e submetido a dispersão com ultra-som, mediante energia de 1212 J mL^{-1} , sendo este o nível de energia de máxima dispersão deste solo em partículas primárias obtido conforme previsto por Inda Junior et al. (2007). Após a dispersão, a suspensão foi novamente centrifugada a 1414 g por 60 min, e posteriormente filtrada

sob vácuo para obtenção da FLO, sendo o conjunto filtro + FLO lavado com água destilada e secado em estufa a 50 °C por 24 h para determinação de sua massa.

3.4.4 Estoque de Carbono

As concentrações de C nas frações da MOS, FLL e FLO, e também nas amostras de solo integral, foram determinadas pelo método de combustão seca em analisador elementar CHNS Euro Vector EA3000 (Apêndice A). O teor de C da FP foi calculado pela diferença entre o C orgânico total do solo integral (COT) e o C da FLL + FLO. A densidade do solo foi determinada através de amostras indeformadas de solo coletadas em anéis volumétricos metálicos de 4,0 cm de altura e 5,6 cm de diâmetro (Apêndice B).

Os estoques de C nas frações da MOS e no solo foram calculados por camada equivalente de solo, utilizando a fórmula 5:

$$E = C \times Ds \times e \times 10 \quad (5)$$

Onde, E = estoque de C na camada de solo ($Mg \text{ ha}^{-1}$); C = concentração de C ($g \text{ kg}^{-1}$); Ds = densidade do solo ($g \text{ dm}^{-3}$); e = espessura da camada de solo analisada (m); 10 = fator de correção de unidades.

3.4.5 Índice de Manejo do Carbono

Para o cálculo do índice de manejo do carbono (IMC), descrito por Blair et al. (1995), foram utilizados os estoques de C do solo e das frações da MOS obtidas pelo fracionamento densimétrico de solo da camada de 0-20 cm, segundo adaptação de Conceição et al. (2014). Como referência foi utilizada a floresta nativa (mata). O cálculo do IMC foi realizado através da fórmula 6:

$$IMC = IEC \times ILC \times 100 \quad (6)$$

Onde: IEC = índice de estoque de C do tratamento avaliado, o qual é calculado pela fórmula 7; ILC = índice de labilidade do C, que é calculado pela fórmula 8.

$$\text{IEC} = \text{estoque de C do tratamento} / \text{estoque de C da referência} \quad (7)$$

$$\text{ILC} = \text{LC do tratamento} / \text{LC da referência} \quad (8)$$

Onde, o LC é a labilidade do carbono, que é calculado pela fórmula 9.

$$\text{LC} = \text{C lábil} / \text{C não lábil} \quad (9)$$

Onde, o C lábil = estoque de C na FLL e FLO; C não lábil = estoque de C na FP.

3.4.6 Análise Estatística

Os dados foram submetidos a análise da variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa computacional Assistat.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os efeitos ao estoque de C do solo, calculado através da concentração de C (Apêndice A) e da densidade da camada de solo (Apêndice B), foram mais pronunciados para a camada de 0-5 cm e para os sistemas de preparo do solo, sendo que não ocorreu interação significativa entre preparos e plantas de cobertura. Nesta camada, o solo sob PD apresentou médias superiores ao solo sob PC para o estoque de COT e C das frações leves (FLL e FLO) da MOS (Tabela 5). O incremento ao estoque de COT promovido pelo PD em comparação com o PC, na camada de 0-5 cm, foi de 4,98 Mg ha⁻¹, enquanto que nas camadas de 5-10 e 10-20 cm não foram verificadas diferenças entre os sistemas de preparo para os estoques

de COT após 27 anos de cultivo. Assim, o maior estoque de COT na camada superficial promovido pelo PD ocorre possivelmente pela deposição dos resíduos vegetais na superfície, diferentemente do PC, no qual a incorporação dos resíduos promove a homogeneização da quantidade de C na camada arável (FREIXO et al., 2002; ZANATTA et al., 2007; CALEGARI et al., 2008; DIECKOW et al.; 2009).

Ainda na camada de 0-5 cm foi verificada a maior proporção das frações leves em relação ao COT (FLL/COT e FLO/COT) que somaram 11,34% para o PC e 15,64% para o PD (Tabela 5) indicando que a ausência de revolvimento do solo, no PD, pode aumentar o estoque de C nas frações leves da MOS (TOMAZI, 2008), principalmente na FLO (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013).

Considerando as frações leves da MOS, o estoque de C da FLO foi numericamente superior ao estoque de C da FLL para os dois sistemas de preparo nas camadas de solo analisada (Tabela 5, Tabela 6), pois, na FLL a proteção da MOS ocorre apenas pela recalcitrância, enquanto que na FLO a MOS é protegida por dois mecanismos, pela recalcitrância e principalmente pela oclusão. A proteção da MOS pela oclusão ocorre através dos macroagregados que mantêm a FLO em seu interior, atuando como uma barreira física a ação dos microrganismos, sendo que este mecanismo de proteção é diretamente influenciado pelos sistemas de preparo que afetam a agregação do solo (PINHEIRO et al., 2004; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). Com isso, em sistemas conservacionistas, como o PD, a maior estabilidade dos macroagregados pode promover a oclusão da MOS e o acúmulo de C, o que foi observado na camada superficial, na qual o solo sob PD obteve maior estoque de C na FLO em comparação ao solo sob PC. Além disso, a oclusão da MOS permite que o C acumulado seja estabilizado com o passar do tempo através da interação organomineral, e se acumule nos microagregados do solo (SIX et al., 2000; ZOTARELLI et al., 2007).

Apesar disso, o comportamento do solo sob floresta nativa quanto as frações leves da MOS foi diferente, pois na camada de 0-5 cm o estoque de C na FLL foi superior ao estoque de C da FLO. Em conjunto, as frações leves da MOS (FLL e FLO) representam 33,43% do COT deste solo na camada superficial (Tabela 5), o que é reduzido com o aumento da profundidade, apresentando, na camada de

10-20 cm, estoque de C nas frações leves de 7,72% do COT (Tabela 6), similares aos solos sob sistemas agrícolas.

Os efeitos das plantas de cobertura sobre os estoques de C também foram mais expressivos na camada de 0-5 cm, na qual, para a FLL da MOS, o solo cultivado com nabo apresentou maior estoque de C em relação ao solo sob cultivo de aveia e o solo mantido em pousio hiberna (Tabela 5). Considerando a proporção FLL/COT o solo cultivado com nabo obteve 7,17%, do estoque de COT como estoque de C na FLL, valor este numericamente superior ao do solo cultivado com aveia e do solo mantido em pousio (3,97% e 4,49%, respectivamente). Analisando a FLL e a FLO em conjunto, os estoques de C na camada superficial corresponderam a 11,57, 16,90 e 12,00% do estoque de COT para aveia, nabo e pousio, respectivamente (Tabela 5).

Os efeitos específicos de cada planta de cobertura ao estoque de C no solo e nas frações da MOS podem ter sido mascarados pelo histórico de cultivo do experimento (Tabela 4), no qual dos 27 anos de condução, em 14 anos as parcelas com as espécies de cobertura de solo no inverno, previstas originalmente como tratamentos, foram cultivadas. E, nos 13 anos com o cultivo em área total, com exceção das parcelas de pousio, a aveia esteve presente em 12 anos, sendo cultivada em consórcio com nabo em 5 anos e cultivada solteira em 6 anos. Apesar disso, nos dois invernos anteriores a coleta (2011 e 2012) as parcelas previstas originalmente como tratamentos foram mantidas. Contudo, a falta de adição contínua de resíduos da mesma espécie nas parcelas pode ter influenciado numa uniformização dos efeitos das plantas de cobertura nabo e aveia, dificultando a visualização dos efeitos na agregação e no estoque de C.

Mas, apesar disso, o estoque de C na FLO da MOS, na camada de 10-20 cm de solo, apresentou interação significativa entre os sistemas de preparo e plantas de cobertura (Tabela 6). Pois, o solo sob cobertura de aveia e nabo obteve estoques de C muito similares para o PC e PD, enquanto que o solo em pousio apresentou estoques de C na FLO de 3,53 Mg ha⁻¹ para o PC e 1,77 Mg ha⁻¹ para o PD.

Tabela 5 - Estoque de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), pesada (FP), e no solo (COT), e relações de cada fração com o COT, em solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e plantas de cobertura, além de floresta nativa (mata), nas camadas de solo, 0-5 e 5-10 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de manejo	FLL	FLO	FP	COT	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
	----- Mg ha ⁻¹ -----				----- % -----		
0-5 cm							
Sistemas de preparo							
PC	0,79 b	1,39 b	18,59 ns	20,77 b	4,13	7,21	88,66
PD	1,56 a	2,34 a	21,85	25,75 a	6,30	9,34	84,36
CV (%)	35,72	21,11	18,03	14,55			
Plantas de cobertura							
Aveia	0,96 b	1,82 ns	21,68 ns	24,46 ns	3,97	7,60	88,44
Nabo	1,46 a	1,91	16,89	20,26	7,17	9,73	83,10
Pousio	1,11 b	1,86	22,09	25,06	4,49	7,51	88,00
CV (%)	11,64	17,80	26,20	25,81			
Mata	4,11	3,03	14,91	22,04	19,31	14,12	66,57
5-10 cm							
Sistemas de preparo							
PC	0,72 ns	1,45 ns	20,10 ns	22,27 ns	3,74	7,00	89,25
PD	0,41	1,53	22,50	24,44	1,70	6,28	92,02
CV (%)	56,87	15,74	18,08	15,68			
Plantas de cobertura							
Aveia	0,46 ns	1,48 ns	23,19 ns	25,13 ns	1,93	6,02	92,05
Nabo	0,70	1,60	19,14	21,45	3,67	7,65	88,68
Pousio	0,53	1,38	21,57	23,48	2,57	6,25	91,18
CV (%)	25,80	23,29	36,62	33,54			
Mata	0,99	1,70	16,89	19,58	5,19	8,85	85,96

Médias seguidas pela mesma letra comparando os sistemas de preparo e as plantas de cobertura, em cada camada de solo, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: médias não apresentaram diferença significativa ao teste F a 5% de probabilidade.

Tabela 6 - Estoque de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), pesada (FP), e no solo (COT), e relações de cada fração com o COT, em solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e plantas de cobertura, além de floresta nativa (mata), na camada de solo de 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de manejo		FLL	FLO	FP	COT	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		----- Mg ha ⁻¹ -----				----- % -----		
		10-20 cm						
Sistemas de preparo								
	PC	0,98 ns	2,99 *	47,39 ns	51,36 ns	2,00	6,42	91,58
	PD	0,78	2,32	49,70	52,80	1,50	4,59	93,91
	CV (%)	49,49	35,26	34,73	33,20			
Plantas de cobertura								
	Aveia	0,69 ns	2,48 *	54,47 ns	57,64 ns	1,36	4,68	93,96
	Nabo	1,09	2,84	45,29	49,22	2,19	6,07	91,74
	Pousio	0,85	2,65	45,88	49,38	1,71	5,76	92,53
	CV (%)	101,09	19,27	19,00	17,33			
	Mata	1,08	1,52	32,98	35,58	3,18	4,54	92,29
PC	Aveia	0,55 ns	2,45 aA	54,38 ns	57,37 ns	1,02	4,60	94,38
	Nabo	1,07	2,99 aA	39,42	43,48	2,47	7,24	90,29
	Pousio	1,31	3,53 aA	48,39	53,23	2,52	7,41	90,07
PD	Aveia	0,84 ns	2,51 aA	54,56 ns	57,91 ns	1,70	4,76	93,54
	Nabo	1,10	2,69 aA	51,17	54,97	1,91	4,90	93,19
	Pousio	0,39	1,77 aB	43,37	45,52	0,90	4,11	94,99

ns: médias não apresentaram diferença significativa ao teste F a 5% de probabilidade.

* médias apresentaram interação significativa entre os fatores sistemas de preparo e plantas de cobertura.

Médias seguidas pela mesma letra minúscula comparando as plantas de cobertura e letra maiúscula comparando os sistemas de preparo, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A incorporação dos resíduos vegetais através da aração no PC pode ter provocado o maior estoque de C na FLO no solo sob pousio em relação ao PD, pois o revolvimento permite o acúmulo de MOS nas camadas inferiores do solo, contrário ao PD, no qual a MOS concentra-se nas camadas superiores. Em relação a isso, Freixo et al. (2002), avaliando um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, verificaram maior estoque de C no solo sob PC em relação ao solo sob PD na camada de 10-20 cm, e, além disso, os autores obtiveram maiores teores de C da FLO, e também da FLL, no PC em relação ao PD, para o sistema de rotação de culturas com pousio de inverno.

A maior proteção da MOS por oclusão no pousio em PC pode ter ocorrido pela elevada presença de agregados das classes de diâmetro menor do que 2 mm (2 – 0,25 mm e < 0,25 mm) como observado no estudo anterior (Tabela 3). Estes agregados são menos afetados pelo revolvimento do solo e por isso podem ter permitido o acúmulo de MOS no seu interior.

O mais expressivo mecanismo de proteção da MOS observado para o solo analisado foi a interação organomineral, pois o maior estoque de C foi obtido na FP, para todos os sistemas de manejo e as camadas de solo. A relação FP/COT, que expressa o quanto do C total está interagindo com a fração mineral, na camada de 10-20 cm foi mais de 90% do estoque de C do solo (Tabela 5). Contudo, o incremento ao estoque de C na camada de solo de 0-5 cm promovido pelo PD, indica que os sistemas conservacionistas podem elevar o estoque de C do solo nas frações leves da MOS, as quais são importantes para o fornecimento de nutrientes as plantas e energia aos microrganismos, formação de agregados e CTC do solo (MIELNICZUK, 2008).

Quando analisado em termos relativos quanto cada fração contribuiu para os estoques totais de C, em função dos sistemas de manejo adotado, verifica-se que houve incremento no estoque de C promovido pelo PD em relação ao PC de $4,97 \text{ Mg ha}^{-1}$, na camada de 0-5 cm (Tabela 7), enquanto que, considerando a camada de 0-20 cm, este incremento foi de $8,59 \text{ Mg ha}^{-1}$. Dessa variação entre os sistemas de preparo a maior parte se acumulou na FP da MOS, sendo $3,26$ e $7,96 \text{ Mg ha}^{-1}$, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm respectivamente.

Este incremento ao estoque de C do solo em PD em relação ao PC ocorreu em todas as frações da MOS, sendo mais expressivo na FP, a qual representou 65,45% do incremento do estoque de C na camada de 0-5 cm, enquanto que a FLL contribuiu com 15,51% e a FLO com 19,04% nesta camada (Tabela 7). Enquanto que, considerando os 20 cm de profundidade do solo, 92,64% da variação do estoque de C entre o PD e o PC ocorreu na FP da MOS.

Tabela 7 – Relação entre estoque de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP) e no solo (COT) entre os sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), e entre as camadas 0-5 e 0-20 cm do solo. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de preparo	FLL	FLO	FP	COT
0-5 cm				
----- Mg ha ⁻¹ -----				
PC	0,79	1,39	18,59	20,77
PD	1,56	2,34	21,85	25,75
PD-PC (Δ)	0,77	0,95	3,26	4,97
(Δ fração/ Δ COT) (%)	15,51	19,04	65,45	
0-20 cm				
----- Mg ha ⁻¹ -----				
PC	2,48	5,83	86,09	94,40
PD	2,75	6,19	94,05	102,99
PD-PC (Δ)	0,27	0,36	7,96	8,59
(Δ fração/ Δ COT) (%)	3,11	4,25	92,64	
C 0-5 cm / C 0-20 cm				
----- % -----				
PC	31,85	23,84	21,60	22,01
PD	56,79	37,74	23,23	25,00

Relacionando as camadas de solo, a distribuição do estoque de COT no perfil do solo foi similar para os sistemas de preparo, pois no solo sob PC a camada de 0-5 cm representou 22,01% do estoque de COT em 0-20 cm, e para o solo sob PD este valor foi de 25,00% (Tabela 7). Contudo, a proporção de como o estoque de C está distribuído entre as diferentes frações da MOS foi diferenciada para os sistemas de preparo, pois sob PD, 56,79% do estoque de C da FLL da MOS nos 0-20 cm de solo estão na camada de 0-5 cm, sendo que, sob PC esse percentual é de 31,85%. Isto indica o elevado acúmulo de fração leve da MOS na

camada superficial do solo, condição natural para um sistema que deposita a palhada em superfície e não ocorre a incorporação da mesma ao solo. Na FLO da MOS também foi observada a maior representação da camada de 0-5 cm nos 20 cm de solo analisados na comparação dos sistemas, pois o estoque de C na camada de 0-5 cm representou 37,74% para o PD e 23,84% para o PC, em relação ao estoque de C desta fração que ocorre na camada de 0-20 cm.

O PD promoveu um incremento nos estoques de C do solo, mais expressivo na camada superficial, decorrente da manutenção do material vegetal na superfície do solo, o que acarreta também maior estoque de C nas frações leves da MOS nesta camada, como o encontrado por Conceição, Dieckow; Bayer (2013).

Considerando a camada de 0-20 cm, os valores do estoque de C das frações leves da MOS para o PD são menos expressivos, devido ao maior estoque nos primeiros 5 cm de profundidade. Enquanto que, a FP está distribuída mais uniformemente no perfil do solo, pois esta depende da presença das partículas minerais do solo para estabilizar o C.

Os efeitos dos sistemas de preparo e das plantas de cobertura à quantidade e a qualidade da MOS podem ser expressos pelo IMC, composto pelo ILC e o IEC. Considerando a camada de solo de 0-20 cm, os estoques de C não apresentaram diferença estatística para os sistemas de preparo e para as plantas de cobertura (Tabela 8). Apesar disso, os valores de IEC de todos os sistemas de manejo foram numericamente superiores ao IEC da mata, sendo que entre os sistemas de preparo o IEC do PD foi 33% superior a mata e o solo sob cultivo de aveia 39% superior a área de referência. Por outro lado, o valor de ILC da mata foi superior aos valores de ILC para os sistemas analisados, os quais obtiveram valores similares entre eles.

Em relação ao IMC, entre os sistemas de preparo, o solo sob PD obteve valor de 62,47 e o solo sob PC valor de 58,56 (Tabela 8). Entre as plantas de cobertura, os valores de IMC foram de 54,33, 68,55 e 58,66 para os solos sob aveia, nabo e pousio, respectivamente. Os valores de IMC dos sistemas de manejo analisados foram inferiores ao IMC da mata. Comparando sistemas de preparo do solo em Latossolo Vermelho-Amarelo no Cerrado, Tomazi (2008) obteve maiores valores de ILC, IEC e IMC, para um solo sob PD durante 13 anos em relação ao PC,

sendo os índices superiores a área de referência, principalmente o IMC, 38% superior ao solo sob Cerrado.

Os sistemas de manejo promoveram o aumento dos estoques de C do solo na camada 0-20 cm em relação a mata, mas não aumentaram a labilidade do C, o que resultou nos valores numericamente menores de IMC. Esse aumento dos estoques de C no solo ocorreu em maior proporção na FP da MOS, a fração na qual há maior estabilidade do C, devido aos mecanismos de proteção atuantes, e em menor proporção na FL, que é a fração mais suscetível ao manejo do solo, e diretamente proporcional a labilidade do C.

Apesar dos IMCs dos sistemas de manejo neste estudo não terem atingido o IMC da condição natural do solo, devido a menor LC do solo provocado por estes sistemas, o IEC indica que, principalmente o sistema PD com cultivo de plantas de cobertura, promovem o incremento de C no solo e o sequestro de C da atmosfera, como constatado ao longo dos anos de duração deste experimento (CALEGARI et al., 2008).

Tabela 8 – Estoque de carbono na fração leve (FL) e pesada (FP) e no solo (COT), labilidade do carbono (LC), índice de labilidade do carbono (ILC), índice de estoque de carbono (IEC) e índice de manejo de carbono (IMC) do solo para os sistemas preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob plantas de cobertura e área de floresta nativa (mata) na camada de solo de 0-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de manejo	FL	FP	COT	IEC	LC	ILC	IMC
	----- Mg ha ⁻¹ -----						
PC	8,31 ns	86,09 ns	94,40 ns	1,22	0,11	0,53	58,56
PD	8,94	94,05	102,99	1,33	0,10	0,48	62,47
Aveia	7,90 ns	99,34 ns	107,24 ns	1,39	0,08	0,40	54,33
Nabo	9,61	81,32	90,93	1,18	0,12	0,61	68,55
Pousio	8,38	89,54	97,92	1,27	0,10	0,49	58,66
Mata	12,42	64,78	77,20	1,00	0,20	1,00	100,00

ns: médias não apresentaram diferença significativa ao teste F a 5% de probabilidade.

3.6 CONCLUSÕES

O uso do plantio direto por 27 anos promove maior estoque de carbono no solo e nas frações leve livre e leve oclusa da matéria orgânica em relação ao preparo convencional do solo na camada de 0-5 cm.

O cultivo de nabo forrageiro aumenta o estoque de carbono na fração leve livre da matéria orgânica do solo na camada de 0-5 cm, enquanto que o cultivo de aveia não difere do solo mantido sob pousio.

Independente do sistema de preparo de solo e da espécie de planta de cobertura cultivada, a fração pesada da matéria orgânica é a que armazena o maior estoque de carbono do solo em relação as frações leve livre e leve oclusa, devido a elevada interação da matéria orgânica com as partículas minerais do solo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O plantio direto promoveu melhorias nos índices de agregação e estoque de C em relação ao preparo convencional após 27 anos de cultivo, mas os principais efeitos deste sistema se concentraram na camada de 0-5 cm, decorrente da mínima mobilização do solo e manutenção dos resíduos vegetais na superfície. Este fato ressalta a importância das práticas de conservação do solo para evitar a degradação e as perdas de solo, nutrientes e matéria orgânica desta camada.

Além disso, o plantio direto promoveu maior proteção física da matéria orgânica do solo na camada de 0-5 cm, pois elevou o estoque de carbono na fração leve oclusa, e também aumentou a proporção do estoque de carbono das frações leves da matéria orgânica em relação ao carbono orgânico do solo, resultando em maiores quantidades de matéria orgânica leve protegida no solo.

O cultivo de plantas de cobertura no inverno também se mostrou benéfico, principalmente para a agregação do solo, em comparação com o solo mantido em pousio. Contudo, a pouca diferença verificada entre as diferentes plantas de cobertura para as análises de agregação e estoque de C, pode ter ocorrido pela ausência da continuidade do experimento durante todos os anos, pois dos 27 anos, 14 foram cultivados de forma homogênea com a mesma espécie em todas as parcelas.

A textura e a mineralogia do solo avaliado, Latossolo Vermelho aluminoférrico, promoveram a forte interação entre a matéria orgânica e a superfície mineral, sendo esta interação importante na formação e estabilização dos agregados do solo, como também na proteção e estabilização da matéria orgânica. Além disso, a relação entre a agregação e a matéria orgânica é determinante para a qualidade do solo, pois estão relacionados com os atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

Portanto a utilização de plantas de cobertura de inverno associada ao sistema de plantio direto é capaz de melhorar a agregação do solo e aumentar o estoque de carbono no solo. O cultivo de nabo forrageiro e aveia preta em consórcio pode ser uma boa alternativa para melhorar as propriedades do solo.

REFERÊNCIAS

AMADO, Telmo J. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1, p.189-197, 2001.

BARRETO, Renata C. et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.132, p.243–251, 2009.

BAYER, Cimélio. et al. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, v.133, p.258-268, 2006.

BAYER, Cimélio.; MIELNICZUK, João. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S.da.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.de.O. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

BERTOL, Ildegardis. et al., Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p.133-142, 2007.

BLAIR, Graeme J.; LEFROY, Rod D.B.; LISLE, Leanne. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.46, p.1459-1460, 1995.

BORDIN, Ivan. et al. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1785-1792, 2008.

CALEGARI, Ademir. et al. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. **Agronomy Journal**, v.100, p.1013-1019, 2008.

CALEGARI, Ademir. Plantas para adubação verde de inverno no Sudoeste do Paraná. Londrina: IAPAR, (Boletim Técnico, 35), 1990.

CALEGARI, Ademir. **Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Argiloso do Sul do Brasil**. 2006. 191f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

CAMPOS, Ben-Hur C. de. et al. Long-term C-CO₂ emissions and carbon crop residue mineralization in an Oxisol under different tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.819-832, 2011.

CAMPOS, B. C. et al. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.383-391, 1999.

CARDOSO, Dione P. et al. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.6, p.632–638, 2012.

CARVALHO, Igor Q. de et al. Espécies de cobertura de inverno e nitrogênio na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Scientia Agraria**, v.8, n.2, p.179-184, 2007.

CASALI, Carlos A. **Sistemas de culturas sob diferentes manejos por longa duração alteram as formas de fósforo do solo?** 2012. 149f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

CASÃO JUNIOR, Ruy; ARAÚJO, Augusto G. de; LLANILLO, Rafael F. **Plantio direto no sul do Brasil: Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista.** Londrina: IAPAR, 2012.

CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A., GUIMARÃES, M. de F., FONSECA, I.C.B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.65, p.45-51, 2002.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538, 1998.

CONCEIÇÃO, Paulo C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo). 155f. 2006 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CONCEIÇÃO, Paulo C. et al. Eficiência do politungstato de sódio no Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1301-1310, 2007.

CONCEIÇÃO, Paulo C. et al. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.541-549, 2008.

CONCEIÇÃO, Paulo C. et al., Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, p.794-800, 2014.

CONCEIÇÃO, Paulo C.; DIECKOW, Jeferson, BAYER, Cimélio. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**, v.129, p.40-47, 2013.

COSTA JUNIOR, Ciniro J. et al. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p.1311-1321, 2012.

COSTA JUNIOR, Ciniro. et al. Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.1241-1252, 2011.

COSTA, A. C. S. DA. **Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil**. 1996. 243f. Tese (Soil Science PhD) - The Ohio State, 1996.

DAHLEM, Ana Regina. **Plantas de cobertura de inverno para produção de milho em sistema de plantio direto na região sudoeste do Paraná**. 2013. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

DALMAGO, Genei. et al. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.855–864, 2009.

DA-SILVA, Vagner. et al. Melhoria da estrutura de um Latossolo por sistemas de culturas em plantio direto nos campos gerais do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.983-992, 2012.

DENEF, Karolien. et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. **Soil Biology & Biochemistry**, v.39, p.1165–1172, 2007.

DERPSCH, Rolf; FRIEDRICH, Theodor. Development and current status of no-till adoption in the world. In: **Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization** (ISTRO), 18, 2009, Izmir, Turkey. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/publicacoes/Derpsch___Friedrich_2009.pdf> Acessado em 22 fev. 2014.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, v.11, p.199-138, 1988.

DIECKOW, Jeferson. et al. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, v.60: 240–249, 2009.

DIEKOW, Jeferson. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, v.268, p.319-328, 2005-a.

DIEKOW, Jeferson. et al. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, v.81, p.87–95, 2005-b.

DONEDA, Alexandre. et al. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1714-1723, 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FAO. What is conservation agricultura? Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>> Acessado em 22 fev. 2014.

FEBRAPDP. Evolução Área de Plantio Direto no Brasil. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/?i1=34eAcoBnLhRWY05WYsBXYIJXYa12&i2=4b8QYIJXYfde&i3=e46ARQBSZkBSYIJXwece&i4=&i5=34eAcoBnLhRWY05WYsBXYIJXYa12&m=1>> Acessado em 22 fev. 2014.

FIORIN, Jackson E.; SCHNELL, Alessandro.; RUEDELL, José. Diagnóstico das propriedades rurais na região de abrangência das cooperativas, COOPATRIGO, COOPEROQUE, COTAP, COTRIROSA, COTRISAL (SB) e TRITICOLA. Cruz Alta: **FUNDACEP FECOTRIGO**, 2007.

FREIXO, A.A.; CANELLAS, L.P.; MACHADO, P.L.O.A. Propriedades espectrais da matéria orgânica leve-livre e leve intra-agregado de dois Latossolos sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.445-453, 2002.

FREIXO, Alessandra A. et al. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26 p.425-434, 2002.

GIACOMINI, S. J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.325-334, 2003.

GIACOMINI, Sandro J. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. II - nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.751-762, 2004.

GOLCHIN, A. et al. Soil-structure and carbon cycling. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.1043-1068, 1994.

GUADAGNIN, Jean C. et al. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.277-286, 2005.

HERNANI, L.C. et al.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.145-154, 1999.

INDA JUNIOR, Alberto V. et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, v.37, p.1301-1307, 2007.

LANZANOVA, Mastrângello E. et al. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1689-1698, 2013.

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

MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.369-374, 1991.

MIELNICZUK, João. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S.da.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.de.O. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: Características e manejo em pequenas propriedades**. Chapecó, Edição do Autor, 1991.

OADES, J. M.; WATERS, A. G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, v.29, p.815-828, 1991.

PILLON, Cleiton N.; MIELNICZUK, João; MARTIN NETO, Ladislau. **Métodos de fracionamento e caracterização da matéria orgânica do solo**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, Documento 106, 2002.

PINHEIRO, E.F.M. et al. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.731-737, 2004.

PORTELLA, Cibele M.R. et al. Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1868-1877, 2012.

ROSA, Carla M.de. et al. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.1769-1776, 2011.

ROSCOE, Renato. MACHADO, Pedro L.O.de.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

ROSSI, Celeste Q. et al. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em Latossolo Vermelho sob plantio de soja no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, p.233-241, 2012.

SÁ, João C.M. et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land degradation & development**, v.24, p.115-128, 2013.

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

SANTOS, Daiane C. dos. et al. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v.43, p.838-844, 2013.

SILVA, Denis A. da. et al. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p.147-156, 2011-a.

SILVA, Eulene F. et al. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, p.1321-1331, 2011-b.

SIX, Johan. et al. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32,p.2099-2103, 2000.

SIX, Johan. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, p.755–775, 2002-a.

SIX, Johan. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soil. **Plant and Soil**, v.241, p.155–176, 2002-b.

SOLLINS, P. et al. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v.74, p.65-105, 1996.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic-matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, p.141-163, 1982.

TIVET, Florent. et al. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.126, p. 203–218, 2013.

TOMAZI, Michely. **Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos de cerrado sob sistemas de uso e manejo**. 2008. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VEZZANI, Fabiane M. et al. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S.da.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.de.O. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

VEZZANI, Fabiane; MIELNICZUK, João. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

WENDLING, Beno. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-494, 2005.

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

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

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

APÊNDICES

APÊNDICE A – Concentração de carbono nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), pesada (FP), e no solo (COT), para os sistemas de preparo convencional (PC) plantio direto (PD) e plantas de cobertura, além de floresta nativa (mata), nas camadas de solo, 0-5, 5-10 e 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de manejo		FLL	FLO	FP	COT
----- g C kg ⁻¹ solo -----					
0-5 cm					
PC	Aveia	1,39	2,39	40,96	44,74
	Nabo	1,42	2,92	26,60	30,94
	Pousio	1,56	2,37	34,74	38,67
PD	Aveia	2,27	4,58	41,54	48,39
	Nabo	4,76	5,00	43,25	53,01
	Pousio	2,31	4,06	41,89	48,27
Mata		12,39	8,88	43,56	64,84

Sistemas de preparo	PC	1,46	2,56	34,10	38,12
	PD	3,12	4,55	42,23	49,89
Plantas de cobertura	Aveia	1,83	3,48	41,25	46,57
	Nabo	3,09	3,96	34,93	41,98
	Pousio	1,93	3,22	38,32	43,47

5-10 cm					
PC	Aveia	0,92	2,26	40,65	43,83
	Nabo	1,66	3,05	31,93	36,65
	Pousio	1,39	2,74	38,87	43,00
PD	Aveia	0,68	2,83	39,18	42,69
	Nabo	0,88	2,93	40,75	44,57
	Pousio	0,61	2,36	41,04	44,02
Mata		2,78	4,79	47,92	55,49

Sistemas de preparo	PC	1,32	2,69	37,15	41,16
	PD	0,73	2,71	40,32	43,76
Plantas de cobertura	Aveia	0,80	2,54	39,91	43,26
	Nabo	1,27	2,99	36,34	40,61
	Pousio	1,00	2,55	39,95	43,51

10-20 cm					
PC	Aveia	0,46	2,09	45,73	48,28
	Nabo	0,97	2,72	35,54	39,23
	Pousio	1,05	2,97	38,71	42,73
PD	Aveia	0,70	2,10	45,72	48,52
	Nabo	0,96	2,32	44,78	48,07
	Pousio	0,34	1,55	38,21	40,10
Mata		1,36	1,91	42,02	45,28

Sistemas de preparo	PC	0,83	2,59	40,00	43,41
	PD	0,67	1,99	42,90	45,56
Plantas de cobertura	Aveia	0,58	2,10	45,72	48,40
	Nabo	0,97	2,52	40,16	43,65
	Pousio	0,70	2,26	38,46	41,41

APÊNDICE B – Densidade do solo sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e plantas de cobertura, além de floresta nativa (mata), nas camadas de solo, 0-5, 5-10 e 10-20 cm. UTFPR, Câmpus Pato Branco - PR, 2014.

Sistemas de manejo		Camadas do solo		
		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
		----- g dm ⁻³ -----		
PC	Aveia	1,06	1,14	1,18
	Nabo	1,09	1,08	1,11
	Pousio	1,15	1,04	1,23
PD	Aveia	1,04	1,17	1,20
	Nabo	0,91	1,08	1,15
	Pousio	1,16	1,12	1,14
Mata		0,69	0,71	0,79

Sistemas de preparo				
	PC	1,10	1,09	1,17
	PD	1,04	1,12	1,16
Plantas de cobertura				
	Aveia	1,05	1,16	1,19
	Nabo	1,00	1,08	1,13
	Pousio	1,15	1,08	1,18