

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

ADEMIR DE OLIVEIRA FERREIRA

COMPARTIMENTOS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COMO INDICADORES
DO SEQÜESTRO DE CARBONO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA
DURAÇÃO

PONTA GROSSA
JULHO-2009

ADEMIR DE OLIVEIRA FERREIRA

COMPARTIMENTOS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COMO INDICADORES
DO SEQÜESTRO DE CARBONO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA
DURAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de
Ponta Grossa para a obtenção do título de Mestre em
Agronomia - Área de Concentração em Agricultura.
Ênfase em Uso e Manejo de Solos.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá.

Co-orientadora: Prof. Dra. Neyde Fabíola Balarezo
Giarola

PONTA GROSSA
JULHO-2009

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Processos Técnicos BICEN/UEPG

F383c Ferreira, Ademir de Oliveira
 Compartimentos da matéria orgânica do solo como indicadores
do seqüestro de carbono em sistema plantio direto de longa
duração./ Ademir de Oliveira Ferreira. Ponta Grossa, 2009.
98 f.
Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração
em Agricultura) - Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador : Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá
Co-orientadora : Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola

1. Relação de estratificação. 2. Taxa de seqüestro de C.
3. Plantio direto. 4. Carbono. 5. Argila. 6. Densidade do solo.
I. Sá, João Carlos de Moraes. II. Giarola, Neyde Fabiola Balarezo.
III. T

CDD: 631.41



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
Coordenação de Colegiado de Curso de Mestrado em Agronomia

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Titulo da Dissertação: **"COMPARTIMENTOS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO
COMO INDICADORES DO SEQUESTRO DE CARBONO EM SISTEMA PLANTIO
DIRETO DE LONGA DURAÇÃO"**.

Nome: Ademir de Oliveira Ferreira

Orientador: João Carlos de Moraes Sá

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Profa. Dra. Neyde Fabiola Balarezo Giarola

Data da Realização: 13 de julho de 2009.

DEDICO

A minha Família

E a todos que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus

A Minha família pelo apoio incondicional.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa pela estrutura e oportunidade de formação.

A Fundação AGRISUS pelo apoio financeiro (bolsa).

Aos amigos que estiveram presentes e ajudaram muito tornando possível a execução deste trabalho. Em especial ao colegas Clever Briedis, Caio Quadros Netto, Josiane B. dos Santos, Lutécia B. Canalli, pelo incentivo e apoio.

Aos professores do programa de Pós Graduação pela contribuição em aprendizado.

Em especial ao professor, orientador e amigo João Carlos de Moraes Sá, por ter me ensinado muitas coisas e acreditado em meu trabalho.

FERREIRA, Ademir de Oliveira. **Compartimentos da matéria orgânica do solo como indicadores do seqüestro de carbono em sistema plantio direto de longa duração**. 2009. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

RESUMO

A redução no conteúdo de carbono (C) da camada superficial em direção as camadas mais profundas do solo indica a formação da estratificação no perfil devido à adição contínua de C pelos resíduos orgânicos resultando no enriquecendo a camada superficial do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os seguintes assuntos: a) a relação de estratificação (RE) de C dos compartimentos da matéria orgânica do solo (MOS) pode ser um indicador do seqüestro de C no sistema plantio direto. b) a resistência tênsil dos agregados pode ser afetada pelo conteúdo de C em Pedossequencia de Latossolo com textura média e argilosa. c) o balanço de C e a quantidade de resíduos culturais necessária para manter o equilíbrio estável de C em um Latossolo com textura média e argilosa. O delineamento experimental foi um fatorial 2x2x2 inteiramente casualizado com 12 tratamentos. Os tratamentos constituíram-se de: a) um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa, duas épocas de amostragem do solo (E_1 e E_2) com um ano de intervalo entre si e duas profundidades de amostragem (0-5 e 5-20 cm). Os atributos avaliados foram: a separação das classes de agregados do tamisamento úmido (19-8, 8-4, 4-2, 2-1, 1-0,5 e 05-0,25 mm), o carbono orgânico particulado (COP), o nitrogênio total particulado (NTP) nas classes de agregado, o C orgânico total (COT) e o nitrogênio total (NT) na amostra integral e nas classes de agregados e a resistência tênsil dos agregados. A relação de estratificação (RE) foi calculada dividindo-se o valor de COT e NT da camada de 0-5 cm pelo valor na camada 5-20 cm. A taxa de seqüestro de C e a variação da relação de estratificação foram calculadas através da diferença (Δ) entre os valores da E_2 menos o da E_1 . A resistência tênsil (RT) do solo foi avaliada em 1920 agregados de cada época de coleta, determinando-se, também o conteúdo de COT e NT. A classe de agregado > 8 mm representou mais de 70% da massa dos agregados tanto na textura argilosa como na arenosa. Da mesma forma, o conteúdo de COT e NT foram maiores na classe de agregado > do que 4 mm comparado as demais classes nas duas classes texturais. A relação de estratificação (0-5:5-20 cm) de COT, NT, COP e NTP do solo indicou a melhoria da qualidade do solo da camada superficial. A relação linear e significativa entre o Δ RE com a taxa de seqüestro de carbono nas duas classes texturais mostrou o aumento no seqüestro de C e foi mais evidente no LV com textura média. O incremento do conteúdo de COT resultou na diminuição da resistência tênsil (RT) dos agregados e foi mais evidente na camada de 0-5 cm. A RT apresentou relação inversa com a densidade do solo e foi superior no LV textura média. A taxa de seqüestro de C foi de 0,86 para o LV textura média e 0,76 Mg ha⁻¹ para o textura argilosa e para manter o equilíbrio estável de C é necessário o aporte de 8,6 Mg ha⁻¹ de resíduos culturais. Os resultados apresentados confirmaram a hipótese da RE ser um indicador sensível para a taxa de seqüestro de carbono no solo em um sistema sob plantio direto consolidado.

Palavras-chave: relação de estratificação, taxa de seqüestro de C, plantio direto, Carbono, argila, densidade do solo.

SUMMARY

Decrease in soil organic carbon (SOC) content of the surface layer into deeper layers indicates the occurrence of the stratification in the profile due to continuous C addition of crop residues enriching the soil surface layer. The objective of this study was: in Chapter 3 the relationship of stratification (RE) of C of the soil organic matter (SOM) pools can be an indicator of C sequestration in no-tillage soils? In the chapter 4 the tensile strength of aggregates is affected by the C content of Pedosequence of Latosol with medium and clay texture? in Chapter 5 which is the C balance and the amount of crop residue needed to maintain a stable C balance in a Latosol with a medium and clay texture? The experimental design was a completely randomized 2x2x2 factorial with 12 treatments. Treatments consisted of: a) an Oxisol (Red Latosol) with medium and clayey texture, b) two soil sampling periods (T_1 and T_2) with one year interval between them, and c) two soil sampling depths (0-5 and 5-20 cm). The soil attributes assessed were: the separation of water stable aggregates classes (19-8, 8-4, 4-2, 2-1, 1-0,5 and 05-0,25 mm), particulate organic carbon (POC), total particulate nitrogen (TPN) in the aggregate classes. Also was determined total organic carbon (TOC) and total nitrogen (NT) in the whole sample and in the aggregates sizes classes and tensile strength of aggregates. The relationship of stratification was calculated by dividing the TOC and TN values of 0-5 cm layer by the values of the same attributes of 5-20 cm layer. The C sequestration rate and the stratification ratio changes were calculated by the difference between the T_2 values minus T_1 . The tensile strength was measured in soil aggregates and assessed in 1920 aggregates for each sampling time. Also TOC and NT content were measured in aggregates. The aggregates greater than 8 mm represented more than 70% of the total mass in both the clay and in sandy soil. The relationship of stratification ratio (0-5:5-20 cm) of SOC, TN, POC and TPN soil indicated the improvement of the surface layer. A significant linear relationship between the SR and C sequestration rate in both textural classes showed an increase in C sequestration and was more evident in LV with medium texture. The increase in TOC content resulted in decreased tensile strength (TS) of the aggregates and was more evident in the 0-5 cm layer. The TS showed inverse relationship with the soil density and was higher in the LV medium texture. The rate of sequestration of C was 0.86 for the LV with medium texture and 0.76 Mg ha⁻¹ for the clay texture and to maintain the stable balance of C is required an input of 8.6 Mg ha⁻¹ of crop residues. The results presented confirm the hypothesis of SR to be a sensitive indicator for the rate of carbon sequestration in no-tillage soil.

Key-words: Carbon stock, Carbon balance, Carbon sequestration, Soil management systems, particulate organic carbon, particulate nitrogen.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Média e desvio padrão da densidade do solo determinadas em três camadas de todas as unidades experimentais.....	Página 33
TABELA 2 -	Caracterização química e física do Latossolo Vermelho com textura média (TM) e textura argilosa (TA).....	33
TABELA 3 -	Análise de variância (ANOVA) do experimento.....	39
TABELA 4 -	Estratificação do conteúdo e do estoque de C e N na amostra integral.....	41
TABELA 5 -	Conteúdo de C nos compartimentos (COT, NT, COP e NTP) nas classes de agregados de um LV com textura média e argilosa há longo período sob plantio direto (média de doze repetições ^a).....	43
TABELA 6 -	Relação de estratificação de COT, NT, COP e NTP nas classes de agregados de um LV com textura média e argilosa há longo período sob plantio direto (média de doze repetições ^a).....	44
TABELA 7 -	Porcentagem de carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico particulado (COP) nas classes de agregados de um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa sob plantio direto de longa duração.....	52
TABELA 8 -	Equações de regressão entre a variação do estoque de COT (Δ COT [§]) e do delta COP (Δ COT [§]) com o delta da RE [§] (0-5:5-20 cm).....	53
TABELA 9 -	ANOVA do experimento.....	63
TABELA 10 -	Índices de colheita, massa seca de raiz e porcentagem de C na palhada.....	79
TABELA 11 -	Balanço de C em um Latossolo com textura média e argilosa para a camada de 0-20 cm utilizando o modelo unicompartimental adaptado de Bayer et al. (2006).....	81
TABELA 12 -	Quantidade de palha (Equivalente em Palha-EP) necessário para manter o C em equilíbrio dinâmico em um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa em sistema plantio direto de longa duração.....	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Seqüência da formação do agregado: números 1, 2, 3 e 4 situados abaixo da figura do agregado refere-se a fase de formação. Desenho esquemático proposto por Tisdall & Oades (1982).....	Página 21
FIGURA 2 -	Localização geral (a) e local da área experimental - FESCON (b)	29
FIGURA 3-	Dados históricos em Ponta Grossa: (a) distribuição mensal da precipitação pluviométrica (barras) relacionada com média da temperatura máxima (■ Tmax.) e temperatura mínima (● Tmin.) no período de 44 anos para os meses de janeiro a dezembro; (b) distribuição mensal da precipitação pluviométrica (barras) relacionada com media da temperatura máxima (■ Tmax.) e temperatura mínima (● Tmin.) no período de outubro de 2007 a setembro de 2008.....	30
FIGURA 4 -	Croqui do bloco (a) com o detalhe localização dos tratamentos e do procedimento de amostragem do solo (b)	31
FIGURA 5 -	Detalhe do procedimento do método de Bouyoucos: a) agitação/dispersão; b) separação da fração areia e coleta da fração argila e silte na proveta; c) sucção da argila. (adaptado de Almeida, 2008).....	32
FIGURA 6 -	Detalhes das etapas do procedimento de amostragem no campo (pré-tratamento): a) trincheira; b) bloco de solo; c) tamanho dos agregados (adaptado de Madari, 2004).....	34
FIGURA 7 -	Detalhe do procedimento de tamisamento a úmido utilizando Yoder modificado por Castro Filho et al.,1998 (a) ; peneiras de 8, 4, 2, 1, 0,5 e 0,25 mm (b) e separação da MOP (c)	35
FIGURA 8 -	Regressão entre a % de Ca na $CTC_{pH\ 7,0}$ e o conteúdo de carbono orgânico total do solo (COT) na camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração (a) Textura média, (b) textura argilosa.....	47
FIGURA 9 -	Regressão entre o carbono orgânico total do solo (COT) e a	

- capacidade de troca catiônica em pH 7,0 ($CTC_{pH\ 7,0}$) na camada 0-20 de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. **(a)** Textura média, **(b)** textura argilosa..... 48
- FIGURA 10 - Regressão entre a variação da relação de estratificação ($\Delta RE = RE\ da\ E_2 - RE\ da\ E_1$) e a variação do estoque de COT ($\Delta\ estoque = Estoque\ E_2 - Estoque\ E_1$) na camada 0-5 cm de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. **(a)** Textura argilosa, **(b)** textura média. RE = relação de estratificação..... 49
- FIGURA 11 - Regressão entre: **(a)** carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT); **(b)** carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio total particulado (NTP) de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração..... 50
- FIGURA 12 - Curva de regressão entre o ΔRE (0-5:5-20 cm) do COT e o Δ do estoque de COT na classe de agregado entre 19-8 mm, na camada de 0-5 cm, de um Latossolo Vermelho com 20 anos de plantio direto. **(a)** textura argilosa, **(b)** textura média..... 51
- FIGURA 13 - Dinamômetro da IMPAC. Detalhes da fratura do agregado. (adaptado de Almeida, 2008)..... 62
- FIGURA 14 - Regressão linear entre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho em plantio direto de longa duração. A regressão foi realizada com a média geral dos doze tratamentos e das duas classes texturais..... 64
- FIGURA 15 - Regressão linear entre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho em plantio direto de longa duração. **(a)** regressão linear entre o COT e a RT para a camada de 0-5 cm, **(b)** regressão linear entre o COT e a RT para a camada de 5-20 cm..... 65
- FIGURA 16 - Regressão linear entre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho em plantio direto de longa duração. **(a)**

	textura média, (b) textura argilosa.....	67
FIGURA 17 -	Regressão entre o conteúdo de argila e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. Os valores utilizados para a equação de regressão foram obtidos da média geral do LV nas duas texturas e na duas profundidades amostradas.....	68
FIGURA 18 -	Regressão entre o conteúdo de argila e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. (a) textura média, (b) textura argilosa.....	69
FIGURA 19 -	Regressão entre o conteúdo de argila e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. (a) regressão para a profundidade de 0-5 cm, (b) regressão para a profundidade de 5-20 cm.....	70

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	6
SUMMARY.....	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
SUMÁRIO.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 O balanço global de carbono.....	17
2.2 O solo como fonte ou dreno de carbono	17
2.3 Formação dos compartimentos da MOS.....	18
2.4 Formação dos agregados e proteção do C.....	20
2.5 Os compartimentos da MOS como indicadores da qualidade do solo.....	22
2.6 Sistemas de manejo do solo e da rotação de culturas visando o seqüestro de carbono.....	23
2.7 Compartimentos da matéria orgânica do solo como indicadores do seqüestro de carbono, relação de estratificação, classes de agregados e resistência tênsil.....	24
3. RELAÇÃO DA ESTRATIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA MATÉRIA ORGÂNICA COMO INDICADOR DO SEQÜESTRO DE CARBONO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....	25
3.1 RESUMO.....	25
3.2 SUMMARY.....	26
3.3 INTRODUÇÃO.....	27
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.4.1 Localização, clima e descrição da área de estudo.....	29

3.4.2	Delineamento experimental e análise estatística.....	31
3.4.3	Amostragem do solo, análise granulométrica, química e densidade do solo.....	32
3.4.4	Determinação de Carbono e Nitrogênio total.....	33
3.4.5	Estabilidade de Agregados.....	34
3.4.6	Seqüência do fracionamento granulométrico para separação do carbono orgânico e do nitrogênio total particulado (53-250 μm).....	35
3.4.7	Cálculo da relação de estratificação do carbono orgânico e nitrogênio total.....	36
3.4.8	Mineralogia do perfil do solo.....	37
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.5.1	Conteúdo e relação de estratificação de C e N na amostra integral.....	40
3.5.2	Conteúdo e relação de estratificação de COT, NT, COP e NTP nas classes de agregados.....	42
3.5.3	Interação da variação da relação de estratificação (ΔRE) com variação do estoque de COT (ΔCOT).....	48
3.6	CONCLUSÕES.....	54
4.	RESISTÊNCIA TÊNซิล DE AGREGADOS E CARBONO EM UM LATOSSOLO VERMELHO EM PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....	55
4.1	RESUMO.....	55
4.2	SUMMARY.....	56
4.3	INTRODUÇÃO.....	57
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	59
4.4.1	Coleta de blocos de solo e separação em agregados para a determinação da resistência tênil.....	59
4.4.2	Procedimento e cálculo da resistência tênil.....	60
4.4.3	Determinação da resistência tênil de agregados do solo.....	61

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.5.1 Resistência tênsil de agregados afetada pela classe textural e densidade do solo.....	68
4.6 CONCLUSÕES.....	71
5. BALANÇO DE CARBONO EM PEDOSSEQUÊNCIA DE LATOSSOLO VERMELHO DE TEXTURA MÉDIA E ARGILOSA SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....	72
5.1 RESUMO.....	72
5.2 SUMMARY.....	73
5.3 INTRODUÇÃO.....	74
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	77
5.4.1 Cálculo do balanço.....	77
5.4.2 Amostragem e determinação da densidade do solo.....	80
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5.5.1 Balanço de C em um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa.....	81
5.5.2 Quantidade de resíduo cultural para manter o equilíbrio estável.....	83
5.6 CONCLUSÕES.....	86
6. CONCLUSÕES GERAIS.....	87
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha importante função na formação dos agregados, na estrutura e conseqüentemente na qualidade do solo resultando em condições favoráveis para o crescimento das plantas. Ainda, atua como fonte de nutrientes às plantas através dos ciclos biogeoquímicos e influencia o fluxo de água e ar devido à ação sobre a qualidade estrutural do solo.

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo busca desenvolver a produção agropecuária de forma sustentável e se baseia nos seguintes princípios: (i) restringir o revolvimento do solo à linha de semeadura com a mínima perturbação para manter o máximo dos resíduos culturais na superfície; (ii) proporcionar o aporte contínuo de resíduos vegetais para contrabalançar as perdas por decomposição da MOS visando o acúmulo de C com o passar do tempo; (iii) proporcionar a adição de resíduos culturais em quantidade e qualidade visando a manutenção da cobertura do solo durante todo o ano, principalmente nos períodos de maior risco à erosão. A utilização do sistema plantio direto (SPD) promove a integração dos três requisitos supracitados tornando o solo um sumidouro de carbono (C) com reflexo positivo no acúmulo e no seqüestro de C. Isto porque no SPD o constante fraturamento dos agregados deixa de existir, ou fica restrito à linha de semeadura e, em conseqüência, reduz a entrada repentina de O₂ resultando em um ambiente menos oxidativo. Dessa forma, a exposição da MOS ao ataque microbiano é minimizada e permite que os agentes de agregação atuem como ligantes na formação de macroagregados, protegendo a matéria orgânica oriunda da decomposição dos resíduos culturais e das raízes das culturas.

O uso contínuo do SPD associado à adição de resíduos culturais na superfície cria a estratificação da matéria orgânica e de seus compartimentos construindo uma camada superficial rica em compostos orgânicos e nutrientes. Em ecossistemas não perturbados a estratificação é um processo natural no qual há o decréscimo do conteúdo de C nos compartimentos da MOS com o aumento da profundidade no perfil do solo.

A qualidade estrutural do solo pode ser alterada pelo processo de estratificação do carbono devido as relações intrínsecas com os compartimentos da MOS. A resistência tênsil dos agregados é um dos atributos físicos que tem sido sugerido como um indicador que sintetiza as inter-relações da qualidade estrutural do solo em função do manejo. Inúmeros resultados indicam que valores elevados para a resistência tênsil dos agregados indicam maior dificuldade na emergência das plântulas, redução e restrição no crescimento das raízes e dificuldade a penetração das semeadoras no solo. Por outro lado, a redução da resistência tênsil do solo tem sido correlacionada com o aumento da MOS porque esta contribui para a diminuição do número de ligações entre as partículas de argila devido a formação de complexos argilo-húmicos.

O objetivo deste trabalho foi: a) avaliar as alterações temporais nos compartimentos da matéria orgânica do solo (MOS) associados às classes de agregados, b) avaliar a relação de estratificação dos compartimentos da MOS como indicadora do seqüestro de C do solo no sistema plantio direto consolidado, c) determinar a relação entre o C e a qualidade estrutural do solo por meio da resistência tênsil, d) determinar o balanço de C no solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O balanço global de carbono

O C é o elemento fundamental para todas as formas de vida em nosso planeta. Está presente na atmosfera, na vida animal e vegetal, em substâncias orgânicas não vivas, em combustível fóssil, em rochas e dissolvido nos oceanos. O movimento das moléculas de carbono de uma forma para outra é conhecida como o ciclo do carbono.

O solo é considerado o principal reservatório temporário de carbono no ecossistema (Bruce et al., 1999). Contém cerca de 1410 Pg; 1Pg = 10^{15} g ou 1 bilhão de ton) (Batjes, 1996; Houghton, 1995; 1999; Bouwman, 1990; Eswaran et al., 1995; Lal 2004). Por sua vez, as plantas através do processo da fotossíntese constituem-se no elo entre o C que se encontra na atmosfera e o C que se encontra no solo na forma de matéria orgânica. O ciclo de vida e morte dos vegetais resulta no acúmulo de tecido vegetal decomposto, sobre e sob o solo (raízes), e produz uma quantidade expressiva de C (Rice, 2004). O reservatório atmosférico está crescendo a uma taxa de 3,3 Gt de C ano⁻¹, principalmente devido às intervenções no “pool” geológico, no C do solo e no biótico (IPCC, 2000).

2.2 O solo como fonte ou dreno de carbono

As práticas agrícolas adotadas e o ciclo do C estão interligados e dependendo do tipo dessas práticas o solo poderá atuar como um dreno ou uma fonte de CO₂ para a atmosfera (Bruce et al., 1999). Os mecanismos envolvidos nesse processo estão associados ao preparo do solo e possuem a seguinte sequência: a) a ruptura dos agregados expõe a MOS que está

atuando como ligante entre os microagregados ao ataque da biomassa microbiana, b) a mistura de material orgânico fresco com o solo resulta em condições mais favoráveis à decomposição; c) o aumento da atividade da biomassa microbiana devido a maior aeração do solo e a maior oferta de fonte de C facilmente oxidável, resulta em maior fluxo de mineralização de C (Elliot, 1986; Powlson et al., 1987; Reicosky et al., 1995).

O solo torna-se uma fonte de CO₂ para a atmosfera quando as perdas por oxidação são superiores às adições de C através dos resíduos orgânicos vegetais e animais. Os sistemas de manejo que usam o preparo do solo para a produção vegetal constituem-se no principal fator dessas perdas (Bruce et al., 1999; Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001).

A ausência de preparo, associada ao aporte de resíduos culturais na superfície do solo constituem o sistema plantio direto (SPD) e direcionam o solo para atuar como um dreno do CO₂ atmosférico, através da transformação do CO₂ capturado pelas plantas em C orgânico do solo. A decomposição dos resíduos culturais e a estabilização do C no solo irá depender da quantidade e da qualidade do resíduo cultural adicionado (Paustian et al., 1997).

A implementação de medidas integradas, tais como as relacionadas a seguir, é o caminho para que o solo atue como um dreno: a) eliminação do preparo do solo; b) intensificação de sistemas de rotação de culturas; c) adoção de práticas que promovam o aumento da produtividade das culturas; e d) restabelecimento de cobertura vegetal permanente (Bruce et al., 1999).

2.3 Formação dos compartimentos da MOS.

A quantidade e a qualidade de C dos resíduos culturais que são adicionados através dos sistemas de produção possuem características diferentes das adições em ecossistemas naturais e são responsáveis pelas diferenças na formação dos compartimentos da MOS (Sá et

al. 2001). Nos agroecossistemas as adições são constituídas principalmente por celulose e, em menor quantidade, por ligninas, o que acarreta maior velocidade de decomposição. Em contraste, nos ecossistemas naturais predominam as adições de lignina o que favorece uma taxa de humificação mais lenta. A diversidade de espécies com maior entrada de compostos orgânicos constituídos de ceras, gorduras, ligninas e polifenóis resulta em fluxo de C mais lento. Ao contrário, no sistema plantio direto, as entradas de compostos orgânicos são mais intensas, em razão da rotação de culturas com predominância de compostos celulósicos. Essa “injeção” de celulose altera a diversidade dos agentes decompositores, estimulando a ocorrência, em maior expressão, de grupos de microrganismos celulolíticos. A decomposição gradual restabelece o fluxo contínuo de C, proporcionando a redistribuição de compostos orgânicos com diferentes estágios de humificação nos compartimentos da matéria orgânica do solo.

Do ponto de vista do manejo do solo, a sugestão de Duxbury et al. (1989) de alocar os diferentes estágios da dinâmica do C em quatro compartimentos ou “reservatórios”, é útil para a compreensão das intervenções causadas pelo manejo:

- “Reservatório” *ativo ou lábil* – é constituído por compostos orgânicos facilmente oxidáveis, derivados de fragmentos de vegetais recentes, da biomassa microbiana e de exsudados de raízes (“rizodepósitos”). É controlado principalmente pela adição de resíduos culturais e pelo clima, e é fortemente influenciado pelo tipo de manejo do solo. As modificações são rápidas, e elevados aportes de C e N são função das transformações da biomassa microbiana.
- “Reservatório” *lentamente oxidável* – está relacionado com os macroagregados e é controlado pela mineralogia e pelos fatores agronômicos que interferem na agregação. Dentre estes, os sistemas de manejo do solo influenciam no tamanho desse reservatório.

- “Reservatório” *muito lentamente oxidável* – está relacionado com os microagregados; o fator controlador é a estabilidade do agregado em água. O sistema de manejo do solo tem pequeno impacto nesse compartimento.
- “Reservatório” *passivo ou recalcitrante* – está relacionado com o C associado às partículas primárias do solo. É controlado pela mineralogia da fração argila, formando complexos organo-argílicos pela decomposição microbiana que reduz o C para formas elementares. Os sistemas de manejo do solo não influenciam esse compartimento.

2.4 Formação dos agregados e proteção do C

A formação de agregados no SPD está associada com a taxa de macroagregação (19-0,25 mm) como o caminho da proteção do C oriundo do fluxo contínuo da decomposição dos resíduos culturais. Com a limitação do revolvimento do solo há o estímulo para o agrupamento entre partículas primárias dispersas em água, microagregados, macroagregados e as associações com os microrganismos saprofíticos. O fluxo contínuo de C cria uma frente de tamponamento estimulando uma zona ativa de decomposição que resulta em uma zona ativa de agregação que vai ocorrendo em camadas com o passar do tempo (Sá et al., 2006).

A decomposição lenta e gradual dos resíduos culturais libera compostos orgânicos que estimulam a formação e a estabilidade de agregados (Tisdall & Oades, 1982; Six et al., 2002). A seqüência proposta por Tisdall & Oades (1982) integra o reservatório ativo e o estável da MOS (Figura 1).

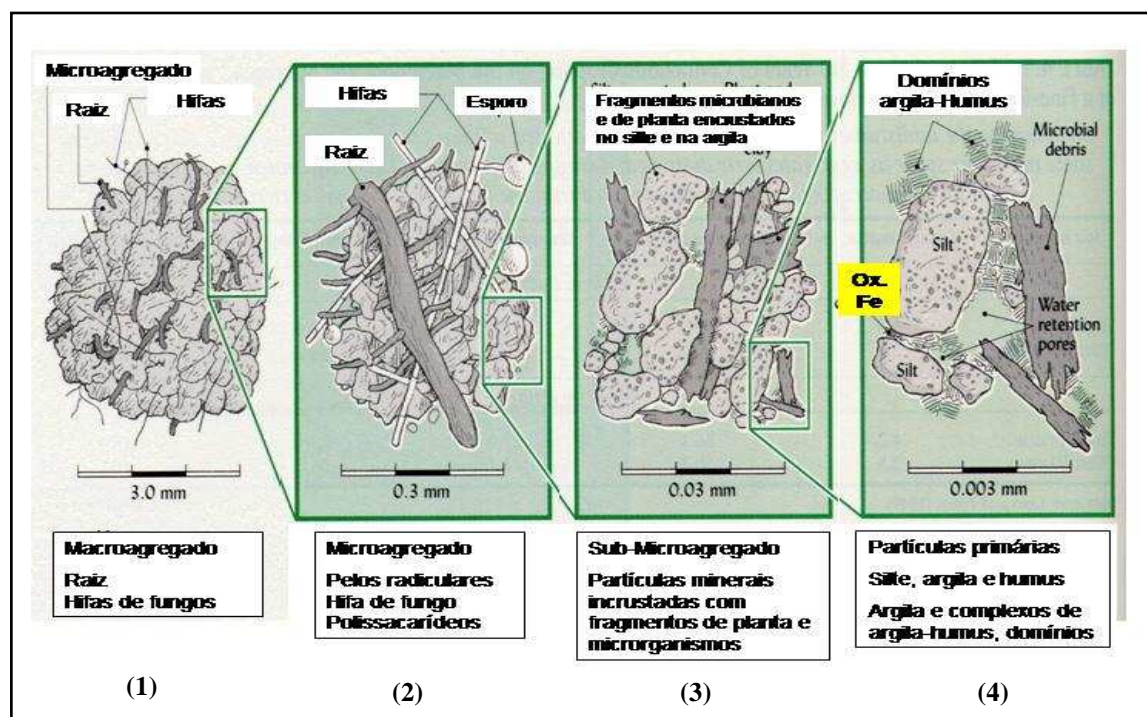


Figura 1. Seqüência da formação do agregado: números 1, 2, 3 e 4 situados abaixo da figura do agregado refere-se a fase de formação. Desenho esquemático proposto por Tisdall & Oades (1982).

As raízes, as hifas de fungos e os exsudados das raízes (rizodepósitos) possuem papel fundamental na reorganização das partículas primárias e microagregados dispersos. Este modelo de organização e hierarquia na formação dos agregados tem sido a base para vários estudos sobre a compartimentalização da MOS. A manutenção do sistema radicular na íntegra, associada à palhada na superfície do solo, expõem menos a MOS ao ataque microbiano, reduzindo a taxa de mineralização e o fluxo de CO_2 para a atmosfera (Reicosky et al., 1995). Esse mecanismo proporciona a proteção física da MOS que atua como agente de ligação entre os microagregados na formação de macroagregados (Six et al., 2002).

A proteção física da MOS em Latossolos ocorre porque esses solos são altamente intemperizados e apresentam uma concentração relativamente elevada de sesquióxidos de ferro e alumínio, os quais apresentam uma elevada superfície específica altamente reativa com a matéria orgânica.

A gênese dos agregados do solo pode se dar pela cimentação de elementos estruturais menores, ou pela fragmentação de elementos estruturais maiores. Na cimentação, presumivelmente três tipos de materiais coloidais estão envolvidos:

- a) partículas da fração silte e argila, as quais podem se unir ou aglutinar partículas de areia;
- b) óxido-hidróxidos de ferro e alumínio;
- c) matéria orgânica, a qual é considerada o mais importante agente agregante na macroagregação (19-0,25 mm) em solos dominados por minerais de argilas do tipo 1:1.

2.5 Os compartimentos da MOS como indicadores da qualidade do solo.

A MOS é considerada como um atributo-chave na qualidade do solo (QS), pois, além de satisfazer o requisito básico de ser sensível a modificações pelo manejo do solo (Doran & Parkin, 1994; Mielniczuk, 1999), é ainda fonte primária de nutrientes às plantas, influencia na infiltração e retenção de água no solo e na susceptibilidade à erosão (Doran & Parkin, 1994; Mielniczuk, 1999; Gregorich et al., 1994; Conceição et al., 2005). Ela também atua sobre outros atributos, tais como: ciclagem de nutrientes, complexação de elementos tóxicos e estruturação do solo.

Solos tropicais, intensamente intemperizados, apresentam como uma das suas principais características químicas a baixa CTC. Nesses solos, o teor de MOS tem importância preponderante na CTC (Burle et al. 1997; Bayer & Mielniczuk, 1999; Sá et al., 2009a). Em algumas situações, notadamente naquelas induzidas por sistemas de manejo com histórico de adoção de curto prazo, este indicador pode não ser um eficiente discriminador das alterações na QS. Nesse caso, a avaliação de compartimentos da MOS, frações lábil e particulada, as quais são basicamente compostas por resíduos vegetais em estágios iniciais de decomposição, raízes, e hifas de fungos (Cambardella & Elliot, 1992), pode ser uma alternativa de indicador

mais sensível (Freixo, 2000; Bayer et al., 2001; 2002). Estas frações desempenham importante função na ciclagem de nutrientes.

O relação de estratificação de carbono orgânico total (COT) e N do solo em profundidade, expressos como uma razão (0-5: 5-20 cm), indicam a qualidade do solo ou o funcionamento dos ecossistemas do solo (Franzluebbers, 2002). A redução na concentração e no estoque de COT nas camadas mais profundas do solo indicam a ocorrência de estratificação entre a camada superficial e a subsuperficial devido a adição contínua de C pelos resíduos orgânicos e sua decomposição, enriquecendo a camada superficial do perfil do solo (Sá & Lal, 2009).

Esse enriquecimento mantém a qualidade do solo através da melhor agregação, facilitando as trocas gasosas e fluxos de água no perfil (Doran & Parking, 1994; Franzluebbers, 2002 e 2007; Sá et al., 2008; Sá & Lal, 2009).

2.6 Sistemas de manejo do solo e da rotação de culturas visando o seqüestro de carbono.

O não revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos culturais na superfície por longo período proporcionam o fluxo contínuo de C do reservatório ativo para o estável. Na região dos Campos Gerais, Sá et al. (2001) reportaram diferença de 19,1 t ha⁻¹ de COT (camada de 0-40 cm) em favor do SPD (22 anos) comparado ao preparo convencional.

Segundo Sá et al. (2001) os ganhos de COT no SPD em sistemas que predominam culturas anuais ocorrem na camada de 0 – 10 cm e representaram 82% do total. Em contraste, as perdas no preparo convencional foram de 97% na mesma camada.

2.7 Compartimentos da matéria orgânica do solo como indicadores do seqüestro de carbono, relação de estratificação, classes de agregados e resistência tênsil.

O processo de acúmulo de C é contínuo e é governado pelas entradas de resíduo cultural. No SPD, a maior concentração de C nas frações lábeis (2000 – 210 µm e 250 – 53 µm), comparando-se ao sistema de preparo convencional, indica que o solo está se comportando como dreno e em direção ao seqüestro de C (Bayer et al., 2001; Sá et al., 2001).

O aumento da MOS resulta no aumento da agregação dos agregados o que diminui o número de ligações entre as partículas; neste caso, se a força destas ligações não for incrementada, verifica-se redução da resistência tênsil dos agregados, que é um dos atributos físicos mais amplamente utilizado como indicador da condição estrutural do solo. Essa redução da resistência tênsil dos agregados facilita a penetração das semeadoras no solo, aumenta a emergência das plântulas e favorece o crescimento das raízes em camadas que poderão explorar a água e nutrientes do solo em maior profundidade (Imhoff, 2002).

Sá & Lal (2009) constataram estreita correlação entre a relação de estratificação (0-5: 5-10 cm) e a taxa de seqüestro de C para a camada de 0-10 cm, sugerindo que a interação desses parâmetros pode ser um indicador do seqüestro de C sob SPD.

3. RELAÇÃO DA ESTRATIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA MATÉRIA ORGÂNICA COMO INDICADOR DO SEQÜESTRO DE CARBONO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

3.1 RESUMO

A redução no conteúdo de carbono (C) nas camadas mais profundas do solo indica a ocorrência da estratificação entre a camada superficial e a camada subsuperficial do solo devido a adição contínua de C pelos resíduos orgânicos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação de estratificação (RE) de C como um possível indicador para o seqüestro de C em um Latossolo Vermelho (LV) sob plantio direto há longo período (20 anos). O delineamento experimental foi um fatorial 2x2x3 inteiramente casualizado com 12 tratamentos. Os tratamentos constituíram-se de: (a) LV com textura média e argilosa; (b) duas profundidades de amostragem (0-5 e 5-20 cm) e (c) duas épocas de coleta (E_1 e E_2) com intervalo de amostragem de um ano. A RE foi calculada dividindo-se o valor de C em g kg^{-1} da camada de 0-5 cm pelo valor de C da camada 5-20 cm. A taxa de seqüestro de carbono orgânico total (COT) e a variação da RE foram calculadas através da diferença (Δ , delta) entre os valores da E_2 menos o da E_1 . A RE (0-5:5-20 cm) de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) indica o enriquecimento da camada superficial, enquanto a RE do carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio total particulado (NTP) do solo indica a migração de C e N entre as classes de agregados e melhoria na qualidade do solo. A relação linear e significativa entre o Δ RE do COT com a taxa de seqüestro de COT no LV nas duas classes texturais indicou aumento no seqüestro, sendo este mais evidente no LV sob textura média. Os resultados obtidos permitem confirmar a hipótese da RE ser um indicador sensível para a avaliação da taxa de seqüestro de C no sistema plantio direto consolidado.

Palavras-chave: relação de estratificação, taxa de seqüestro de C, plantio direto.

3.2 SUMMARY

The decrease in soil organic carbon (SOC) content in deeper layers indicates the occurrence of stratification between the surface layer and subsurface layer of soil due to continuous C addition by crop residues. The objective of this study was to assess the relationship of stratification ratio (SR) of C pools as an indicator for SOC sequestration in an Oxisol (Red Latosol) under long-term no-tillage (20 years). The experimental design was comprised by a completely randomized 2x2x2 factorial with 12 treatments. The treatments consisted of: (a) two soil textures – Red Latosol with medium and clayey texture, (b) two sampling depths (0-5 and 5-20 cm) and two sampling times (T_1 and T_2) with one year a sampling interval between them. The rate of SOC sequestration and the RE variation (Δ , delta) between T_1 and T_2 values were calculated by difference of T_2 minus T_1 . The SR were calculated by dividing the concentration determined for each SOM pool in 0–5 cm layer by those in 5–20 cm layers. The SR (0-5:5-20 cm) of SOC and TN indicates the enrichment of the surface layer, while the COP and NTP of soil indicates C and N migration among soil water stable aggregates categories and improvement in soil quality. A significant linear relationship of SR of SOC with SOC sequestration rates for both textural classes of Red Latosol showed a significant increase in SOC sequestration, which is more evident under medium texture. The results allow us to confirm the hypothesis of SR is a sensitive indicator for assessing C sequestration in consolidated no-till system.

Key-word: Stratification ratio, C sequestration rates, no-tillage.

3.3 INTRODUÇÃO

Em ecossistemas naturais o conteúdo de C da camada superficial diminui em direção às camadas mais profundas do solo, resultando na estratificação entre camada superficial e a subsuperficial do solo. Este fenômeno natural observado em áreas sob vegetação nativa ocorre devido a decomposição dos restos vegetais e animais adicionados continuamente à superfície do solo, enriquecendo a camada superficial (Franzluebbers, 2002; Sá & Lal, 2009).

Segundo Franzluebbers (2002), a relação de estratificação (RE) do COT, é expressa como uma razão que indica a qualidade ou o funcionamento dos ecossistemas e tem sido sugerida como um indicador da qualidade do solo. O ganho de C do solo reflete a qualidade da camada superficial e comporta-se como o elo entre a superfície do solo com as camadas mais profundas. Proporciona melhor infiltração e maior transmissão da água no perfil do solo além de maior estabilidade dos agregados na camada superficial. O mesmo autor reportou para solos sob plantio direto no hemisfério norte (estado da Geórgia e Texas nos EUA e Alberta no Canadá), a RE de COT de 3,4, 2,0 e 2,1, respectivamente. Também afirmou que a elevada RE de C e N do solo foram bons indicadores da qualidade do solo, independente do tipo de solo e do regime climático. Além disso, observou que a ocorrência de RE superior a dois seria pouco provável em solos degradados.

No Brasil, a RE (0-5:10-20 cm) em um Latossolo Vermelho muito argiloso ($> 600 \text{ g kg}^{-1}$) sob plantio direto da região de Palotina, PR foi 1,73 (Tormena et al., 2004). Na região dos Campos Gerais, para um Latossolo Vermelho argiloso (450 g kg^{-1} de argila) a média da RE (0-5: 10-20 cm) do COT foi de 1,48 (Sá & Lal, 2009). Os mesmos autores também constataram a estreita correlação entre a RE (0-5: 5-10 cm) do COT com a taxa de seqüestro

de C para a camada de 0-10 cm, sugerindo que a interação desses parâmetros possa ser utilizada como indicadora do seqüestro de C em áreas sob plantio direto consolidado.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a relação de estratificação dos compartimentos da matéria orgânica do solo e nas classes de agregados como indicadora do seqüestro de C no sistema plantio direto consolidado.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Localização, clima e descrição da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido na Fazenda Escola Capão da Onça - FESCON (Figura 02), situada a 990 m de altitude sob as coordenadas geográficas 25°05'49" LS e 50°03'11" LW.

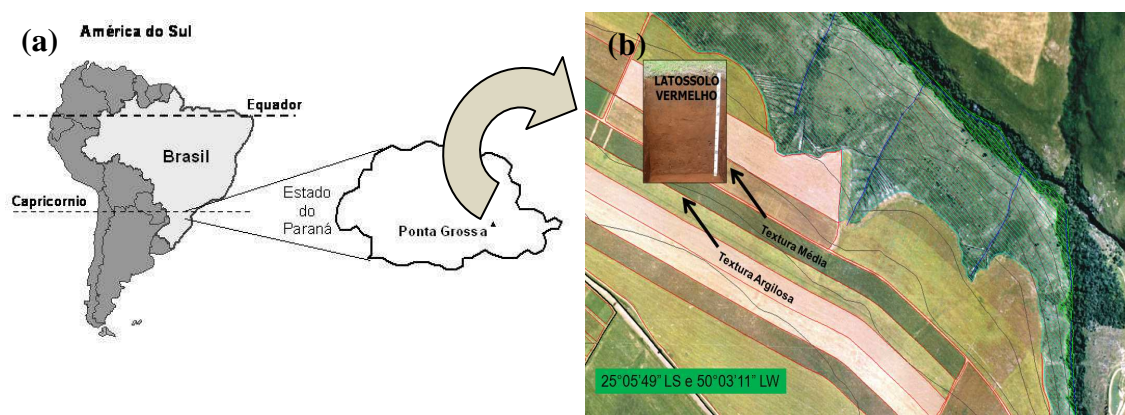


Figura 2 - Localização geral (a) e local da área experimental - FESCON (b)

A área experimental foi situada em uma toposequência abrangendo Latossolos Vermelho (Typic Hapludox), com texturas média e argilosa (Figura 2). O material de origem foi derivado de material retrabalhado de arenitos da formação Furnas e folhelhos da formação Ponta Grossa. A vegetação nativa regional é constituída por composição florística denominada campos subtropicais dos Campos Gerais-PR. O relevo é suave ondulado com pendentes entre 5 a 7% de declividade. O clima é caracterizado como subtropical úmido, mesotérmico, do tipo cfb (classificação de Koeppen). No ano do experimento (outubro de 2007 a setembro 2008) a temperatura média máxima foi de 26°C e a mínima de 13°C (Figura 3), e a pluviosidade total foi de 1558 mm (IAPAR, 2008).

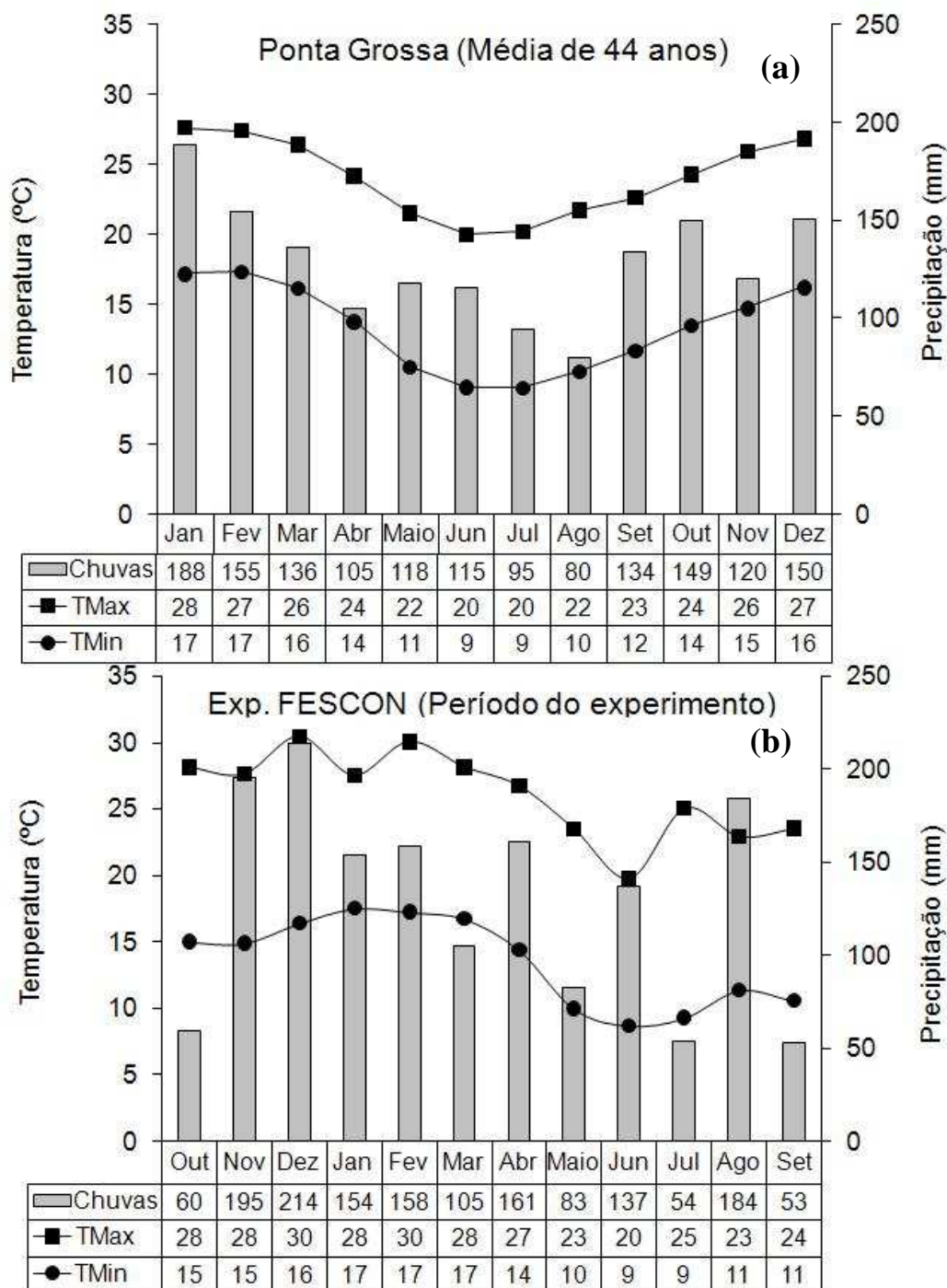


Figura 3. Dados históricos em Ponta Grossa: **(a)** distribuição mensal da precipitação pluviométrica (barras) relacionada com média da temperatura máxima (■ Tmax.) e temperatura mínima (● Tmin.) no período de 44 anos para os meses de janeiro a dezembro; **(b)** distribuição mensal da precipitação pluviométrica (barras) relacionada com média da temperatura máxima (■ Tmax.) e temperatura mínima (● Tmin.) no período de outubro de 2007 a setembro de 2008.

Esse estudo foi conduzido em um Latossolo Vermelho de textura média e argilosa, há longo período sob plantio direto (20 anos) com rotação de culturas: trigo/soja/aveia preta + ervilhaca/milho.

3.4.2 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi um arranjo em fatorial $2 \times 2 \times 2$ inteiramente casualizado com 12 tratamentos. Os fatores considerados foram:

- Solos: Latossolo Vermelho com textura média ($232,5 \text{ g kg}^{-1}$ de argila) e com textura argilosa (401 g kg^{-1} de argila);
- Profundidades de amostragem: 0-5 cm e 5-20 cm;
- Épocas de amostragem: Época 1 (E_1) após colheita do trigo (outubro de 2007); Época 2 (E_2) após o manejo mecânico (rolagem com rolo faca) da aveia preta + ervilhaca (setembro de 2008).

Os tratamentos foram dispostos no campo na forma de transectos conforme detalhes apresentados no croqui do experimento no campo (Figura 4).

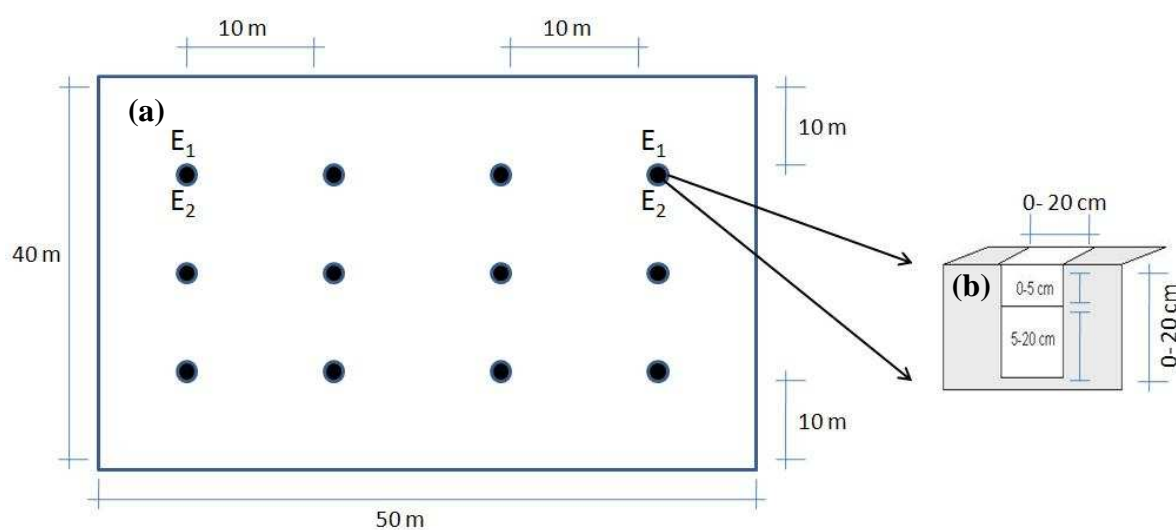


Figura 4 – Croqui do bloco (a) com o detalhe localização dos tratamentos e do procedimento de amostragem do solo (b).

Os resultados foram submetidos à análise de variância utilizando o software SISVAR 5.0, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Equações de regressão linear foram utilizadas para avaliar a variação temporal entre a RE e a taxa de seqüestro de C. Para a obtenção das curvas de resposta foi utilizado o procedimento da análise de regressão pelo programa JMP IN versão 3.2.1 (Sall et al., 2005), utilizando-se o teste F, a 5, 1 e 0,1% de probabilidade.

3.4.3 Amostragem do solo, análise granulométrica, química e densidade do solo

A análise granulométrica foi realizada através do método de Bouyoucos (Figura 5) conforme descrito por Embrapa (1997).



Figura 5. Detalhe do procedimento do método de Bouyoucos: **a)** agitação/dispersão; **b)** separação da fração areia e coleta da fração argila e silte na proveta; **c)** sucção da argila. (adaptado de Almeida, 2008).

As amostras para a determinação da densidade do solo (DS) foram coletadas em março de 2008, com a utilização de anéis volumétricos acopladas em um amostrador específico para a introdução e retirada dos anéis nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm

(Black & Hartge, 1986). Os resultados da DS (Tabela 1) foram utilizados para o cálculo do estoque de C e N.

Tabela 1. Média e desvio padrão da densidade do solo determinadas em três camadas de todas as unidades experimentais

Classe textural	Camada [†]	Média ^{††}	Desvio Padrão ^{†††}
	Cm	----- Mg m ⁻³ -----	
Média	0-5	1,52	0,08
	5-10	1,56	0,07
	10-20	1,58	0,06
Argilosa	0-5	1,31	0,09
	5-10	1,31	0,04
	10-20	1,34	0,06

[†] Na profundidade de 10-20 cm os anéis foram retirados entre 12,5 e 17,5 cm.

^{††} Os números de cada bloco nas camadas representam a média de três anéis coletados e de doze tratamentos.

^{†††} Representa o desvio padrão de doze repetições e da triplicata.

A análise química e granulométrica de todos os tratamentos nas duas profundidades de amostragem (0-5 e 5-20 cm) encontram-se na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química e física do Latossolo Vermelho com textura média (TM) e textura argilosa (TA).

Tratamento	Prof. (cm)	pH	H + Al ⁺³ (CaCl ₂)	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	CTC	P	C	Areia	Silte	Argila
			----- cmol _c dm ⁻³ -----							g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
TM	0-5	5,6	3,9	0,0	4,4	2,2	0,4	10,97	24,8	17,4	675	108	218
	5-20	4,8	6,0	0,4	1,8	1,7	0,2	9,69	3,3	10,7	659	94	247
TA	0-5	5,0	6,8	0,1	3,4	1,5	0,5	12,19	26,7	22,8	506	94	400
	5-20	5,0	6,3	0,2	2,7	1,6	0,3	10,90	12,4	17,0	509	89	402

3.4.4 Determinação de Carbono e Nitrogênio total

O conteúdo de C e N nas amostras integrais, nas classes de agregados e na fração particulada foi determinado pelo método da combustão seca utilizando um determinador elementar de C e N (TruSpec CN LECO[®] 2006, St. Joseph, EUA).

Nas classes de agregados 8 – 19, 4 – 8, 2 – 4, 1 – 2, 0,5 – 1 e 0,25 – 0,5 mm foi realizada a separação do carbono orgânico particulado (COP) e do nitrogênio total particulado (NTP), por meio de tamização via úmida utilizando as peneiras com 53 e 250 μm .

3.4.5 Estabilidade de Agregados

A separação das classes de agregados foi realizada pelo pré-tratamento das amostras no campo de acordo com Madari (2004), onde se preconiza a classificação de agregados naturais por tamanho sendo estes separados em grupos estáveis sob uma força destrutiva aplicada (Figura 6).



Figura 6. Detalhes das etapas do procedimento de amostragem no campo (pré-tratamento): **a)** trincheira; **b)** bloco de solo; **c)** tamanho dos agregados (adaptado de Madari, 2004).

Após a retirada das amostras de solo foi efetuada a determinação da distribuição das classes de agregados por meio do tamisamento a úmido, pelo método de Yoder (1936), modificado

por Castro Filho et al. (1998) utilizando-se o tamisador Yoder, com peneiras de 8, 4, 2, 1, 0,5 e 0,25 mm, (Figura 7).

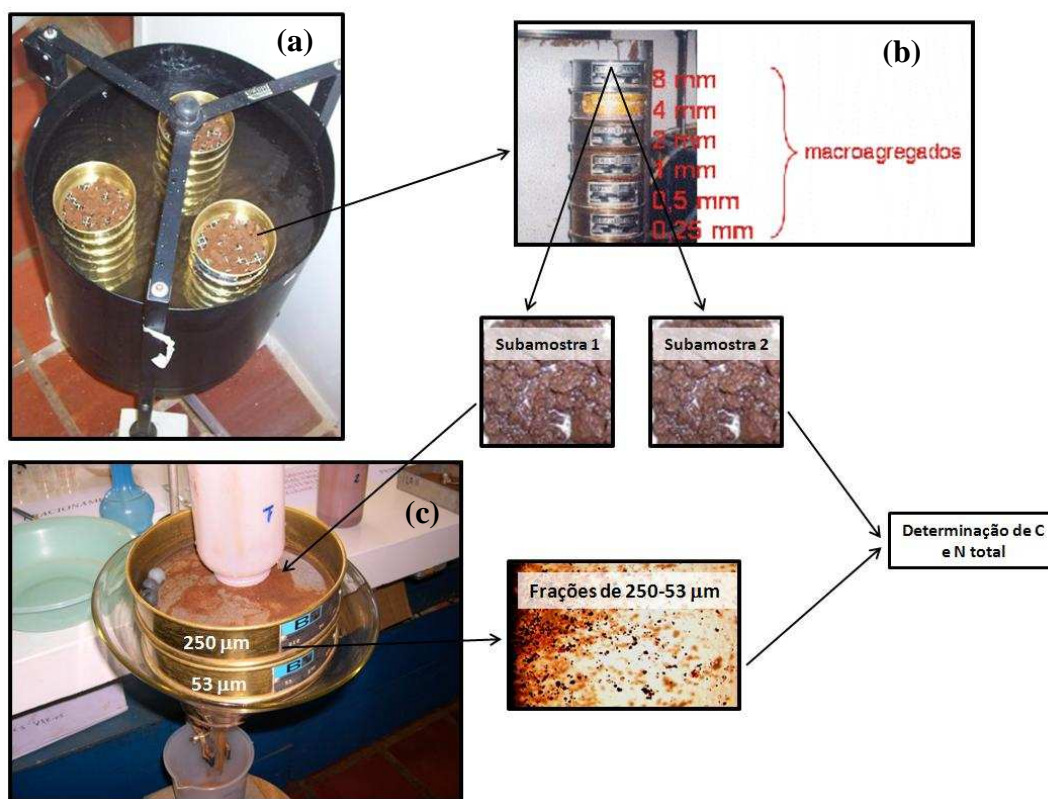


Figura 7. Detalhe do procedimento de tamisamento a úmido utilizando Yoder modificado por Castro Filho et al.,1998 (a); peneiras de 8, 4, 2, 1, 0,5 e 0,25 mm (b) e separação da MOP (c).

3.4.6 Sequência do fracionamento granulométrico para separação do carbono orgânico e do nitrogênio total particulado (53-250 µm)

Em cada classe de agregado (8-19, 4- 8, 2-4, 1-2, 0,5-1 e 0,25-0,5 mm) foi feito o fracionamento físico retirando COP e NTP (53µm – 250 µm). Cada amostra foi dividida em duas subamostras, sendo uma parte para determinação do C total e a outra para o fracionamento físico para retirada do COP (fração compreendida entre 53µm – 250 µm). Na fração particulada foi determinado o conteúdo de C e N pelo método de combustão descrito anteriormente.

O fracionamento físico da MO foi realizado segundo Feller (1994) e adaptação de Sá et al. (2001).

A separação do COP foi realizado nas classes de agregados em amostras secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e peneiradas em tamis de 2 mm. Em um frasco plástico de 1L pesou-se 40 g da amostra e adicionou-se 100 mL de H₂O e 0,75 g de hexametáfosfato de sódio e três bolas de vidro. Após ligeira agitação manual (\pm 15 segundos), os frascos foram mantidos em geladeira durante 16 hs para aumentar a retração dos minerais e as fissuras dos microagregados. Após esse período, os frascos foram agitados durante quatro horas em um agitador horizontal na frequência de 100 rpm. O critério para estabelecer o tempo de agitação foi obtido através de uma curva de dispersão com a avaliação de vários tempos de agitação: 0, 2, 4, 6, 8, 10 e 12 hs.

O conteúdo do frasco que estava sob agitação foi passado em peneiras de 250 e 53 μ m para obtenção da fração entre 53-250 μ m. Foi feita uma lavagem do frasco e das bolas de vidro sobre a peneira de 53 μ m. O material que ficou retido na peneira foi colocado em um béquer com capacidade de 50 ml previamente pesado e identificado e levado à estufa sob temperatura de 60°C com o objetivo não alterar as características do C presente na fração.

3.4.7 Cálculo da relação de estratificação do carbono orgânico e nitrogênio total

A RE foi calculada conforme Franzluebbbers (2002): em cada ponto amostrado, o valor de COT e NT da camada superficial do solo (0- 5 cm) foi dividido pelo valor da camada subsuperficial (5- 20 m). O delta (Δ) da relação de estratificação foi obtido da diferença entre a RE da época dois (setembro) menos a RE da época um (março). Da mesma forma que obteve-se o delta de estoque referente a taxa de seqüestro.

3.4.8 Mineralogia do perfil do solo

As análises da mineralogia foram realizadas em amostras de perfis de Latossolos Vermelhos situados na posição de topo da pedossequência analisada por Sá (1995). Nos difratogramas de raio X dos três horizontes analisados (Ap, Bw1 e Bw2) ocorre os seguintes minerais de argila: caulinita (22%), gibbsita (32%), e vermiculita com alumínio interlamelar (V-AL) citados por Sá (1995).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis COT e NT apresentaram interação significativa com a textura do solo, profundidade e época de amostragem. A relação de estratificação (RE) do NT apresentou interação significativa com a textura do solo e com a época de amostragem, já a relação de estratificação (RE) do COT apresentou interação significativa com a época de amostragem (Tabela 3), indicando um comportamento temporal. Resultados semelhantes foram encontrados por Franzluebbers (2002) em solos com características pedogenéticas contrastantes ao desse estudo (Texas e Georgia nos EUA e Alberta e British Columbia no Canadá) e por Sá & Lal (2009) na mesma região desse estudo.

Nas camadas amostradas (0-5 e 5-20 cm) as variáveis COT, NT apresentaram interação significativa com a textura do solo, com a profundidade, com a época de amostragem e com as classes de agregados. Já a variável COP, apresentou interação significativa com a textura do solo, a profundidade de amostragem e com as classes de agregados. A variável NTP apresentou interação significativa com a textura do solo, a época de amostragem e com as classes de agregados. A relação de estratificação (RE) do COT, NT, COP e NTP apresentaram interação significativa com a textura do solo, com a época de amostragem e com as classes de agregados. (Tabela 3), indicando que estas variações ocorrem no ambiente interno dos agregados. Alterações no conteúdo de COP e NTP são evidência do processo dinâmico de proteção do C e N em sistemas de manejo com aporte contínuo do C através dos resíduos culturais.

Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) do experimento

Causas da variação	Amostragem Integral				Agregados								
	Conteúdo		Relação Estratificação (0- 5: 5- 20 cm)		Conteúdo				Relação Estratificação (0- 5: 5- 20 cm)				
	COT	NT	COT	NT	COT	NT	COP	NTP	COT	NT	COP	NTP	
Textura (T)	*	*	n.s	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Profundidade (P)	*	*	-----	-----	*	*	*	n.s	-----	-----	-----	-----	-----
Época (E)	*	*	*	*	*	*	n.s	*	*	*	*	*	*
Classes de Agregados (CA)	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	*	*	*	*	*
C.V.(%)	17,46	12,13	27,64	47,13	17,81	23,92	33,96	58,44	19,04	28,79	39,16	48,07	
T x P	*	*	-----	-----	*	*	*	*	-----	-----	-----	-----	-----
T x E	*	*	n.s	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P x E	*	*	-----	-----	*	*	*	n.s	-----	-----	-----	-----	-----
T x P x E	*	*	-----	-----	*	*	*	*	-----	-----	-----	-----	-----
T x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	-----	-----	-----	-----	-----
E x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E x P x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	-----	-----	-----	-----	-----
T x E x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	*	*	*	*	*
T x P x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	-----	-----	-----	-----	-----
T x P x E x CA	-----	-----	-----	-----	*	*	*	*	-----	-----	-----	-----	-----
C.V.(%)	17,21	12,18	26,91	45,45	16,43	21,25	32,07	55,58	18,91	28,14	39,31	47,38	

3.5.1 Conteúdo e relação de estratificação de C e N na amostra integral

Na E_1 o conteúdo de COT e NT no LV textura média na camada de 0-5 cm foi 1,34 e 2,08 vezes superior ao encontrado na camada de 5-20 cm, respectivamente. Todavia na E_2 o conteúdo de COT apresentou um incremento superior a E_1 (1,58) na camada de 0-5 cm enquanto o NT foi somente 1,10 superior ao encontrado na camada de 5-20 cm (Tabela 4).

No LV textura argilosa, o conteúdo de COT na E_1 apresentou a mesma tendência observada no LV textura média, enquanto na E_2 ocorreu o inverso (Tabela 3). Entretanto, o conteúdo de NT apresentou o mesmo comportamento constatado no LV textura média nas duas épocas de amostragem.

Na E_1 , o conteúdo de COT no LV textura argilosa apresentou a mesma tendência observada no LV textura média, enquanto na E_2 observou-se o comportamento oposto (Tabela 3). Todavia, o conteúdo de NT teve o mesmo comportamento no LV textura média e argilosa, nas duas épocas de amostragem.

No LV textura argilosa (E_1) o conteúdo de COT e NT (Tabela 4) na camada superficial de 0-5 cm foi 1,31 e 1,54 vezes superior ao encontrado na camada de 5-20 cm, respectivamente. Já no mesmo solo, porém na E_2 , o conteúdo de COT e NT (Tabela 4) na camada superficial de 0-5 cm foi 1,34 e 1,02 vezes superior ao encontrado na camada de 5 – 20 cm, respectivamente. Esses dados foram semelhantes aos reportados por Sá et al. (2008), cujo conteúdo de C e N no LV textura argilosa na região dos Campos Gerais na camada de 0-5 cm foi de 1,90 e 2,06 superior ao encontrado na camada de 20- 40 cm, respectivamente.

Tabela 4. Estratificação do conteúdo e do estoque de C e N na amostra integral

Parâmetro	Textura	Epoca	Profundidade de coleta, cm	Compartimento da MOS (tipo)	
				COT [†]	NT ^{††}
Conteúdo, g kg ⁻¹	Média	E ₁	0 – 5	13,91 a	1,23b
			5 – 20	10,35 a	0,59b
		E ₂	0 – 5	16,96 a	4,36 a
			5 – 20	10,71 a	3,96 a
	Argilosa	E ₁	0 – 5	22,22 a	1,51b
			5 – 20	14,88b	0,98b
		E ₂	0 – 5	22,79 a	4,39 a
			5 – 20	16,98 a	4,22 a
Relação de Estratificação	Média	E ₁	0 – 5: 5 – 20	1,34 a	2,08 a
			E ₂	0 – 5: 5 – 20	1,58 a
	Argilosa	E ₁		0 – 5: 5 – 20	1,49a
			E ₂	0 – 5: 5 – 20	1,34b

[†] COT = carbono orgânico total; ^{††} NT= nitrogênio total;

A RE refletiu a variação do conteúdo de COT no LV textura média com valores de 1,46 para 1,55 e no LV de textura argilosa com valores de 1,59 para 1,29 (Tabela 4). Valores semelhantes a estes foram encontrados por Sá et al. (2008) em um LV argiloso para a mesma região para a camada de 0-5: 5- 20 cm, cujo valor médio foi de 1,48 para o COT e 1,55 para o NT. Em um LV textura argilosa (acima de 600 g kg⁻¹) o valor da relação de estratificação reportado por Tormena et al. (2004) foi de 1,73 e confirmou a influência do conteúdo de argila sobre o acúmulo de C.

A variação do conteúdo de COT entre a E₂ e E₁ não foi significativa para ambas as classes texturais, embora aja uma tendência no incremento de C (Tabela 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Bayer et al. (2004) que concluíram que em períodos curtos e em regiões subtropicais as alterações no estoque de carbono são pouco relevantes.

3.5.2 Conteúdo e relação de estratificação de COT, NT, COP e NTP nas classes de agregados

Os compartimentos de C foram afetados significativamente pela época de amostragem e apresentaram comportamentos diferenciados em função da classe textural. Observou-se maior conteúdo de COT e NT na classe de agregado entre 19-8 mm e variação em função da época de amostragem (Tabela 5).

Na classe 19-8 mm observou-se elevado conteúdo de C nas duas classes texturais estudadas e em ambas as profundidades. Também constatou-se na classe de agregados entre 0,25-0,5 mm, menor valor de COT em todos os compartimentos analisados em ambas as texturas e profundidades (Tabela 5). Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Assis et al. (2006), nos quais afirmam que os agregados maiores do que 4mm apresentam maiores teores de carbono e nitrogênio totais. Nesse estudo, a maior porcentagem de COT foi encontrada na classe entre 19-8 mm (Tabela 7).

Tabela 5. Conteúdo de C (g kg^{-1}) nos compartimentos (COT, NT, COP e NTP) nas classes de agregados de um LV com textura média e argilosa há longo período sob plantio direto (média de doze repetições^a)

Textura	Epoca	Profundidade de coleta, cm	Compartimento da MOS (tipo)	Classe de agregado, mm					Média	
				19- 8	8 - 4	4 - 2	2 - 1	1 - 0,5		0,5 - 0,25
Média	E ₁	0 - 5	COT	17,79 Ab	17,25 ABa	19,93 Aa	19,68 Aa	13,97 BCa	12,04 Ca	16,77
			NT	1,02 ABa	1,09 Aa	1,23 Aa	1,20 Aa	0,81 BCa	0,68 Ca	1,00
			COP	9,61 Aa	11,21 Aa	9,76 Aa	11,01 Aa	8,29 Aa	8,62 Aa	9,75
			NTP	0,42 ABa	0,54 Aa	0,62 ABa	0,69 Aa	0,31 Ba	0,59 ABa	0,53
		5 - 20	COT	12,50 Aa	12,26 ABa	12,49 Aa	11,91 ABa	11,34 ABa	8,95 Ba	11,57
			NT	0,59 Aa	0,65 Aa	0,68 Aa	0,57 Aa	0,49 Aa	0,53 Aa	0,58
			COP	4,07 Aa	4,36 Aa	5,51 Aa	4,55 Aa	3,77 Aa	3,72 Aa	4,33
			NTP	0,15 Aa	0,29 Ab	0,35 Aa	0,23 Aa	0,24 Aa	0,15 Aa	0,23
	E ₂	0 - 5	COT	20,43 Aa	15,81 Ba	15,18 Bb	16,03 Bb	13,71 BCa	11,10 Ca	15,37
			NT	1,01 Aa	0,79 ABa	0,86 Ab	0,85 Ab	0,57 BCa	0,53 Ca	0,76
			COP	10,00 Aa	8,61 Aa	10,56 Aa	10,12 Aa	10,22 Aa	8,54 Aa	9,67
			NTP	0,42 ABa	0,46 ABa	0,66 Aa	0,49 ABa	0,37 Ba	0,37 Ba	0,46
		5 - 20	COT	14,95 Aa	12,68 ABa	12,42 ABa	12,38 ABa	10,47 BCa	8,78 Ca	11,95
			NT	0,70 Aa	0,63 Aa	0,62 Aa	0,50 ABa	0,39 Ba	0,34 Bb	0,53
			COP	4,69 Aa	5,30 Aa	5,11 Aa	4,12 Aa	3,20 Aa	4,48 Aa	4,48
			NTP	0,21 Ba	0,65 Aa	0,21 Ba	0,21 Ba	0,21Ba	0,18 Ba	0,28
Argilosa	E ₁	0 - 5	COT	22,59 ABa	18,83 Ca	24,60 Aa	24,33 Aa	19,81 BCa	14,73 Da	20,81
			NT	1,21 ABa	0,96 CDb	1,36 Aa	1,34 Aa	1,05 BCa	0,74 Da	1,11
			COP	14,38 Aa	11,38 ABa	11,49 ABa	10,09 Aa	10,58 Ba	8,61 Ba	11,09
			NTP	0,78 Aa	0,68 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,67 Aa	0,58 Aa	0,66
		5 - 20	COT	19,16 Ab	18,71 Aa	20,28 Aa	19,88 Aa	17,36 Aa	13,20 Ba	18,10
			NT	0,86 ABb	0,94 Aa	1,36 A	0,94 Aa	0,88 ABa	0,62 Ba	0,93
			COP	10,81 Aa	7,26 ABCa	9,74 ABa	8,54 ABCa	6,99 BCa	6,01 Ca	8,22
			NTP	0,47 Aa	0,46 Aa	0,50 Aa	0,55 Aa	0,52 Aa	0,26 Aa	0,46
	E ₂	0 - 5	COT	21,06 Aa	21,18 Aa	21,38 Ab	21,23 Ab	19,01 Aa	14,44 Ba	19,72
			NT	1,22 Aa	1,18 ABa	0,98 Bb	1,11 AB	1,00 ABa	0,72 Ca	1,03
			COP	11,83 Aa	10,05 ABa	10,91 Aa	11,44 Aa	10,45 Aa	6,96 Bb	10,27
			NTP	0,64 ABa	0,37 BCa	0,60 ^a	0,54 ABCa	0,52 ABCa	0,37 Ca	0,51
		5 - 20	COT	23,30 Aa	18,97 Ba	18,55 Ba	18,95 Ba	16,43 Ba	12,24 Ca	18,07
			NT	1,08 Aa	0,68 BCb	0,90 AB	0,89 ABa	0,83 Ba	0,53 Ca	0,81
			COP	11,55 Aa	7,25 Ba	8,11 Ba	7,50 Ba	7,28 Ba	6,75 Ba	8,07
			NTP	0,50 Aa	0,46 Aa	0,42 Aa	0,49 Aa	0,53 Aa	0,29 Aa	0,45

[†] COT = carbono orgânico total; [‡] COP = carbono orgânico particulado; [§] NT= nitrogênio total; [¶] NTP= nitrogênio total particulado ^aMédia de 12 repetições ^bMédias seguidas por letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Comparação entre épocas na coluna (dentro da mesma textura, profundidade e compartimento) e comparação entre classes de agregados na linha (dentro de cada compartimento).

Tabela 6. Relação de estratificação de COT, NT, COP e NTP nas classes de agregados de um LV com textura média e argilosa há longo período sob plantio direto (média de doze repetições^a)

Textura	Epoca	Profundidade de coleta, cm	Compartimento da MOS (tipo)	Classe de agregado, mm						Média
				19- 8	8 – 4	4 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	
Média	E ₁	0-5: 5-20	COT [†]	1,42 ABa ^b	1,41 ABa	1,60 ABa	1,65 Aa	1,23 Ba	1,35Ba	1,44
			NT [†]	1,73ABa	1,68ABa	1,81ABa	2,09Aa	1,65ABa	1,29Ba	1,71
			COP [†]	2,36Aa	2,57Aa	1,77Aa	2,42Aa	2,20Ab	2,31Aa	2,27
			NTP [†]	2,89ABCa	1,88CDa	1,78BCDb	2,95ABa	1,31Da	4,03Aa	2,47
	E ₂	0-5: 5-20	COT	1,37 Aa	1,25 Aa	1,22 Ab	1,30Ab	1,31Aa	1,26Aa	1,28
			NT	1,45ABa	1,25Bb	1,39Bb	1,72Aa	1,48ABa	1,55ABa	1,47
			COP	2,13ABa	1,62Bb	2,07ABa	2,46ABa	3,20Aa	1,91ABa	2,23
			NTP	2,02Ba	0,71Ca	3,15Ab	2,32ABa	1,75Ba	2,09ABb	2,00
Argilosa	E ₁	0-5: 5-20	COT	1,18ABa	1,01Ba	1,21Aa	1,22Aa	1,14ABa	1,12ABa	1,15
			NT	1,41Aa	1,02Ab	1,00Aa	1,43Aa	1,19Aa	1,19Aa	1,20
			COP	1,32Aa	1,57Aa	1,18Aa	1,65Aa	1,51Aa	1,43Aa	1,44
			NTP	1,67ABa	1,48Ba	1,27Ba	1,15Ba	1,28Ba	2,22Aa	1,51
	E ₂	0-5: 5-20	COT	0,90Ab	1,12Aa	1,12Aa	1,12Aa	1,16Aa	1,18Aa	1,10
			NT	1,13Ba	1,74Aa	1,10Ba	1,25Ba	1,20Ba	1,36Ba	1,30
			COP	1,02Aa	1,39Aa	1,35Aa	1,53Aa	1,44Aa	1,03Ab	1,29
			NTP	1,29ABa	0,80Bb	1,44Aa	1,11ABa	1,00Ba	1,29ABb	1,15

[†] COT = carbono orgânico total; [†] COP = carbono orgânico particulado; [†] NT= nitrogênio total; [†] NTP= nitrogênio total particulado

^aMédia de 12 repetições ^bMédias seguidas por letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Comparação entre épocas na coluna (dentro da mesma textura, profundidade e compartimento) e comparação entre classes de agregados na linha (dentro de cada compartimento).

O conteúdo médio de COT, NT, COP e NTP na camada superficial de 0-5 cm para as seis classes de agregados no LV com textura média na E₁ (Tabela 6) foi 1,44; 1,71; 2,27 e 2,47 vezes superior ao encontrado na camada de 5–20 cm, respectivamente. Entretanto, na E₂ para a mesma textura na camada de 0-5 cm, o conteúdo médio de COT, NT, COP e NTP foi 1,28; 1,47; 2,23 e 2,00 vezes superior ao encontrado na camada de 5–20 cm. Embora tenham sido ligeiramente inferiores para NT e NTP, manteve-se a mesma tendência entre a camada de 0-5 e 5-20 cm indicando que no período avaliado a variação no conteúdo de COT foi na camada superficial, portanto diretamente influenciada pela adição de C dos resíduos culturais (Tabela 6).

O LV textura argilosa teve um comportamento diferenciado para esses compartimentos em relação à textura média (Tabela 6). Na E₁ os conteúdos médios do COT e NT na camada de 0-5 cm foram de 1,15; 1,20, enquanto na E₂ foram de 1,10; 1,30 superiores aos encontrados na camada de 5–20 cm. Esse comportamento indica que no LV textura argilosa a taxa de conversão do C oriundo dos resíduos culturais foi inferior ao LV textura média e a ação dos agentes temporários na contribuição do COT na textura média parece ter sido mais importante. Esse efeito pode ser explicado pela característica dos agregados formados em solos com textura média, que têm poros maiores e possibilitam maior ocupação dos mesmos pelas raízes que irão aumentar a formação de bioporos (Tormena et al.,2007). Em contraste, na E₁ o conteúdo de COP e NTP na camada superficial de 0-5 cm apresentaram aumentos expressivos de 1,44 e 1,51 vezes superior ao encontrado na camada de 5–20 cm, respectivamente e na E₂ foram 2,29 e 1,15 vezes superior ao encontrado na camada de 5–20 cm (Tabela 6). Esses resultados mostram a importância do COP, especialmente na classe dos macroagregados maiores que 4 mm, como um indicador do seqüestro de C conforme

reportado por vários autores (Bayer et al., 2001; Sá et al., 2001, Six et al., 2002; Amado et al., 2006 e Fabrizzi et al., 2009).

A média do conteúdo de COT, NT, COP e NTP (Tabela 6) na camada superficial de 0-5 cm em relação à camada de 5-20 cm nas duas épocas de amostragem (1,36; 1,59; 2,25 e 2,23, respectivamente) no LV textura média foi superior ao LV textura argilosa (1,12; 1,25; 1,36 e 1,33, respectivamente). A RE (0-5:5-20 cm) de COT, NT, COP e NTP também foi mais acentuada no LV textura média, indicando a importância da textura do solo na conversão e decomposição do C e N oriundos de resíduos orgânicos.

No LV com textura média constatou-se que a porcentagem de cálcio (Ca) na $CTC_{pH\ 7,0}$ na camada superficial de 0-5 cm foi de 48% e superou em 2,82 vezes o valor encontrado na camada de 5–20 cm (17%). No LV com textura argilosa a porcentagem de Ca na camada superficial de 0-5 cm foi de 41% e apenas 1,37 vezes superior ao encontrado na camada de 5–20 cm (30%). Esse resultado indica maior RE do Ca no LV de textura média, corroborando com as observações de outros autores (Six et al., 2004; Bronick & Lal, 2005) que afirmaram que o Ca é considerado um elemento chave para a estabilização da MOS e de agregados. Também reportaram o papel do Ca na formação de complexos com a argila e com a matéria orgânica, através da formação de pontes catiônicas e contribuindo para a melhoria da agregação na camada superficial. Este argumento pode ser respaldado pela relação significativa entre % de Ca (e.g. % de Ca na $CTC_{pH\ 7,0}$) e o COT do solo (Figura 8) para as duas classes de texturais, embora a relação tenha sido mais expressiva no LV textura média.

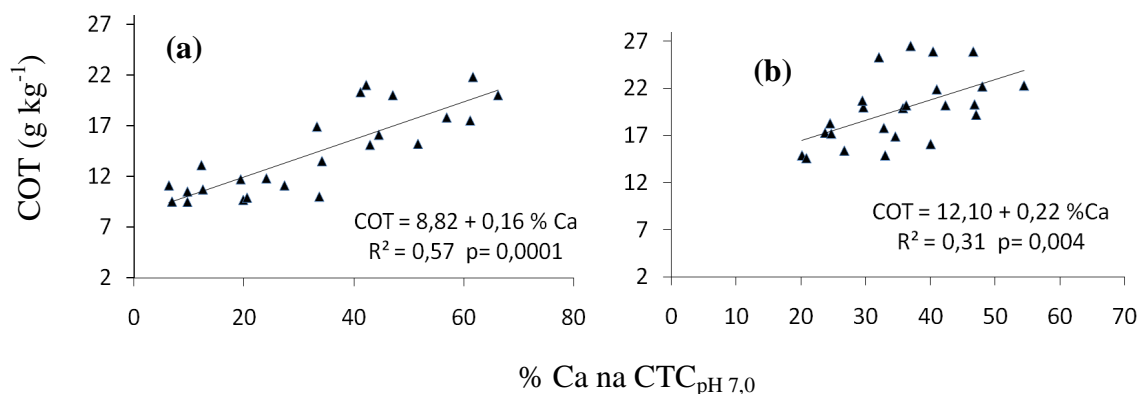


Figura 8. Regressão entre a % de Ca na CTC_{pH 7,0} e o conteúdo de carbono orgânico total do solo (COT) na camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. **(a)** Textura média, **(b)** textura argilosa.

Também constatou-se elevada afinidade entre o COT e a CTC_{pH 7,0} indicando que em solos cultivados a longo período sob plantio direto essas variáveis se ajustam com o passar do tempo. Obteve-se uma alta e significativa correlação positiva entre conteúdo de COT e CTC_{pH 7,0} (Figura 9). Resultados semelhantes foram reportados por Sá et al. (2009a), onde a relação entre estes dois parâmetros foi linear e significativa.

A redução no conteúdo de COT nas camadas mais profundas do solo indica a ocorrência de uma estratificação entre a camada superficial e a subsuperficial devido à adição contínua de C pelos resíduos orgânicos enriquecendo a camada superficial do perfil do solo (Sá & Lal, 2009). Esse enriquecimento mantém a qualidade do solo através da melhor agregação facilitando as trocas gasosas e fluxo de água no perfil (Doran & Parking, 1994; Franzluebbbers, 2007).

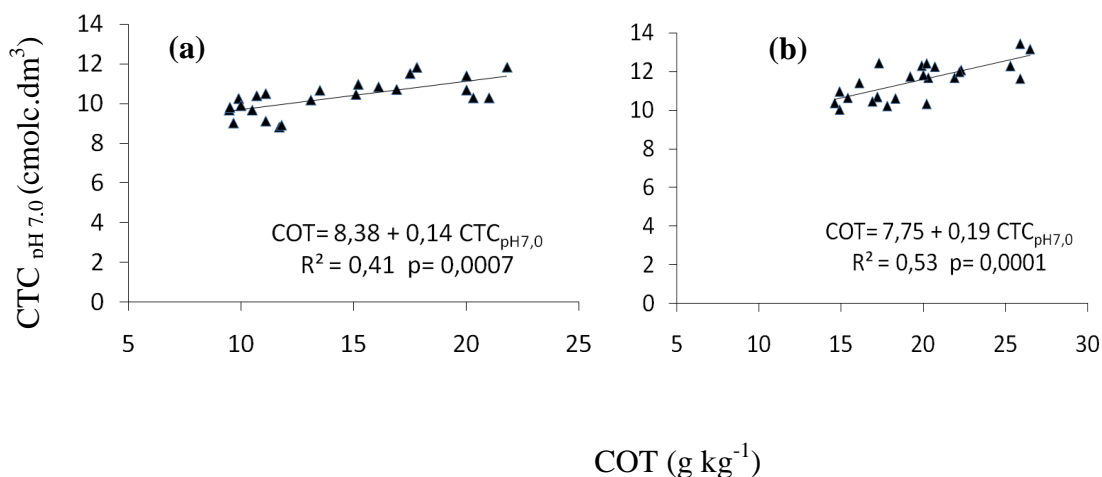


Figura 9. Regressão entre o carbono orgânico total do solo (COT) e a capacidade de troca catiônica em pH 7,0 ($CTC_{pH\ 7,0}$) na camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. **(a)** Textura média, **(b)** textura argilosa.

3.5.3 Interação da variação da relação de estratificação (ΔRE) com variação do estoque de COT (ΔCOT)

A relação linear e significativa ($p = 0,008$ e $p = 0,002$) entre o ΔRE (0-5:5-20 cm) e a taxa de seqüestro de C (ΔCOT) indica que o aumento da taxa de seqüestro está sendo representado pelo aumento da estratificação do COT (Figura 10). Este comportamento resume o princípio do SPD que integra as adições contínuas de C através dos resíduos culturais com o processo de decomposição no qual parte do C é convertido em COT e o restante retorna à atmosfera na forma de CO_2 . Estes resultados confirmam os argumentos apresentados por outros autores (Amado et al., 2006; Bayer et al., 2006; Cerri et al., 2007) de que o SPD consolidado é um sistema que está direcionando o solo para atuar como um dreno de C. Sendo assim, a adição contínua de carbono pelos resíduos orgânicos vai enriquecendo a camada superficial do perfil do solo promovendo o aumento da relação de estratificação e o potencial de seqüestro de COT no solo (Sá & Lal, 2009).

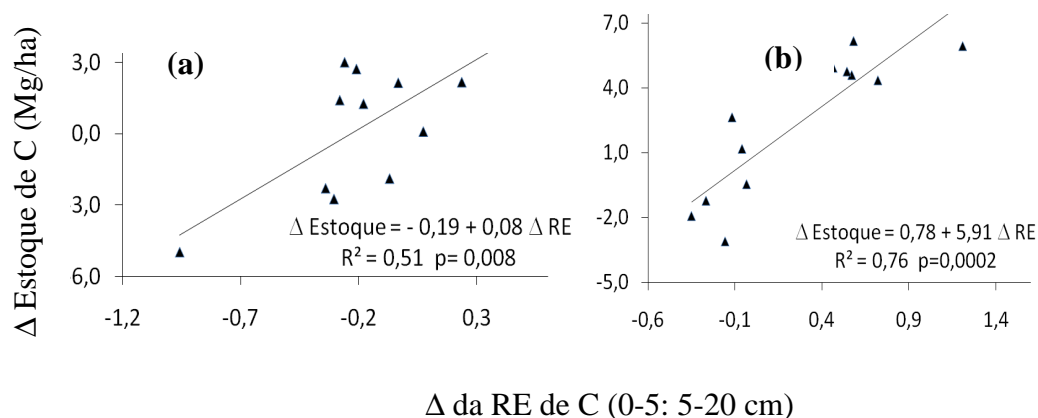


Figura 10. Regressão entre a variação da relação de estratificação ($\Delta RE = RE$ da $E_2 - RE$ da E_1) e a variação do estoque de COT (Δ estoque = Estoque $E_2 -$ Estoque E_1) na camada 0-5 cm de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. (a) Textura argilosa, (b) textura média. RE = relação de estratificação.

O valor médio da RE no LV sob textura média na E_1 foi de 1,34 aumentando para 1,58 na E_2 com ganho de 18%, e apresentou relação linear significativa com a taxa de seqüestro de carbono (Figura 10b). Em contraste, a RE na E_1 no LV textura argilosa decresceu de 1,49 para 1,34 na E_2 , indicando que para esta textura o intervalo de amostragem não foi suficiente para que a ΔRE refletisse o seqüestro de carbono. Segundo Franzluebbbers (2002) e Sá & Lal (2009) a alta correlação de estratificação de C do solo representa uma alta qualidade superficial que leva a melhor infiltração da água, rápida transmissão da água no perfil do solo e uma maior estabilidade de agregados. Nesse estudo ficou demonstrado que a RE acompanhou o aumento no estoque de COT confirmando a hipótese sobre o uso deste parâmetro como um indicador do seqüestro de COT em solos sob plantio direto de longa duração.

O NT apresentou a mesma tendência do COT tanto na amostra integral como na fração particulada (Figura 11) confirmando a estreita relação destas variáveis.

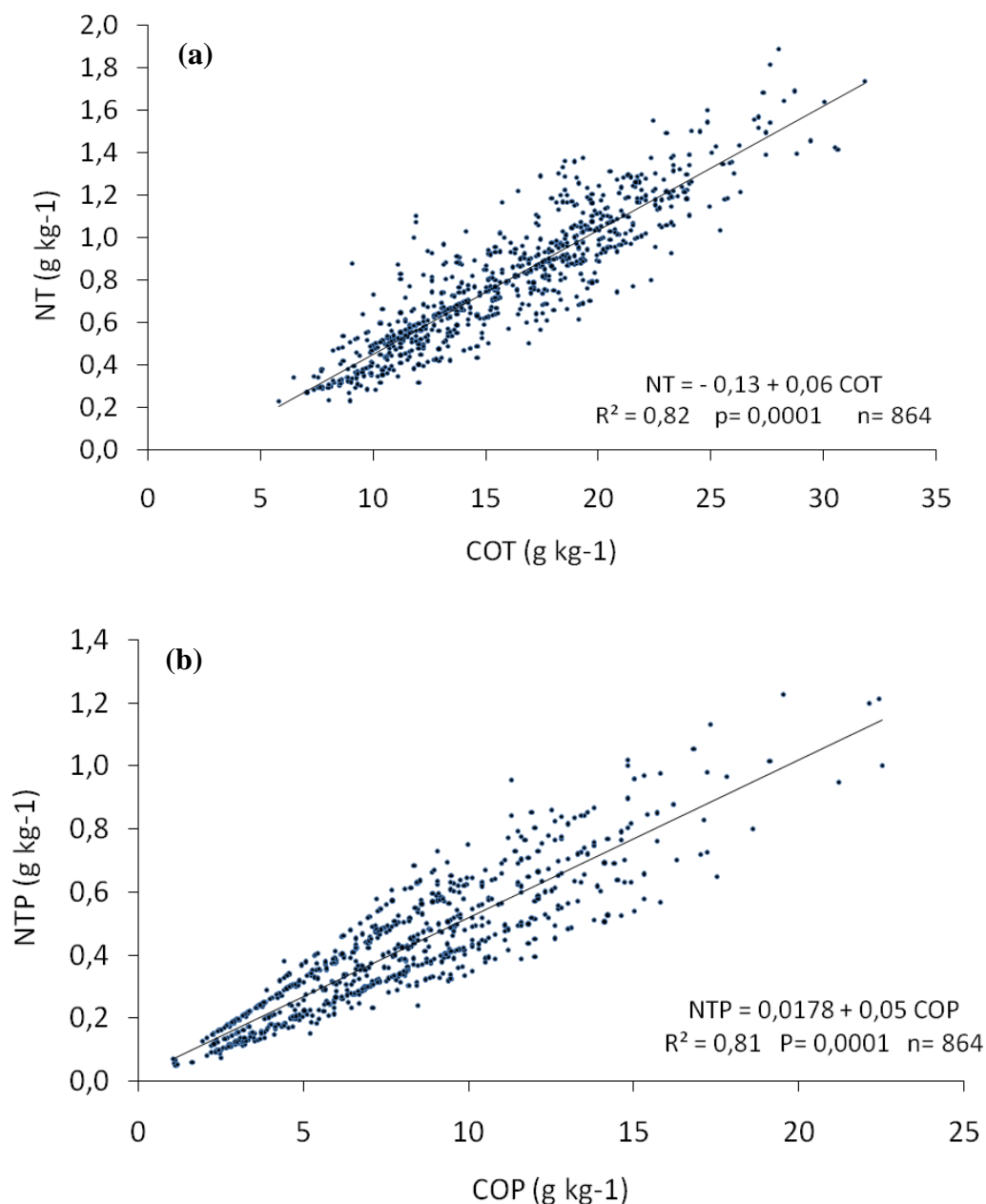


Figura 11. Regressão entre: (a) carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT); (b) carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio total particulado (NTP) de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração.

Embora o intervalo de amostragem tenha sido de um ano, a variação do estoque de COT nos macroagregados foi significativa e ocorreu principalmente na fração lábil. As equações de regressão entre o Δ RE (0-5:5-20 cm) e a taxa de seqüestro de COT para a camada de 0-5 cm na classe de agregado entre 8 – 19 mm (Figura 12) indicaram maior sensibilidade com as alterações no estoque de COT. Além disso, coincidem com os

resultados reportados por Sá et al. (2009b) nesta mesma classe de solo, nos quais esses autores mostraram que a fração lábil representa 28,9% do COT.

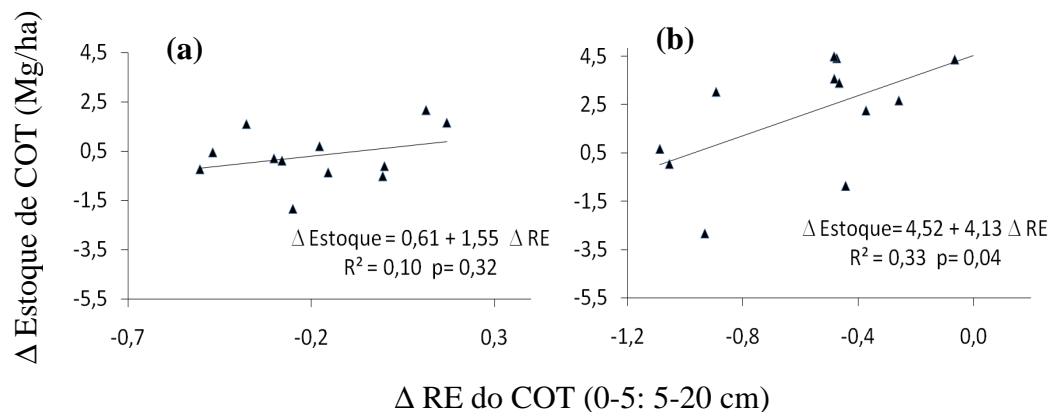


Figura 12. Curva de regressão entre o Δ RE (0-5:5-20 cm) do COT e o Δ do estoque de COT na classe de agregado entre 19-8 mm, na camada de 0-5 cm, de um Latossolo Vermelho com 20 anos de plantio direto. (a) textura argilosa, (b) textura média.

A maior porcentagem de COT e COP foi constatada na classe de agregados entre 19-8 mm (Tabela 7), e acredita-se que a principal razão seja devido à ação dos agentes temporários (raízes e hifas de fungos) e também à quantidade de C liberado por essas raízes no ambiente interno dos macroagregados (Tisdall & Oades, 1982). Esses resultados indicam que a relação linear entre o Δ RE (0-5:5-20 cm) do COT e Δ do estoque de COT na classe de agregados entre 19-8 mm seja mais importante do que nas demais classes analisadas (Figura 12).

A contribuição das raízes na formação, manutenção e tamanho dos agregados foi detalhada por Six et al. (2006), onde estes autores sugerem que as raízes de gramíneas estão associadas à liberação de polissacarídeos e elevada colonização por hifas de micorrizas e por isso são mais eficientes no aumento da estabilidade de agregados do solo. Assim, as diferentes práticas de manejo que propiciem maior e melhor

enraizamento das culturas, bem como a presença de gramíneas na rotação de culturas, poderão melhorar os processos de agregação do solo.

Tabela 7. Porcentagem de carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico particulado (COP) nas classes de agregados de um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa sob plantio direto de longa duração.

Classe textural	Profundidade de coleta, cm	Compartimento da MOS	Classe de agregado, mm						
			19-8	8-4	4-2	2-1	1-0,5	0,5 – 0,25	
Média	0-5	COT	86,36	2,66	2,00	2,27	2,97	3,15	
		<i>COP</i>	<i>52,53</i>	<i>9,95</i>	<i>10,06</i>	<i>8,30</i>	<i>7,33</i>	<i>11,82</i>	
	5-20	COT	85,59	2,80	2,34	2,43	3,62	3,23	
		<i>COP</i>	<i>60,96</i>	<i>8,31</i>	<i>9,38</i>	<i>4,34</i>	<i>7,27</i>	<i>9,74</i>	
	Argilosa	0- 5	COT	83,98	3,06	3,00	2,75	3,53	3,69
			<i>COP</i>	<i>64,36</i>	<i>7,49</i>	<i>7,06</i>	<i>6,20</i>	<i>7,70</i>	<i>7,18</i>
5-20		COT	85,93	3,16	2,75	2,62	2,92	2,61	
		<i>COP</i>	<i>67,85</i>	<i>8,83</i>	<i>6,98</i>	<i>6,02</i>	<i>4,21</i>	<i>6,11</i>	

As equações de regressão entre o Δ RE (0-5:5-20 cm) e a taxa de seqüestro de COP na camada de 0-5 cm não apresentaram relação linear significativa embora a maior porcentagem de COT e COP encontrem-se na classe de agregado de 8-19 mm (Tabela 7).

A equação de regressão entre o delta da relação de estratificação (0-5: 5-20 cm) e o delta do conteúdo de COT e COP na camada de 0-5 cm explica o fato de que o conteúdo de COT está intimamente relacionado com a estratificação do C em camadas. Além do estoque de COT, a variação de COT nos macroagregados, em um curto espaço de tempo (1 ano) também foi sensível para explicar a dinâmica da matéria orgânica nestes solos. Isto indica que o COT e COP da fração lábil desse solo sofre mudanças em curto espaço de tempo, mesmo se tratando de um solo com 71,1% de C associado aos minerais e 28,9% de C associado na fração lábil do solo (Sá et al. 2009b). A equação de regressão entre o delta da RE (0-5: 5-20 cm) e o delta do conteúdo de COT e COP nas duas texturas explica o fato de que o conteúdo de COT e

COP está intimamente relacionado com a estratificação do C dentro das classes de agregados desses compartimentos (Tabela 8). Essa relação foi mais acentuada no compartimento do COP, e foi significativa nas duas texturas. Isso confirma que a RE é também um indicador sensível do acúmulo de carbono dentro das classes de agregados (19-0,25 mm).

Tabela 8. Equações de regressão entre a variação do estoque de COT (Δ COT[§]) e do delta COP (Δ COP[§]) com o delta da RE[§] (0-5:5-20 cm)

Compartimentos	Textura	Classe de agregado (mm)	Equação	R ²	Nível de significância (p)	
COT	Média	19-8	Δ COT= 5,80 + 6,71 Δ RE	0,43	0,02	
		8-4	Δ COT= -0,76 + 4,98 Δ RE	0,31	0,06	
		4-2	Δ COT= -1,16 + 6,10 Δ RE	0,36	0,04	
		2-1	Δ COT= -1,93 + 1,89 Δ RE	0,12	0,26	
		1-0,5	Δ COT= -0,28 + 3,96 Δ RE	0,25	0,09	
		0,5-0,25	Δ COT= -0,68 + 5,12 Δ RE	0,62	0,002	
		Argilosa	19-8	Δ COT= 1,49 + 7,31 Δ RE	0,40	0,02
	8-4		Δ COT= 1,08 + 4,14 Δ RE	0,16	0,18	
	4-2		Δ COT= -2,26 + 1,56 Δ RE	0,09	0,35	
	2-1		Δ COT= -2,76 + 4,70 Δ RE	0,14	0,21	
	1-0,5		Δ COT= -0,89 + 2,53 Δ RE	0,036	0,55	
	0,5-0,25		Δ COT= -0,55 + 3,60 Δ RE	0,40	0,02	
	COP		Média	19-8	Δ COT= 0,18 + 1,60 Δ RE	0,28
		8-4		Δ COT= -0,83 + 1,78 Δ RE	0,18	0,17
4-2		Δ COT= -0,49 + 2,46 Δ RE		0,64	0,001	
2-1		Δ COT= -0,20 + 1,09 Δ RE		0,17	0,18	
1-0,5		Δ COT= -0,36 + 1,59 Δ RE		0,47	0,01	
0,5-0,25		Δ COT= 1,26 + 2,74 Δ RE		0,54	0,006	
Argilosa		19-8		Δ COT= -1,70 + 3,23 Δ RE	0,41	0,01
		8-4	Δ COT= -0,77 + 2,37 Δ RE	0,25	0,09	
		4-2	Δ COT= -1,46 + 5,20 Δ RE	0,49	0,01	
		2-1	Δ COT= -0,29 + 0,79 Δ RE	0,04	0,51	
		1-0,5	Δ COP= -0,38 + 2,92 Δ RE	0,44	0,01	
		0,5-0,25	Δ COT= -0,15 + 2,77 Δ RE	0,56	0,005	

[§] Delta COT (Δ COT) e delta COP (Δ COP) representa o C acumulado calculado pela diferença do estoque: estoque de C na E_2 – estoque de C na E_1 , delta da RE (0-5:5-20 cm) representa a variação da RE entre a $E_2 - E_1$.

3.6 CONCLUSÕES

O carbono orgânico total (COT) e o nitrogênio total (NT) nas amostras integrais apresentaram interação significativa com a textura do solo, com a profundidade e com a época de amostragem;

A relação de estratificação (RE) do NT apresentou interação significativa com a textura do solo e com a época de amostragem;

A RE do COT e NT indicaram o enriquecimento da camada superficial, enquanto a RE do carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio total particulado do solo indicaram a alteração de C e N entre as classes de agregados e melhoria na qualidade do solo.

A maior porcentagem de COT e COP foi constatada na classe de macroagregados maior do que 8 mm;

A equação de regressão entre o delta (Δ) da RE e o delta do conteúdo de COT e COP na camada de 0-5 cm explica que o conteúdo de COT está intimamente relacionado com a estratificação do C em camadas.

A relação linear e significativa entre o Δ RE do COT com a taxa de seqüestro de COT no Latossolo Vermelho (LV) nas duas classes texturais indicou aumento no seqüestro, sendo este mais evidente no LV com textura média.

Os resultados obtidos permitem confirmar a hipótese da RE ser um indicador sensível para a avaliação da taxa de seqüestro de C em sistema plantio direto consolidado.

4. RESISTÊNCIA TÊNซิล DE AGREGADOS E CARBONO EM UM LATOSSOLO VERMELHO EM PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

4.1 RESUMO

O comportamento em macroescala do solo depende das propriedades mecânicas de agregados individuais. A resistência tênsil (RT) de agregados do solo é uma das propriedades mecânicas mais úteis e utilizadas como indicadora do impacto do manejo na qualidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da RT em rela o ao conteúdo do carbono orgânico total (COT) em pedossequência de Latossolo Vermelho de texturas argilosa e m dia, em sistema plantio direto de longa dura o. O delineamento experimental utilizado foi fatorial 2x2x2 inteiramente casualizado com 12 tratamentos. Os fatores analisados foram: (a) solos: Latossolo Vermelho textura média e argilosa; (b) profundidades de amostragem: 0-5 e 5-20 cm; (c)  pocas de amostragem (E_1 -outubro de 2007; E_2 -setembro de 2008). Para a determina o da resistência tênsil foram coletados 1440 blocos de solo, sendo 720 para a E_1 (360 blocos com as dimensões de 15 cm de largura e 20 cm de comprimento para a profundidade de 5 cm e 360 blocos para a profundidade de 5 a 20 cm) e 720 para a E_2 com as mesmas dimensões e profundidades. A RT e o conteúdo de COT foram mensurados em 1920 agregados para cada época de amostragem (e.g. 40 agregados para cada tratamento x 12 tratamentos x 2 profundidades de amostragem x 2 solos = 1920). A RT reduziu   medida que o conteúdo de COT aumentou e com maior impacto no LV textura argilosa, ou seja, o conteúdo de argila influenciou no comportamento da RT que respondeu inversamente proporcional ao conteúdo de argila. Constatou-se também que a RT aumentou juntamente com o incremento na densidade do solo. O impacto do conteúdo de COT na RT foi mais importante na camada superficial do solo de 0-5 cm do que na camada de 5-20 cm.

Palavras-chave: Classes de agregado, resistência tênsil, carbono orgânico, densidade do solo

4.2 SUMMARY

The tensile strength (TS) of soil aggregates has been used as an indicator of management effect, because the response to soil physical and mechanical systems affected by land use. The objective of this study was to evaluate the changes of TS in relation to the variation of soil organic carbon (SOC) content in an Oxisol (Red Latosol) with medium and clayey texture under a long term no-tillage system. The experimental design was completely randomized 2x2x2 factorial with 12 treatments. The factors analyzed were: (a) Soil: Red Latosol with medium and clayey texture, (b) sampling depth: 0-5 and 5-20 cm, (c) two times of sampling (October 2007-T₁, September 2008-T₂). To determine the TS were sampled 1440 block of soil, and 720 for E₁ (360 blocks with dimensions of 15 cm wide and 20 cm in length to the 5 cm depth and 360 blocks to 5 to 20 cm depth) and 720 for E₂ with the same dimensions. The TS and SOC content were measured in 1920 aggregates for each sampling time (i.e. 40 aggregates for each treatment x 12 treatments x 2 soil texture x 2 soil depths = 1920). The RT decreased as the SOC content has increased and with greater impact on Red Latosol with medium texture. The content of clay affect the TS behavior that responded inversely proportional to the clay content. It was found that the RT increased with the increase in soil density. The impact of SOC content in TS was greater in the soil surface layer (0-5 cm) than in 5-20 cm layer.

Key-words: tensile strength, clay, no-tillage, soil organic carbon

4.3 INTRODUÇÃO

Este capítulo abordará o “Reservatório” *lentamente oxidável* que está relacionado com os macroagregados (neste caso de 15,75 mm) e que são controlados pela mineralogia e pelos fatores agronômicos que interferem na agregação. Dentre estes, os sistemas de manejo do solo influenciam no tamanho desse reservatório.

O comportamento em macroescala do solo depende das propriedades mecânicas de agregados individuais. A resistência tênil (RT) de agregados do solo é utilizada como indicadora do impacto do manejo na qualidade do solo, devido à resposta do solo aos processos físicos e mecânicos que ocorrem com o uso da terra. A RT é definida como o estresse ou força por unidade de área requerida para fraturar os agregados do solo, quando submetidos a uma pressão (Dexter & Watts, 2000). Esse parâmetro é influenciado por diversos fatores como a umidade do solo (Utomo & Dexter, 1981), o conteúdo de argila dispersa no solo, os ciclos de umedecimento e secagem, o teor de matéria orgânica do solo (Dexter & Watts, 2000), o teor e a mineralogia da fração argila (Kemper, 1987) e os materiais cimentantes (Kay & Dexter, 1992), além das condições climáticas, práticas de manejo e características do solo (Kay & Dexter, 1992). Em razão disso, a RT dos agregados tem sido proposta como uma medida sensível para avaliar o efeito na estrutura do solo nos sistemas de manejo (Watts & Dexter, 1997; Munkholm et al., 2001; Munkholm & Schjønning, 2004; Blanco-Canqui et al., 2005).

Na região dos Campos Gerais é comum a ocorrência de pedossequências com variações na topografia, na profundidade do solo, no grau de intemperismo químico, nas classes de solos e nos gradientes texturais. Decorrente disso, especialmente em

Latossolos Vermelhos, o sistema plantio direto (SPD) de longa duração aliado ao fluxo contínuo de carbono oriundo de resíduo cultural tem tido uma importância na contribuição da proteção física da MOS (Sá et al, 2001 e 2008). Imhoff (2002) mostra que a MOS pode contribuir para o aumento dos valores de RT, quando o teor de argila+silte é elevado, visto que a MO pode estabilizar os microagregados ao ser incorporada nos pequenos espaços existentes entre os domínios de argila.

Imhoff et al. (2002) e Tormena et al. (2008b) não encontraram correlação significativa entre o conteúdo de C dos agregados do solo e a resistência tênsil. Já Watts & Dexter (1998), em razão da utilização de solos com faixa mais ampla de teor de C orgânico, obtiveram correlação significativa entre esses parâmetros.

Tormena et al. (2008a), em LV de textura média, observaram correlação linear significativa entre resistência tênsil de agregados e teores de C orgânico do solo, indicando que a resistência tênsil de agregados aumentou proporcionalmente com a redução dos teores de C orgânico do solo. Os mesmos autores observaram que a resistência tênsil do solo correlacionou-se positivamente com a densidade do solo. Já Blanco-Canqui et al. (2005) obtiveram correlação exponencial significativa entre esses parâmetros, mostrando que o aumento de C orgânico do solo implica na redução da resistência tênsil do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da RT em relação a variação do conteúdo do carbono orgânico total (COT) em pedossequência de Latossolo Vermelho de texturas argilosa e média, em sistema plantio direto de longa duração.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

No ítem 4 do capítulo anterior (3.4. Material e Métodos) encontra-se a descrição detalhada da área experimental incluindo o procedimento de amostragem, o delineamento experimental, os procedimentos de separação dos agregados bem como as metodologias das análises químicas, físicas e o C e N do solo. Além disso, foram descritas as características gerais da mineralogia da área de estudo e como foram realizadas as análises estatísticas. Neste capítulo será dado ênfase aos procedimentos e métodos específicos para o entendimento do assunto proposto.

4.4.1 Coleta de blocos de solo e separação em agregados para a determinação da resistência tênsil

A retirada de blocos foi realizada em cada época de amostragem (E_1 -outubro de 2007; E_2 -setembro de 2008) e em cada tratamento. Com o auxílio de uma pá reta foram coletados 1440 blocos de solo, sendo 720 para a E_1 (360 blocos com as dimensões de 15 cm de largura e 20 cm de comprimento para a profundidade de 5 cm e 360 blocos para a profundidade de 5 a 20 cm) e 720 para a E_2 nas mesmas dimensões e profundidades.

Os blocos de solo foram individualmente envolvidos em filmes plásticos para manutenção da umidade e da estrutura, identificados e, posteriormente, encaminhados para manuseio em laboratório. Em seguida, os blocos de solo foram manualmente fragmentados em seus agregados naturais aplicando a força mínima necessária para que eles se fragmentassem nos planos de fraqueza naturais.

Os agregados foram secos ao ar por 36 h e em estufa a uma temperatura de 60 °C por 24 h, para a secagem final e homogeneização da umidade. Na seqüência, os agregados foram classificados com auxílio de peneiras metálicas de 19,0 e 12,5 mm de abertura, com diâmetro médio de 15,75 mm (Imhoff et al., 2002) e armazenados em sacos de papel devidamente identificados, até o momento da realização dos testes para determinação da RT.

4.4.2 Procedimento e cálculo da resistência tênsil

Cada amostra (bloco de solo) foi desembalada do papel filme e fragmentada em agregados de tamanho médio de 16 mm. Estes foram acondicionados em bandejas de alumínio devidamente identificadas e levados para estufa à 40 °C por 48 horas. Depois as amostras foram colocadas em bandejas de isopor devidamente identificadas. Cada agregado (média de 40 agregados por amostra) foi pesado em balança analítica e em seguida submetido a um teste de tensão indireta em atuador eletrônico linear, que emprega velocidade constante de 0,03 mm s⁻¹ (Imhoff et al., 2002). Para o teste de tensão indireta, cada um dos agregados do solo foi colocado em posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior fixa e outra superior móvel ligada a uma célula de carga com capacidade de 20 kgf. A célula de carga é acoplada à extremidade inferior do êmbolo do atuador eletrônico linear e a um microcomputador, que registra o valor da força aplicada para ruptura tênsil de cada agregado. No final de cada teste, uma subamostra de agregados foi pesada em balança analítica e submetida à secagem em estufa a 105 °C por 24 h, para determinação da umidade residual da amostra de solo.

A resistência tênsil foi calculada conforme descrito por Dexter & Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 (P/D^2) \quad (1)$$

onde RT é a resistência tênsil; 0,576, o coeficiente de proporcionalidade, resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P, a força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); e D, o diâmetro efetivo (m). O diâmetro efetivo (D) foi calculado conforme Watts & Dexter (1998):

$$D = D_m (M/M_0)^{1/3} \quad (2)$$

em que M é a massa do agregado individual (g); M₀, a massa média dos agregados na população (g); e D_m, o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos tamanhos das peneiras [(12,5 + 19,0)/ 2 = 15,75 mm]. Usualmente, a medida da resistência tênsil dos agregados de solo é expressa em kPa.

4.4.3 Determinação da resistência tênsil de agregados do solo

O equipamento utilizado foi um dinamômetro- IMPAC, marca Lutron, modelo FG-20 KG (Figura 13). O dinamômetro IMPAC é um equipamento eletrônico digital, com célula de carga (20 Kgf) incorporada em sua carcaça, podendo ser utilizado em ensaios de compressão ou tração. O deslocamento do conjunto móvel (dinamômetro – placa de ruptura) é acionado eletronicamente à uma velocidade de aproximadamente 1,84 mm s⁻¹. Possui uma função “tara” que pode zerar até 100% da capacidade (20 Kg), permitindo o uso em ensaios com pré carga. No modo “peak hold”, registra a maior força aplicada na ruptura do material. Possui uma interface serial com protocolo de comunicação RS232, o que possibilita a comunicação com computadores e o uso com programas de monitoramento e análise de ensaios (opcional).

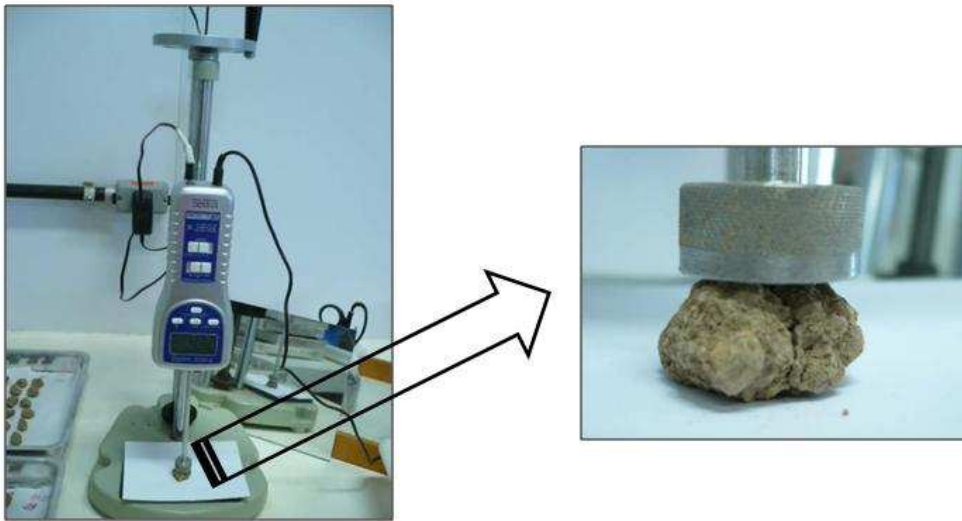


Figura 13. Dinamômetro com detalhes da fratura do agregado.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis COT, RT, conteúdo de argila e densidade do solo apresentaram interação significativa com a classe textural, a profundidade e a época de amostragem (Tabela 9).

Tabela 9. ANOVA do experimento.

Causas da variação	COT (g kg ⁻¹)	RT (kPa)	Argila (%)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)
Textura (T)	*	*	*	*
Profundidade (P)	*	*	*	*
Época (E)	*	*	*	n.s.
C.V.(%)	3,54	6,87	5,22	0,92
T x P	*	*	*	*
T x E	*	*	*	n.s.
P x E	*	*	*	*
T x P x E	*	*	*	*
C.V.(%)	2,84	2,41	1,61	0,22

O aumento no conteúdo de COT (média geral dos tratamentos) resultou na diminuição da RT e teve uma relação linear e significativa ($R^2 = 0,68$; $p = 0,0009$) entre estes dois parâmetros (Figura 14). Isso provavelmente ocorreu devido ao aumento da fração lábil de MOS (compostos alifáticos com menor força de ligação). Além disso, os macroagregados apresentam a maior presença de agentes temporários como raízes e hifas de fungos que contribuem para o aumento da porosidade interna dos agregados.

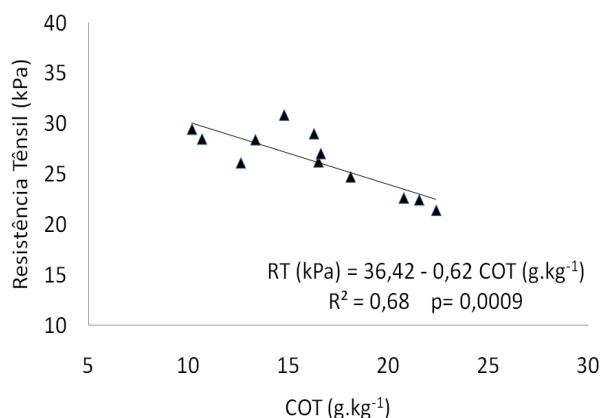


Figura 14. Regressão linear entre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e a resistência têsnil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho em plantio direto de longa duração. A regressão foi realizada com a média geral dos doze tratamentos e das duas classes texturais.

A presença dos agentes temporários de agregação propicia maior entrada de COT e em conseqüência, pode ter reduzido a força entre as partículas devido à ação dos compostos alifáticos ao formarem ligações mais fracas com a superfície dos minerais de argila. Assim, esses compostos irão atuar com menor força de ligação resultando em menor RT.

A relação entre o COT e a RT foi ainda mais evidente quando observada comparativamente nas duas profundidades de amostragem. Neste caso a regressão linear entre estas duas variáveis foi significativa apenas na camada de 0-5 cm (Figura 15). Esse contraste entre as camadas pode ser explicado pelo maior conteúdo de COT na camada superficial de 0-5 cm devido à contínua adição de resíduos culturais na superfície do solo.

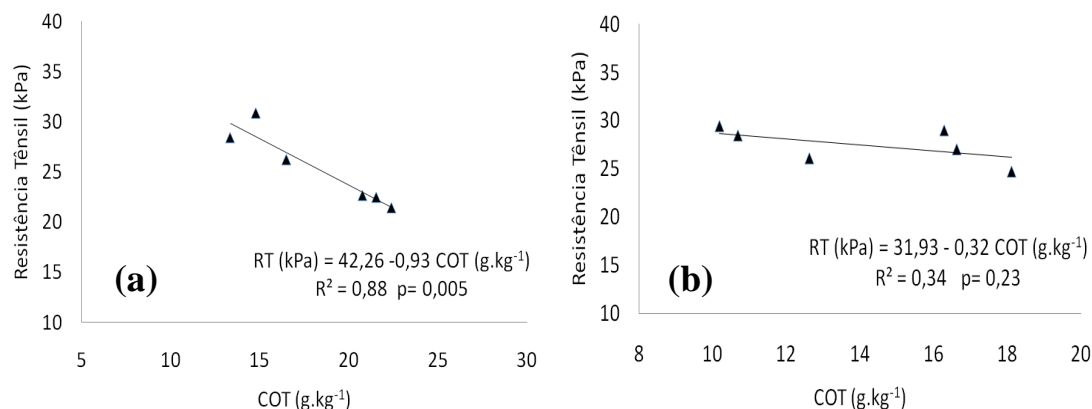


Figura 15. Regressão linear entre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho em plantio direto de longa duração. **(a)** regressão linear entre o COT e a RT para a camada de 0-5 cm, **(b)** regressão linear entre o COT e a RT para a camada de 5-20 cm.

Zhang (1994) citado por Tormena (2008a) indica que há dois efeitos contrários da matéria orgânica do solo sobre a resistência tênsil dos agregados: 1) aumento no número e na força das ligações entre as partículas; e 2) o efeito de diluição que implica redução da densidade do solo ou aumento da porosidade do agregado. Além da quantidade de matéria orgânica do solo, ressalta-se que o seu grau de humificação influencia a resistência tênsil dos agregados, conforme reportado por Zhang (1994), demonstrando que, quanto mais humificada a matéria orgânica do solo, menor será o seu efeito em reduzir a resistência tênsil dos agregados. Resultados semelhantes foram obtidos por Chan (1995), Blanco-Canqui et al. (2005) e Tormena et al. (2008a), embora esses autores desenvolveram o trabalho em um LV com textura média. Por outro lado, os resultados reportados por Bartoli et al. (1992), Imhoff et al. (2002) e Tormena et al. (2008b) contrastam com os anteriores nos quais os dois últimos autores não obtiveram relação positiva entre RT e COT em razão do uso de uma faixa mais restrita de teor de C. Bartoli et al. (1992) trabalhando com Latossolos situados na região tropical, reportaram o aumento no conteúdo de COT proporcional ao maior valor de RT do solo

e afirmaram que este efeito poderia ser devido à cimentação entre as partículas minerais de argila e a matéria orgânica mais humificada do solo.

Na região de Ponta Grossa-PR, Favoretto et al. (2008) encontraram em um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto maior conteúdo de C na camada de 0-20 cm ao desse estudo. Todavia, constataram que o grau de humificação da matéria orgânica avaliado pelo método da fluorescência induzida a laser (HFIL) eram baixos. Os autores explicaram que esse comportamento pode ocorrer em função do aporte expressivo de resíduos orgânicos fresco na superfície e durante o processo de decomposição podem causar a diluição da matéria orgânica mais humificada. Assim, mesmo solos com elevado conteúdo de C podem ter um grau de humificação da matéria orgânica mais baixos do que solos com menor conteúdo de C. No sistema plantio direto a preservação das estruturas mais lábeis (e.g. compostos alifáticos constituídos por polissacarídeos, e proteínas interestratificadas com polissacarídeos) nos agregados é muito importante porque ocorre a maior proteção física intra-agregado e torna-se um dos pontos chave para explicar o acúmulo de C nesse sistema de manejo (Bayer et al., 2001; Sá et al., 2001; Amado et al., 2006; Zotarelli et al., 2007; Sá et al., 2008; Diekow et al., 2009).

A regressão linear entre o conteúdo de COT e a RT (Figura 16) para o LV textura argilosa foi significativa ($R^2 = 0,93$; $p = 0,002$) e superior ao LV textura média ($R^2 = 0,06$; $p = 0,64$).

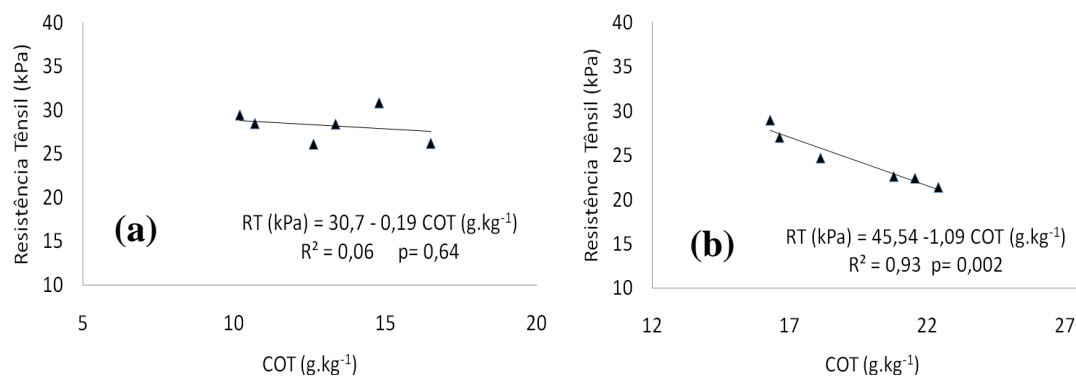


Figura 16. Regressão linear entre o conteúdo de carbono orgânico total (COT) e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho em plantio direto de longa duração. **(a)** textura média, **(b)** textura argilosa

Essa influência no comportamento da RT evidencia a importância da textura do solo no estudo deste atributo principalmente porque a causa pode estar relacionada com as características físico-químicas do tipo de mineral de argila e não somente ao conteúdo deste mineral. Os resultados reportados por Imhoff et al. (2002) com a utilização de regressão múltipla constataram que a influência da textura e do carbono orgânico sobre a RT e observaram que os teores de argila+silte e MOS foram as variáveis que mais influenciaram a RT, havendo uma interação significativa entre as frações mineral e orgânica do solo.

Os resultados obtidos por Tormena et al. (2008a) mostraram relação significativa entre textura e a RT em um LV textura média contrastando aos desse estudo. Entretanto, há duas diferenças importantes: 1) a origem das argilas citadas no trabalho de Tormena et al. (2008a) é oriunda de rochas basálticas e possui conteúdo mais elevado de ferro. A influência do ferro na microagregação e macroagregação de Latossolos é bem conhecida e descrita na literatura; 2) O tempo de adoção do plantio direto bem como os aportes de resíduos culturais são inferiores aos citados neste estudo.

4.5.1 Resistência tênil de agregados afetada pela classe textural e densidade do solo

A média geral da RT (considerando as camadas 0-5 e 5-20 cm) para o LV textura média foi de 28,3 KPa enquanto para o LV textura argilosa foi de 24,5 kPa. Para o conteúdo de COT a média geral do LV textura argilosa foi de 19,3 g kg⁻¹ enquanto no LV textura média foi de 13,0 g kg⁻¹. Essa diferença no conteúdo de COT representa 48,0 % mais C no LV textura argilosa. A diferença da RT entre as texturas foi ainda mais acentuada ao considerar a camada de 0-5 cm. Neste caso, a média do COT para o LV textura média foi de 14,9 g kg⁻¹ e a RT foi de 28,5 kPa enquanto no LV textura argilosa a média do COT foi de 21,6 g kg⁻¹ e a RT foi de 22,2 kPa.

A relação entre a RT e conteúdo de argila foi linear e significativa ($R^2 = 0,54$; $p = 0,006$), indicando que a diminuição da RT está em parte associada ao incremento do conteúdo de argila nos Latossolos em estudo (Figura 17).

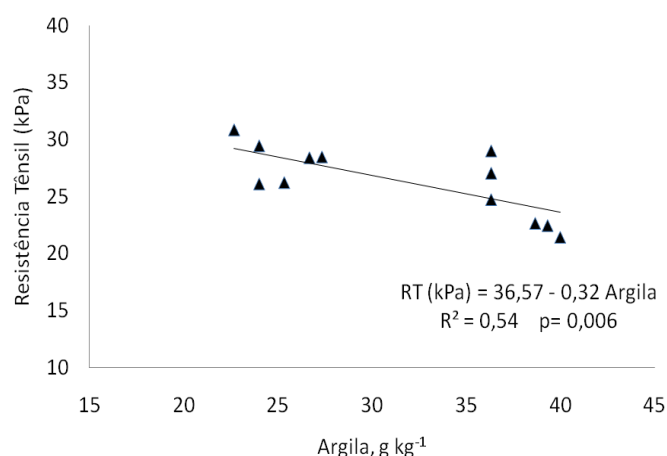


Figura 17. Regressão entre o conteúdo de argila e a resistência tênil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. Os valores utilizados para a equação de regressão foram obtidos da média geral do LV nas duas texturas e na duas profundidades amostradas.

A relação do conteúdo de argila com a RT seguiu a mesma tendência observada para o COT com a profundidade de amostragem, ao constatar relação linear e significativa no LV textura argilosa ($R^2 = 0,78$; $p = 0,02$ - Figura 18a) em comparação ao LV textura média ($R^2 = 0,09$; $p = 0,64$ - Figura 18b). Os resultados reportados por Imhoff et al. (2002), evidenciam que a argila+silte e a MOS foram as variáveis que mais influenciaram a RT. Mostraram também a variação da resistência tênsil em função do teor de argila+silte, para diferentes níveis de MO (20,78; 27 e 32 g kg⁻¹).

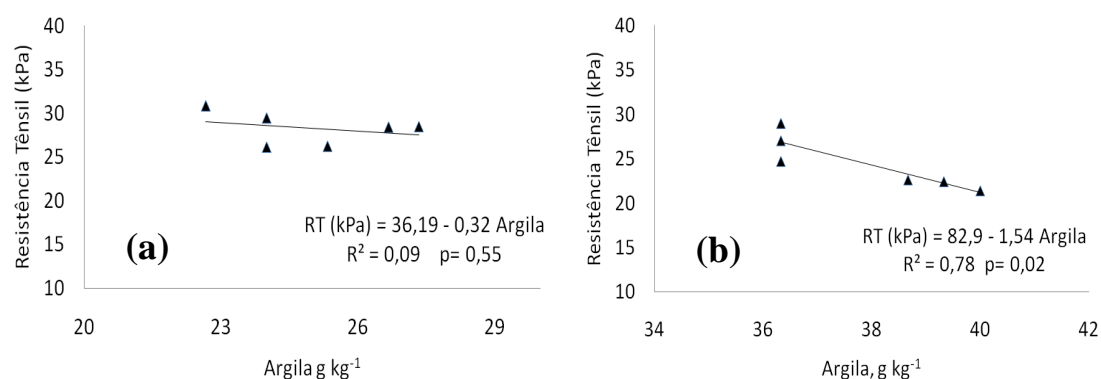


Figura 18. Regressão entre o conteúdo de argila e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. **(a)** textura média, **(b)** textura argilosa.

A profundidade de amostragem influenciou o comportamento da RT em relação ao conteúdo de argila. Na camada superficial de 0-5 cm a relação linear entre o conteúdo de argila e a RT foi elevada e significativa ($R^2 = 0,90$; $p = 0,004$ - Figura 19a) enquanto na camada de 5-20 cm não apresentou relação entre ambas ($R^2 = 0,08$; $p = 0,57$ - Figura 19b).

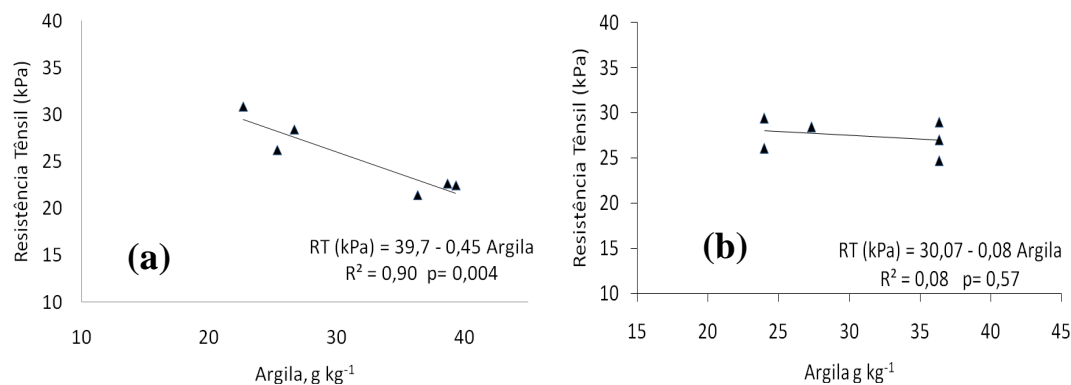


Figura 19. Regressão entre o conteúdo de argila e a resistência tênsil (RT) nos agregados de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. **(a)** regressão para a profundidade de 0-5 cm, **(b)** regressão para a profundidade de 5-20 cm.

Este comportamento pode estar relacionado com a interação entre o conteúdo de COT e argila, resultando em maior acúmulo de C principalmente da fração lábil (Sá et al., 2008).

A densidade do solo (DS) afetou o comportamento da RT, ou seja, o aumento da DS foi acompanhado pela RT e a relação linear foi significativa ($R^2 = 0,40$; $p = 0,03$). Esse comportamento também foi verificado por Tormena et al., (2008a), que reportaram relação linear positiva entre esses parâmetros. Os resultados de Zhang (1994) indicam que o aumento da DS e a redução da porosidade do agregado está relacionada ao aumento da força das ligações entre as partículas e a redução do efeito de diluição.

No LV textura argilosa a relação entre a DS e a RT foi significativa ($R^2 = 0,77$; $p = 0,02$) enquanto para o LV textura média não ocorreu esta relação ($R^2 = 0,002$; $p = 0,78$). A relação entre resistência tênsil e densidade é ainda mais acentuada quando se analisa a camada 0-5 cm ($R^2 = 0,84$; $p = 0,01$), em comparação com a camada 5-20 cm ($R^2 = 0,10$; $p = 0,53$) por ser a camada com maior conteúdo de argila e menor conteúdo de COT.

4.6 CONCLUSÕES

A resistência tênsil (RT) reduziu à medida que o conteúdo de COT aumentou, com maior impacto no LV textura argilosa;

A RT foi maior com o aumento da profundidade de amostragem;

Na camada superficial de 0-5 cm observou-se relação linear inversa entre o conteúdo de argila e a RT, o mesmo não acontecendo para a camada de 5-20 cm.

A RT apresentou relação inversa com a densidade do solo e foi superior no LV textura média.

5. BALANÇO DE CARBONO EM PEDOSSEQUÊNCIA DE LATOSSOLO VERMELHO DE TEXTURA MÉDIA E ARGILOSA SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

5.1 RESUMO

A adoção do sistema plantio direto e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo reflete com o passar dos anos em adição de C ao sistema promovendo o seqüestro de C e a mitigação de emissões de C para a atmosfera. O objetivo do trabalho foi avaliar o balanço de C bem como a quantidade de resíduos culturais necessária para manter o equilíbrio estável em pedossequência de Latossolo Vermelho de texturas argilosa e média sob plantio direto de longa duração (20 anos). O delineamento experimental utilizado foi um arranjo fatorial 2x2x2 inteiramente casualizado com 12 tratamentos. Onde os fatores analisados foram: a) solos: Latossolo Vermelho com textura média e argilosa, b) duas profundidades de coleta: 0-5 e 5-20 cm, c) duas épocas de coleta (Outubro de 2007 e Setembro de 2008). A taxa de seqüestro de carbono foi de 0,86 Mg ha⁻¹ e 0,76 Mg ha⁻¹ para o LV textura média e argilosa, respectivamente. A estimativa da quantidade mínima de resíduos culturais para manter o sistema em equilíbrio foi de 8,23 e 9,60 Mg ha⁻¹ para o LV textura média e argilosa, respectivamente. Os resultados desse estudo mostram que o sistema plantio direto associado à rotação de culturas com o retorno de adequada quantidade de resíduos culturais conduz o solo a atuar mais como dreno do que como fonte de CO₂ para a atmosfera.

Palavras-chave: taxa de seqüestro de C; textura de solo; solos subtropicais.

5.2 SUMMARY

The adoption of no-tillage system and maintenance of crop residues on the soil surface reflects over the years in C addition to the soil and promoting C sequestration and mitigation CO₂ emissions into the atmosphere. The objective was to assess the C balance and the amount of crop residue needed to maintain a stable C balance in a Red Latosol pedosequence with medium and clayey texture under long-term no-tillage (20 years). The experimental design was completely randomized 2x2x2 factorial with 12 treatments. The factors analyzed were: (a) Soil: Red Latosol with medium and clayey texture, (b) sampling depth: 0-5 and 5-20 cm, (c) two times of sampling (October 2007-E₁, September 2008-E₂). The rate of carbon sequestration was 0.86 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ and 0.76 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ for LV medium and clayey texture, respectively. The minimum amount of crop residues estimate to maintain the C steady-state was 8.23 and 9.60 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ for LV medium texture and clay, respectively. The data showed that no-tillage system and associated to crop rotation with adequate amount returned of crop residues leads the soil to act as a sink and not a source of CO₂ to the atmosphere.

Key-words: Carbon balance, C sequestration, Red Latosol, soil texture

5.3 INTRODUÇÃO

A adoção de sistemas de manejo conservacionista do solo aliado à rotação de culturas que adicionam elevadas quantidades de carbono (C) torna-se uma alternativa importante para reduzir o impacto da exploração agropecuária e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (Lal, 2007). O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo com o passar dos anos reflete diretamente na conversão de C para o solo, porque cria um fluxo contínuo de C em direção aos compartimentos da matéria orgânica (Bayer et al., 2001; Sá et al., 2001; Bayer et al., 2006; Amado et al., 2006; Sá et al., 2006; Cerri et al., 2007). A matéria orgânica do solo (MOS) é uma componente chave de qualquer ecossistema terrestre e a variação na sua distribuição, no seu conteúdo e na sua qualidade têm importante efeito nos processos que ocorrem dentro do sistema.

Dependendo das práticas de manejo adotadas, o solo pode agir como dreno ou como fonte do CO₂ atmosférico, contribuindo diretamente para o efeito estufa. Do ponto de vista agrícola, o solo torna-se fonte de CO₂ para a atmosfera quando as perdas por oxidação são maiores do que as adições de carbono na forma de palhada (Sá et al., 2001). Quando o solo passa a ser cultivado, as perdas de MOS variam de acordo com as características de cada tipo de solo, dos sistemas de culturas, do sistema de preparo do solo e das condições climáticas, que aceleram ou retardam os processos de decomposição dos resíduos e de síntese da MOS (Lal et al., 1995). Os sistemas de manejo que usam o preparo do solo para a produção vegetal constituem o principal fator dessas perdas (Bruce et al., 1999). Os mecanismos envolvidos nesse processo são os seguintes: a) a ruptura dos agregados expõe a matéria orgânica do solo, que está atuando como agente de ligação entre microagregados, ao ataque da biomassa microbiana; b) a mistura de material orgânico fresco com o solo resulta em condições mais favoráveis à

decomposição; e c) o aumento na atividade da biomassa microbiana, em consequência de maior aeração do solo e do aumento da oferta de C facilmente oxidável, resulta em maior fluxo de mineralização de C (Eliot, 1986; Powlson et al., 1987; Reicosky, 1995). A severidade dessas perdas será maior em ambientes sob clima tropical e pode ser cinco a dez vezes superiores ao das regiões de clima temperado (Lal e Logan, 1995).

O seqüestro de carbono é o processo de transformar o CO₂ atmosférico em acumulações de C no solo (Lal, 2004). O dióxido de carbono é absorvido pelas plantas através do processo de fotossíntese e transformado em material vegetal vivo. Quando as plantas morrem, suas folhas, caules e raízes que têm suas bases de C se deterioram no solo e se transformam em substância orgânica caracterizando o processo básico de seqüestro de carbono (Rice, 2004).

O solo torna-se um dreno do CO₂ atmosférico quando as adições de C são superiores as perdas por oxidação. Em razão disto, o sistema plantio direto torna-se uma alternativa para o solo atuar como um dreno e seqüestrar carbono através de sistemas agrícolas nas regiões subtropicais e tropicais no Brasil (Corazza et al., 1999; DeMaria et al., 1999; Bayer et al., 2000; Amado et al., 2001; Sá et al., 2001; Sisti et al., 2004; Lovato et al., 2004; Diekow et al., 2005; Amado et al., 2006; Bayer et al., 2006; Corbells et al., 2006; Cerri et al., 2007). De acordo com Bruce et al. (1999), a implementação de medidas integradas conforme os fatores relacionados a seguir é o caminho para que o solo atue como um dreno: a) eliminação do preparo do solo; b) intensificação de sistemas de rotação de culturas; c) adoção de práticas que promovam o aumento da produtividade das culturas; e d) restabelecimento de cobertura vegetal permanente. O carbono constitui componente central como agente de cimentação e da estabilização dos agregados e da estrutura do solo.

A avaliação do potencial de seqüestro de C em regiões subtropicais e tropicais no Brasil tem resultado em inúmeras publicações relatando a ocorrência de taxas negativas de $-0,03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Roscoe e Burman, 2003) até valores superiores a $1,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Amado et al., 2006; Seguy et al., 2006). Essa amplitude nas taxas de seqüestro de C está relacionada principalmente com a quantidade e a qualidade dos resíduos aportados (Bayer et al., 2006; Amado et al., 2006 e Sá et al., 2008) e com as classes de solos em uma Pedossequencia (Sá et al., 2009b). As maiores taxas de seqüestro de C reportadas pelos autores estavam associadas com as maiores adições de resíduos culturais e em solos com textura argilosa. Vários modelos têm sido usados para descrever as alterações da MOS com o tempo. A complexidade dos modelos varia desde uma abordagem simplificada e unicompartmental como a proposta de Henin & Dupuis (1945) aos modelos multicompartimentais propostos por Jenkinson & Rainer (1977), Van Veen & Paul (1981), Janssen (1984) e Parton et al. (1987). Alguns autores têm utilizado modelos mais simplificados para entender as transformações na MOS provocadas por sistemas de culturas e preparo (Bayer et al., 2006). Os resultados reportados por Bayer et al., (2006) em região subtropical com o uso de um modelo unicompartmental de 1ª ordem permitiram não somente estimar os coeficientes de conversão e de perdas de C bem como estimar as taxas de seqüestro de C afetadas por sistemas de rotação de culturas e pelo manejo do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a taxa de seqüestro de C e a taxa de conversão dos resíduos culturais em C no solo em uma Pedossequencia com Latossolo Vermelho com textura média e argilosa há longo período sob plantio direto utilizando um modelo unicompartmental para estimativa dos parâmetros do balanço de C.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

No ítem quatro do capítulo 3 (3.4. Material e Métodos) encontra-se a descrição detalhada da área experimental incluindo o procedimento de amostragem, o delineamento experimental, os procedimentos de separação dos agregados bem como as metodologias das análises químicas e físicas do solo. Além disso, foram descritas as características gerais da mineralogia da área de estudo e como foram realizadas as análises estatísticas. Neste capítulo será dada ênfase aos procedimentos e métodos específicos para o entendimento do assunto proposto.

5.4.1 Cálculo do balanço de C

O balanço de C para a previsão do comportamento da MOS foi realizado através do modelo unicompartimental proposto por Henin e Dupuis (1945) e adaptado por Bayer et al. (2006). Este modelo preconiza o balanço de C através do conceito de equilíbrio dinâmico da MOS em função das quantidades de C que são adicionadas e caracterizadas pelas “entradas” e as perdas por oxidação denominadas de “saídas” do sistema, conforme equação 1.

$$dC/dt = -K_2C + K_1A$$

Eq. 1

Onde:

dC/dt = taxa anual de variação do carbono orgânico do solo em $Mg\ ha^{-1}$

A = quantidade de carbono orgânico adicionado anualmente em Mg ha^{-1}

K₁ = coeficiente de humificação que representa a porcentagem do carbono adicionado anualmente que passa a constituir o carbono orgânico do solo.

C = estoque de carbono orgânico do solo em Mg ha^{-1}

K₂ = coeficiente anual de perda do carbono orgânico do solo por oxidação da MOS

Tanto o incremento (K_1A) como a perda anual da matéria orgânica humificada (K_2C) variam de acordo com o tipo de solo, sistema de culturas e sistema de manejo utilizado.

Parâmetros adicionais para o balanço de C dos sistemas de manejo

- **Índice de colheita:** refere-se à quantidade palhada produzida por unidade grão, expresso em Mg de palhada por Mg de grão colhido.
- **Índice de massa seca de raiz:** refere-se à quantidade de massa seca de raiz produzida por Mg de grãos, ou seja, porcentagem da produção de grãos que corresponde em massa seca de raiz.
- **Porcentagem de carbono na palhada:** refere-se ao conteúdo de C nos resíduos culturais das espécies, conforme Sá et al. (2001) e Pavei (2005).
- **K₁:** refere-se ao coeficiente de humificação para o sistema de rotação de culturas envolvendo a aveia preta/milho/aveia preta/soja/trigo/soja em um experimento de longa duração na região dos Campos Gerais em um Latossolo Vermelho argiloso (Sá et al., 2001).
- **K₂:** refere-se ao coeficiente de oxidação da MOS. Para o cálculo do balanço de C, foi utilizado o coeficiente proposto por Sá et al., 2006 ($K_2 = 0,023$) em experimento de longa duração em um Latossolo Vermelho argiloso situado na mesma região climática do presente estudo.

- **Equivalente em palhada:** refere-se a quantidade mínima de palhada (massa seca de parte aérea e raiz) necessária para manter o equilíbrio estável do sistema

Índices para cálculos do balanço de C

Os dados de produção de grãos, massa seca de parte aérea, raiz e total obtidos nos sistemas de manejo do solo estão sumarizados na tabela 10, e que serão usados para os cálculos dos parâmetros adicionais do balanço de C e N dos sistemas de manejo.

Tabela 10. Índices de colheita, massa seca de raiz e porcentagem de C na palhada

Cultura	Índice de colheita ‡	Índice de massa seca de raiz ‡	Porcentagem de C na palhada ††	K ₁ †
Aveia preta	1,00	0,23	43,8	0,265
Milho	1,10	0,25	45,5	0,265
Trigo	0,95	0,15	45,0	0,265
Soja	0,89	0,20	39,5	0,265

† adaptado de Sá et al., (2001); ‡ índice obtido com medições nas culturas e representa: Índice 1,10 para cultura de milho significa que 1 ton de grãos produz o equivalente a 1,1 ton de matéria seca na parte aérea e 0,23 significa que 1 ton de grãos de milho produz o equivalente a 0,23 ton de raiz de milho. †† Resultados obtidos com a determinação de C por combustão seca para cada cultura.

A condição a qual $dC/dt = 0$, indica que as entradas de C são equivalentes as saídas de C e o sistema está em equilíbrio estável. Ao contrário, a condição de $dC/dt \neq 0$, duas situações podem ocorrer: a) quando as entradas de C forem superiores as saídas indicará que o sistema estará acumulando C e o balanço será positivo; b) quando as entradas de C forem inferiores as saídas indicará que o sistema estará perdendo C e o balanço será negativo. A conversão de C em COT do solo foi calculada com base na variação dos resíduos remanescentes: Conversão de C = $(E_1CRem + C \text{ aportado}) - E_2C \text{ Rem})/\Delta COT$

5.4.2 Amostragem e determinação da densidade do solo

As amostras indeformadas foram retiradas em anéis de aço inox com diâmetro e altura de 5 cm (Blake & Hartge, 1986), acoplados em um amostrador de caneco para a introdução e retiradas dos anéis.

A coleta foi realizada em três profundidades: 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Foi realizado a média dos resultados obtidos na profundidade de 5-10 e 10-20 cm para representar a camada de 5-20 cm. Na camada de 10-20 cm os anéis foram retirados entre 12,5 e 17,5 cm. Portanto, em cada tratamento e em cada profundidade foram retirados três anéis de aço totalizando 108 amostras indeformadas (03 triplicata x 12 tratamentos x 3 profundidades de coleta). Também foram retiradas amostras deformadas nas mesmas profundidades e posteriormente foi determinado o COT utilizando um analisador elementar de C e N TruSpec LECO 2006, St. Joseph, EUA.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Balanço de C em um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa

A taxa de seqüestro de C estimada pelo modelo unicompartmental foi de 0,86 para o LV textura média e 0,76 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o LV textura argilosa na camada de 0-20 cm, (Tabela 11) corroborando com outros estudos realizados na região dos Campos Gerais.

Tabela 11. Balanço de C em um Latossolo com textura média e argilosa para a camada de 0-20 cm utilizando o modelo unicompartmental adaptado de Bayer et al. (2006).

Classe Textural	Adição de biomassa [†]			Adição de C	C Rem. [‡]	C Hum. [§]	Estoque de C ₁ ^{§§}	Perda de C ^{‡‡}	Balanço de C ₂ ^{§§§}	Seq. C ^{‡‡‡}	
	PA ^{††}	Raiz	Total								
	----- Mg ha ⁻¹ -----										
Média	15,18	2,94	18,13	8,13	1,42	1,78	38,22	0,96	39,04	0,82	
Argilosa	14,47	2,99	17,46	7,92	0,85	1,88	48,44	1,11	49,20	0,76	

[†] Biomassa adicionada no período de 01 ano: Textura média (aveia em consórcio com ervilhaca + milho) e Textura argilosa (trigo + milho); ^{††} PA = Parte aérea; [‡] C Rem. = Carbono remanescente dos resíduos culturais antes das duas amostragens (*E*₁-Outubro de 2007 e *E*₂-Setembro de 2008); [§] C Hum. = Carbono humificado com base no coeficiente proposto por Sá et al. (2001); ^{§§} Estoque de C medido na E₁; ^{‡‡} Perda de C calculado com base no coeficiente de oxidação, K₂ = 0,023 proposto por Santos (2006) e Sá et al., (2006) para o LV textura argilosa e o K₂ = 0,025 para o LV textura média. ^{§§§} O balanço de C calculado pelo modelo unicompartmental adaptado de Bayer et al. (2006); ^{‡‡‡} Seq. C = C seqüestrado (C₁ - C₂).

Próximo da área desse estudo em um LV com textura argilosa (460 g kg⁻¹ de argila) há 22 anos sob plantio direto, Sá et al. (2001) reportaram taxas de sequestro de C de 0,81 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-20 cm. Em outro estudo sobre sistemas de manejo de longa duração (18 anos) e também em um LV textura argilosa (480 a 500 g kg⁻¹ de argila) a taxa de seqüestro de C no plantio direto de 0,99 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Sá et al., 2006). Agrupando os resultados desse estudo aos reportados por Sá et al. (2001 e 2006) é possível afirmar que em condições as quais a classe de solo e condições climáticas são semelhantes a causa da variação entre as taxas de sequestro de C é influenciada pelo

conteúdo de argila e principalmente pela quantidade e qualidade do aporte de C. Essa abordagem foi discutida por Bayer et al. (2000) em solos do Rio Grande do Sul e por Zinn et al. (2005) para Latossolos da região dos cerrados em que afirmaram a interdependência entre o C e a textura. Entretanto, a quantidade e a qualidade do resíduo cultural têm sido mencionadas em vários trabalhos como a componente de maior impacto para o seqüestro de C em solos da região subtropical e tropical (Sá et al., 2001; Six et al., 2002; Sisti et al., 2004; Amado et al., 2006; Bayer et al., 2006; Corbells et al., 2006 e Sá et al., 2008). A combinação de culturas na rotação com a inclusão de leguminosas em consorcio com gramíneas de inverno aumenta ainda mais esse potencial de seqüestro (Bayer et al., 2000, Diekow et al., 2005; Amado et al., 2006 e Diekow et al., 2009). O aporte de C pelos resíduos culturais nos trabalhos citados estão entre 4,0 e 6,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (equivalem a aproximadamente 9,1 a 13,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de resíduos culturais) enquanto o aporte de C desse estudo (intervalo de 01 ano) foi de 8,0 Mg ha⁻¹. A principal contribuição nesse aporte veio da cultura de milho e representou 74,2 % indicando que a seqüência das culturas dentro da rotação faz a diferença na contribuição do seqüestro de C. Este fato foi relatado por Bayer (1996) e Bayer et al. (2006) para as condições do Rio Grande do Sul em experimentos com sistemas de manejo de longa duração onde a sucessão leguminosa-milho proporcionou o maior estoque de C e N comparada as demais. Na região dos Campos Gerais, Sá et al. (2006) ajustou o modelo de balanço de C proposto por Bayer et al. (2006) e constataram que quando a sucessão era trigo-soja o balanço de C era negativo nos sistemas de manejo que incluía o preparo. Nesse experimento com sistemas de manejo há 18 anos a rotação de culturas para todos os sistemas foi planejada com ciclo de três anos de duração, envolvendo culturas de inverno e verão (aveia preta-soja/trigo-soja/aveia preta-milho, equivalente a três ciclos de inverno e verão). Quando a sucessão era aveia preta-milho o

balanço de C foi positivo em todos os sistemas de manejo. Esse argumento pode respaldado por outros estudos realizados em condições subtropicais (Rio Grande do Sul) que mostraram que a introdução da cultura de milho na rotação e quando associada com leguminosas como cultura antecessora aumenta expressivamente o potencial de seqüestro de C (Amado et al., 2006). O desafio na SPD em regiões subtropicais e tropicais é manter um fluxo contínuo de C e N ao solo visando a distribuição nos distintos compartimentos e visando atingir o equilíbrio estável da MOS.

5.5.2 Quantidade de resíduo cultural para manter o equilíbrio estável

Com a manutenção do sistema radicular na íntegra e da palhada na superfície do solo, a matéria orgânica do solo fica menos exposta aos processos microbianos, reduzindo a taxa de mineralização e resultando em menor fluxo de CO₂ para a atmosfera (Reicosky et al., 1995). Com base nesse princípio, a quantidade mínima de palha para manter o equilíbrio estável do C tanto o LV textura média e argilosa foi de 8,23 e 9,60 Mg há⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 12). Resultados semelhantes foram reportados por Sá et al. (2006 e 2008) para a mesma região desse estudo.

Tabela 12. Quantidade de palha (Equivalente em Palha-EP) necessário para manter o C em equilíbrio dinâmico em um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa em sistema plantio direto de longa duração

Classe textural	Perda por oxidação (K ₂ C)	C Sequestrado dC/dt ≠ 0	Equivalente em palha (EP)	Adição anual (AA) de palha	AA - EP
			dC/dt = 0 [§]		
----- Mg ha ⁻¹ -----					
Média	0,96	0,82	8,23	15,18	6,95
Argilosa	1,11	0,76	9,60	14,47	4,87

[§] Equivalente em palha calculado pela equação: EP = C seqüestrado x 3,77 x 2,28. Onde o C seqüestrado foi a taxa anual de C acumulado e estimado pelo modelo; 3,77 refere-se ao fator para transformar o C humificado em aporte de C (1/0,265 = 3,77); 2,28 refere-se ao fator para transformar o aporte de C em palha (resíduo cultural).

Os mesmos autores afirmaram que para a região dos Campos Gerais a quantidade mínima de palha a ser adicionada à superfície do solo no sistema plantio direto é de 7,0 a 8,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. A quantidade remanescente de palha estimada pelo modelo unicompartmental foi de 6,95 e 4,87 para o LV com textura média e argilosa, respectivamente corroborando com outros resultados regionais. A média da palha remanescente estimada foi de 5,89 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e foi semelhante aos 5,04 Mg ha⁻¹ obtidos por Sá et al. (2006) para o plantio direto contínuo em experimento de longa duração. Embora o intervalo de avaliação desse experimento foi de um ano demonstra que medições simples e com maior número de repetições pode viabilizar as estimativas de as taxas de seqüestro em propriedades rurais em plantio direto. Além disso, este procedimento pode ser uma ferramenta para contribuir para inventários sobre o estoque de C em escala regional. Essa abordagem têm sido realizada em outras regiões subtropicais (Diekow et al., 2005; Bayer et al., 2006 e Amado et al., 2006) mostrando que o conhecimento da quantidade mínima de resíduos culturais a serem adicionados em sistema plantio direto é fundamental para a sustentabilidade do sistema. Os resultados de Sisti et al. (2004) constataram que sucessões de culturas como o trigo-soja ou mesmo aveia preta-soja em plantio direto tem tido balanço de C negativo e podem gerar emissões de CO₂ próximas ao preparo convencional. Dessa forma, o planejamento da rotação de culturas deve incluir culturas que tenham capacidade de compensar o balanço negativo de C quando a sucessão de culturas em determinado ano não aporta a quantidade de palha necessária ou quando as condições climáticas restringem o potencial da cultura ou maximizam a decomposição. Por isso, quando se retira a cultura de milho da rotação o sistema fica vulnerável, porque a taxa de seqüestro está associada à produção de biomassa. Os resultados reportados por Sá et al. (2006) mostraram que o milho adicionou 3,5 vezes (média da adição de C pelo milho dividido pela média de

adição das demais culturas) mais carbono que as outras culturas em rotação. O que indica que o sistema de plantio direto com elevada adição de resíduos culturais é um sistema sustentável. A estimativa da porcentagem de C dos resíduos culturais convertido em C orgânico do solo foi 15,73 e 13,87 % para o LV textura média e argilosa, respectivamente, sendo inferiores as encontradas em outros estudos regionais. Essa menor conversão do C pode ser atribuída a ação erosiva de eventos com precipitação pluviométrica acima da média histórica devido a declividade (5-7 cm m⁻¹ de declividade) que caracteriza a Pedossequência. Em consequência pode ter removido parcialmente através escorrimento superficial da MOS lábil a qual predomina compostos alifáticos reduzindo o acúmulo de C (Silva et al., 2007).

Os resultados desse estudo mostram que o sistema plantio direto associado à rotação de culturas com o retorno de adequada quantidade de resíduos culturais conduz o solo a atuar mais como dreno do que como fonte de CO₂. O acúmulo da MOS dentro de novos agregados é o primeiro passo para o sistema e constitui o componente-chave do plantio direto. Esse mecanismo proporciona a proteção física da matéria orgânica do solo, que atua como agente de ligação entre os microagregados na formação de macroagregados (Six et al., 2002). O agrupamento contínuo de microagregados e de macroagregados desenvolve microssítios e ou nichos de colônias de bactérias e de outros microrganismos entre os planos de fraqueza estrutural, reduzindo a sua atividade.

O manejo da matéria orgânica do solo deve ser considerado como a base do planejamento para o sucesso desse sistema, proporcionando maior sustentabilidade ao produtor e a sua produção de alimento.

5.6 CONCLUSÕES

A taxa de seqüestro de carbono foi semelhante para o LV de textura média e argilosa.

A estimativa da quantidade mínima de resíduos culturais para manter o sistema em equilíbrio foi próxima a oito toneladas por hectare.

LV de textura argilosa necessita de uma maior quantidade mínima de palhada, para manter o sistema plantio direto em equilíbrio.

O sistema plantio direto com a adequada adição de resíduos culturais é um sistema sustentável.

O coeficiente de conversão de carbono para o LV de textura média e argilosa foi de 15,73 e 13,87%, respectivamente.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo com o passar dos anos reflete diretamente na conversão de C para o solo, porque cria um fluxo contínuo de C em direção aos compartimentos da matéria orgânica. O carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) nas amostras integrais apresentaram interação significativa com a textura do solo, com a profundidade e com a época de amostragem. A RE do COT e NT indicou o enriquecimento da camada superficial, enquanto a RE do carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio total particulado do solo indicou a migração de C e N entre as classes de agregados e melhoria na qualidade do solo. A classe de agregado > 8 mm representou mais de 70% da massa dos agregados tanto na textura média como textura argilosa. A maior porcentagem de COT e COP foi constatada na classe de macroagregados maior do que 8 mm. Da mesma forma, o conteúdo de COT e NT foram maiores na classe de agregado > do que 4 mm comparado as demais classes nas duas classes texturais. A relação de estratificação (0-5:5-20 cm) de COT, NT, COP e NTP do solo indicou a melhoria da qualidade do solo da camada superficial. A relação linear e significativa entre o ΔRE com a taxa de seqüestro de carbono nas duas classes texturais mostrou o aumento no seqüestro de C e foi mais evidente no LV com textura média. O incremento do conteúdo de COT resultou na diminuição da resistência tênsil (RT) dos agregados e foi mais evidente na camada de 0-5 cm. A RT apresentou relação inversa com a densidade do solo e foi superior no LV textura média. A taxa de seqüestro de C foi de 0,86 para o LV com textura média e 0,76 Mg ha⁻¹ para o textura argilosa e para manter o equilíbrio estável de C é necessário o aporte de 8,6 Mg ha⁻¹ de resíduos culturais. Os resultados apresentados confirmaram a hipótese da RE ser um indicador sensível para a taxa de seqüestro de carbono no solo em um sistema sob plantio direto consolidado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ). **Tese (Doutorado)**, Piracicaba, 103 p. 2008.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C. 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**, 25:189-197, 2001.

AMADO, T.J.C., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P.C., SPAGNOLLO, E., CAMPOS, B-H.C., VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. **J. Environ. Qual.** 35:1599-1607. 2006.

ASSIS, C. P.; JUCKSCH, I.; MENDONCA, E.S.; NEVES, LIMA, J.C. Carbon and nitrogen in aggregates of an Oxisol submitted to different use and management systems. **Pesq. agropec. bras.** vol.41, n.10, p. 1541-1550, 2006.

BRUCE, J.P.; FROME, M.; HAITES, E.; JANZEN, H.; LAL, R. Carbon sequestration in soils. **Journal of Soil and Water Conservations**, v.5, p.382-389, 1999.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M. & IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 69:1472-1481, 2005.

BARTOLI, F.; BURTIN, G. & GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. **Geoderma**, 54:259-274, 1992.

BATJES, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v.47, p.151-163, 1996.

BAYER, C., MIELNICZUK, J., AMADO, T.J.C., MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil Tillage Res.** v.54, p.101-109, 2000.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C.N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 65:1473-1478, 2001.

BAYER, C., L. MARTIN-NETO, J. MIELNICZUK, A. PAVINATO, AND J. DIECKOW. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil Tillage Res.** v.86, p.237-245, 2006.

BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) Methods of soil analysis. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. pt.1: Physical and mineralogical methods, **Agronomy**, v.9, p.364-367, 1986.

BAYER, C., Dinâmica da material orgânica em sistemas de manejo de solos. 1994-1995, 240 p. **Tese de doutorado** em Ciencia do Solo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. & ERNANI, P.R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant Soil**, 238:133-140, 2002.

BAYER, C., L. MARTIN-NETO, J. MIELNICZUK, A. PAVINATO, AND J. DIECKOW. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil Tillage Res.** v.86, p.237-245, 2006.

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

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

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.425-432, 1999.

CAMBARDELLA, C. A., ELLIOT, E. T., 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 56:777-783.

CHAN, K.Y. Strength characteristics of a potentially hardsetting soil under pasture and conventional tillage in the semi-arid region of Australia. **Soil Till. Res.**, v.34, p.105-113, 1995.

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**, 22:527-538, 1998.

CERRI, C.E.P., G. SPAROVEK, M. BERNOUX, W.E. EASTERLING, J.M. MELILLO, AND C.C. CERRI. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigations options. **Sci. Agric.** 64:83-99. 2007.

CONCEIÇÃO P. C.; AMADO T. J. C.; MIELNICZUK J. & SPAGNOLLO E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:777-788, Viçosa. set./out. 2005.

CORBEELS, M., E. SCOPEL, A. CARDOSO, M. BERNOUX, J.M. DOUZETS, AND M. SIQUEIRA-NETO. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. **Global Change Biol.** v.12, p.1773-1787, 2006.

DeMARIA, I.L.; NnABUDE, P.C. & CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brasil. **Soil & Tillage Res.**, 51: 71-79, 1999.

DIECKOW, J., BAYER, C., MARTIN-NETO, L., MIELNICZUK, J. Preparo do solo e o ciclo do carbono: preparo convencional, preparo minimo e plantio direto. Simposio sobre plantio direto e meio ambiente. In: **Simposio sobre PLANTIO DIRETO e MEIO AMBIENTE**. 2005, Foz do Iguacu. Anais. Impremart. Febrapdp e Itaipu Binacional. 38-43 pg.

J. DIECKOW, C. BAYER, P. C. CONCEIÇÃO, J. A. ZANATTA, L. MARTIN-NETO, D. B. M. MILORI, J. C. SALTON, M. M. MACEDO, J. MIELNICZUK & L. C. HERNANI. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, v.60, p.240–249, 2009.

DEXTER, A.R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **J. Agric. Eng. Res.**, 31:139-147, 1985.

DEXTER, A.R. & WATTS, C. Tensile Strength and Friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. (Ed.) **Soil and environmental analysis. Physical methods**. 2. ed. New York: Marcelo Dekker, p. 401–430, 2000.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, 1994. p.3-22. (Publication Number, 35).

DUXBURY, J.M.; SMITH, M.S.; DORAN, J.W. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. (Ed.) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: University of Hawaii Press, NifTAL Project, 1989. p.33-67.

ELLIOT, E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in natives and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 627-633,1986.

ESWARAN, H.; VAN DER BERG, E.; REICH, P.; KIMBLE, J.M. Global soil carbon resources. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. (Ed.) **Soils and global change**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.27-43.

FABRIZZI, K. P; RICE, C. W; AMADO, T.J. C; FIORIN, J.; BARBAGELATA, . P.; MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. **Biogeochemistry**, v. 92, n.1-2, 2009.

FAVORETTO, Célia Mara et al. Determination of humification degree of organic matter of an oxisol and of its organo-mineral fractions. **Quím. Nova**, vol.31, n.8, 2008.

FREIXO, A.A. Caracterização da matéria orgânica de Latossolos sob diferentes sistemas de cultivo através de fracionamento físico e espectrografia de infravermelho. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. 86p. (**Tese de Mestrado**)

FELLER, C. Lá matière organique dans le sols tropicaux à argiles 1 :1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. **These Doct.** Es Science, Univ. Strasbourg (ULP). 1994, 393p.

FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research. Res.**, v.66, p.95–106, 2002.

FRANZLUEBBERS, A.J., SCHOEMBERG, H.H., ENDALE, D.M. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. **Soil Till. Res.** v.96, p.303–315, 2007.

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M. & ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, 74:367-375, 1994.

HOUGHTON, R.A. Changes in the storage of industrial carbon since 1850. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. (Ed.) **Soils and global change**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.45-65.

R. A. Houghton, J. L. Hackler, K. T. Lawrence, **Science** 285, 574 (1999).

HÉNIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique des sols. **Annales de Agronomie**, v. 15, p.161 – 172, 1945.

JANSSEN, B.H. A simple method for calculating decomposition and accumulation of “Young” soil organic matter. **Plant and Soil**, v.76, p.297-304, 1984.

JENKINSON, D.S.; RAYNER, J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. **Journal of Soil Science**, v.123, p.298-305, 1977.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.860–867, 1987.

KAY, B.D. & DEXTER, A.R. The influence of dispersive clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, p.297–310, 1992.

IMHOFF, C.S. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos. Piracicaba, 2002. **Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas)**-Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66:1656-1661, 2002.

INSTITUTO AGRONOMICO DO PARANA. Dados climatológicos de Ponta Grossa – 2008. Ponta Grossa: **IAPAR**, 2008.

IPCC, 2000. The IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES). **IPCC**, Geneva.

LAL, R.; LOGAN, T. J. Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. In: LAL, R., KIMBLE, J. M., LEVINE, E. AND STEWART, B. A. (ed.). **Soil management greenhouse effect**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995. p. 293 – 307.

LAL, R. Soil Carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, 2004, 123: 1-22.

Lal, R. 2007. Soil science and the carbon civilization. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 71:1425-1437.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. & VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:175-187, 2004.

MADARI, B. E. Procedimento para uma Estimativa Compartimentada do Seqüestro de Carbono no Solo. In: *Matéria Orgânica do Solo - Comunicado Técnico nº 22*, 2004.

MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. & RASMUSSEN, K.J. No-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. **Soil Till. Res.**, 62:1-14, 2001.

MUNKHOLM, L.J. & SCHJØNNING, P. Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions. *Soil Till. Res.*, 79:79-85, 2004.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.1-8.

PAVEI, M.A., Decomposição de resíduos culturais e emissão de gases do efeito estufa em sistemas de manejo do solo em Ponta Grossa. 2003 - 2004, 114 p. **Dissertação de Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas** – Universidade de Sao Paulo Escola Superior de Agricultura“Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.1173-1179, 1987.

PAUSTIAN, K., COLLINS, H.P., PAUL, E.A. Management controls on soil carbon. In E.A. Paul et al. (ed.) **Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America**. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 15–49, 1997.

POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology e Biochemistry**, v. 19, p. 159 – 164, 1987.

REICOSKY, D.C.;KEMPER, W. D.: LANGDALE, G. W.; DOUGLAS JR., C. L.; RASMUSSEN, P. E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 50, p. 253 – 261, 1995.

RICE, C. W. Carbono orgânico e o ciclo global do Carbono.Tradução de textos publicado no **Boletim da Kansas State University**. Revista Plantio Direto. 2004

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a cerrado Oxisol. **Soil Tillage and Research**, v.70, p.107-119, 2003.

SÁ, M. M. F. Influência do material de origem, superfícies geomórficas e posição na vertente nos atributos do solo da região dos Campos Gerais, PR. Curitiba: **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)**, 1995. 205p.

SÁ, J.C.M., CERRI, C.C., DICK, W.A., LAL, R., VENSKE-FILHO, S.P., PICCOLO, M.C., FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.65, p.1486–1499, 2001.

SÁ, J.C.M.; SANTOS, J. B.; CARDOSO, E. G.; JUNIOR, D. S.; FERREIRA, C. F.; OLIVEIRA, A.; SÁ, M. F. M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S. Usos alternativos da palhada residual da produção de sementes para pastagens. In: **Perspectivas do uso da palhada no “sistema plantio direto”**. São Paulo: Embrapa, 2006. cap.10. p.193-221.

SA, J. C. M. ; SA, M. F. M. ; SANTOS, J.B. ; FERREIRA, A. O. Dinâmica da Matéria Orgânica nos Campos Gerais.. In: I. Santos, Gabriel de Araújo (Ed.). II. Silva, Leandro Souza da (Ed.). III. Canellas, Luciano Pasqualoto (Ed.). IV. Camargo, Flávio A. de O.(Ed).. (Org.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metropole, v. 1, p.443-461, 2008.

SA, J. C. M & R. LAL. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research. Res.** v.103, p.46–56, 2009.

SA, J. C. M; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W.A.; DE CASSIA PICCOLO, M.; FEIGL, B. E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 104, p. 56-64, 2009a.

SÁ, J. C. M. ; GABARDO, G. ; JUNIOR, A.C.S. ; SÁ, M.F.M. Estoque de carbono em uma pedossequência manejada no sistema plantio direto na região dos campos gerais. In: Iª Reunião Paranaense de Ciência do Solo, 2009, Pato Branco. Anais da Iª Reunião Paranaense de Ciência do Solo - CD ROM. Pato Branco : **Synergismus scyentifica UTFPR - Revista do Ensino, Pesquisa e Extensão da UTFPR**. Edição Especial, 2009b. v. 4.

SALL, J.; CREIGHTON, L.; LEHMAN, A. **JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software**. 3rd ed. Cary: Duxbury Press, 2005. 580p.

SÉGUY, L., S. BOUZINAC, AND O. HUSSON. Direct-Seeded tropical soil systems with permanent soil cover: learning from Brazilian experience. p.323-342, 2006. In N. Uphoff et al., (eds) **Biological approaches to sustainable soil systems**. Taylor and Francis Group, CRC Press Publ., Boca Raton, FL.

SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; PÉREZ, M. G.; MARTIN NETO, L.; VASQUEZ, F.M. Relações entre matéria orgânica do solo e declividade de vertentes em topossequência de Latossolos do Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.31, n.5, pp. 1059-1068, 2007.

SISTI, C.P.J., H.P. DOS SANTOS, R. KOHHANN, B.J.R. ALVES, AND S. URQUIAGA. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil Tillage Res.** 76:39-58. 2004.

SIX, J., C. FELLER, K. DENEFF, S.M. OGLE, J.C.M. SÁ, AND A. ALBRECHT. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-Effects of no-tillage. **Agronomie**. v.22, p.755-775, 2002.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S. & DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, 79: 7-31, 2004.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C.S. & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28(2), p.1023-1031, 2004.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 33-42, fev. 2008a.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.943-952, 2008b.

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

UTOMO, W.H. & DEXTER, A.R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, v.32, p.203–213, 1981.

VAN VEEN, J.A.; PAUL, E.A. Organic carbon dynamics in grassland soil. I. Background information and computer simulation. **Canadian Journal of Soil Science**, v.61, p.185-201, 1981.

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil Till. Res.**, 42:253-275, 1997.

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **Eur. J. Soil Sci.**, 49:73-84, 1998.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. **Soil Till. Res.**, 31:263-175, 1994.

ZOTARELLI, L., ALVES, B.J.R., URQUIAGA, S., BODDEY, R.M. & SIX, J. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v.95, p.196–206, 2007.

ZINN, Y.L., R. LAL, AND D.V.S. RESCK. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil Tillage Res.** v.84, p.28–40, 2005.