

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**DINÂMICA DO CARBONO EM LATOSSOLO
VERMELHO SOB SISTEMAS DE
PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS**

Tese de Doutorado

Ben-Hur Costa de Campos

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**DINÂMICA DO CARBONO EM LATOSSOLO
VERMELHO SOB SISTEMAS DE
PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS**

por

Ben-Hur Costa de Campos

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil

2006

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Tese de Doutorado

DINÂMICA DO CARBONO EM LATOSSOLO VERMELHO
SOB SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS

elaborada por

Ben-Hur Costa de Campos

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado – UFSM
(Presidente/Orientador)

Ph.D. João Mielniczuk – UFRGS

Dr. Cimélio Bayer – UFRGS

Dr. Celso Aita – UFSM

Dr. Thomé Lovato – UFSM

Santa Maria, 27 de abril de 2006.

Campos, Ben-Hur Costa de, 1968-

C198d

Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas / por Ben-Hur Costa de Campos ; orientador Telmo Jorge Carneiro Amado. – Santa Maria, 2006
188 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2006.

1. Ciência do solo 2. Manejo do solo 3. Preparo do solo
4. Solo 5. Rotação de culturas 6. Carbono orgânico 7.
Nitrogênio total I. Amado, Telmo Jorge Carneiro, orient.
II. Título

CDU: 631.4

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Dedico este trabalho a minha família,
especialmente, a meu pai João e meu filho Eduardo,
os homens mais importantes da minha vida.**

**Por este trabalho receberei o título de Doutor,
mas com certeza meu principal título,
até o momento, é ser “Pai do Eduardo”**

AGRADECIMENTOS

À Universidade pública e gratuita.

À FUNDACEP, pela liberação e apoio para realização deste curso.

Ao Professor Telmo Jorge Carneiro Amado pela orientação.

Aos colegas da FUNDACEP Valderi Gnatta e Juliana Souza da Silva, meus braços direito e esquerdo na realização deste trabalho.

Aos colegas José Ruedell e Ciro Petreire, pela cedência do experimento e dados de produtividade das culturas para realização do trabalho.

Aos professores Cimélio Bayer, João Mielniczuk e Celso Aita pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Ao colega Gustavo Torniquist, pelas trocas de idéias e trabalhos iniciais que desencadearam na realização deste Curso.

Aos colegas Paulo César Conceição e Evandro Spagnollo, pelas trocas de idéias nas análises de carbono e nitrogênio do solo.

Ao colega Mário Bianchi, pelo auxílio nas análises estatísticas.

À FAPERGS pelo auxílio financeiro parcial deste trabalho.

Aos professores Celso Aita, Dalvan Reinert, Carlos Alberto Ceretta e Marcos Fries (*in memorian*), pela iniciação e continuidade em pesquisa e, ensinamentos em ciência e vida.

Aos professores Danilo Rheinheimer, Zaida Antonioli, Leandro da Silva e Antonio Azevedo pelos ensinamentos durante o curso.

Aos colegas de curso Jorge Mattias, Carla Pandolfo, Milton da Veiga e Fernando Parobelli, pela amizade e troca de idéias.

Aos colegas e funcionários da FUNDACEP, pelas trocas de idéias e convívio, com quem muito aprendi e que tornam esta instituição um local bom de se trabalhar.

Aos meus pais João e Maris, pelo apoio, educação e alicerce da minha estrutura emotiva. Às irmãs Liziane e Luciane e, sobrinhas Juliana e Julia, pelo carinho. Aos cunhados Aramis e Fabiano, por cuidarem das minhas irmãs e sobrinhas.

A minha esposa Andrea, pelo amor, carinho e incentivo e, ao meu filho Eduardo, pela sua existência.

RESUMO GERAL

Tese de Doutorado
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

DINÂMICA DO CARBONO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS

Autor: Ben-Hur Costa de Campos

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado

Local e data da defesa: Santa Maria, 27 de abril de 2006.

O estoque de C no solo é consequência do balanço entre a saída de C pela emissão de CO₂ (devido à atividade de microrganismos heterotróficos) e erosão e, a entrada de C, principalmente pela adição de compostos orgânicos sintetizados no processo de fotossíntese vegetal. Visando avaliar sistemas de preparo do solo e de culturas quanto a entrada de C orgânico pelos resíduos e saída pela evolução de CO₂ e sua consequência no estoque de C orgânico no solo, foi desenvolvido essa pesquisa em experimento de longa duração (19 anos) sob Latossolo Vermelho distrófico típico. O experimento está situado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. Neste são conduzidos os preparos de solo convencional (PC) e plantio direto (PD) e, foram selecionados três sistemas comerciais de culturas: monocultura trigo/soja (R0); rotação de inverno aveia/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2), em cada sistema de preparo do solo. As avaliações foram realizadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. O solo em PD, na média dos sistemas de culturas, apresentou maior teor e estoque de C orgânico e N total e fracionados que o solo em PC na camada superficial do solo (0-5 cm), enquanto que o solo sob PC apresentou, mais C orgânico e N total particulado (COP e NTP) na camada de 5-10 cm. O solo em PD apresentou 1,6% mais COT do que o solo sob PC, na camada de 0-30 cm, na média dos sistemas de culturas, pelo cálculo da camada equivalente. No método de cálculo da massa equivalente esta diferença aumentou para 4,5%. A rotação culturas R2 associada ao PD (PD R2) apresentou mais COAM, COT, NTAM e NT que os demais tratamentos, na camada de 0-30 cm. A recuperação do estoque de matéria orgânica do solo foi mais influenciada pelo sistema de rotação de culturas, que incluíram espécies de alto aporte de resíduos orgânicos, do que pelo sistema de preparo de solo. Este comportamento ocorreu devido às diferenças de aporte de resíduos vegetais. As culturas em PD, em média, forneceram apenas 14% mais C ao solo, do que as sob PC, mas quando associado à rotação de culturas R2 com PD (PD R2) esta diferença aumentou para 68% quando comparado a monocultura em PC (PC R0). A perda de C-CO₂, avaliada pela evolução de CO₂, foi similar entre os tratamentos (sistemas de preparo do solo e culturas), sendo influenciadas principalmente pela temperatura e umidade do solo.

Palavras chaves: ciência do solo, preparo do solo, rotação de culturas, carbono orgânico, nitrogênio total.

GENERAL ABSTRACT

Doctor Thesis
Soil Science Graduate Program
Santa Maria Federal University, RS, Brazil

CARBON DYNAMICS ON A RHODIC HAPLUDOX ON SOIL TILLAGE AND CROP SYSTEMS

Author: Ben-Hur Costa de Campos

Adviser: Telmo Jorge Carneiro Amado

Place and date of the defense: Santa Maria, April 27, 2006.

The soil C stock is a consequence of the balance between the C losses by the CO₂ emission (associate to the heterotrophic microorganisms activity) and erosion, and to C inputs, associate to organic compounds input by the vegetal photosynthesis process. In order to evaluate the soil tillage and crop systems regarding to the C inputs by the residues and the C losses by the CO₂ evolution and its consequences on the soil C stocks, a long term experiment (19 years) was carried out over a Rhodic Hapludox. This experiment is located in FUNDACEP, Cruz Alta, RS, Brazil. The main treatments were soil tillage systems: conventional tillage (CT) and no-tillage (NT). Subplots were tree commercial crop systems: winter wheat/soybean defined as monocropping system (R0), black oat/soybean/winter wheat/soybean defined as a winter crop rotation system (R1), and black oat/soybean/black oat+common vetch/maize/oil radish/winter wheat/soybean (R2) defined as intensive crop rotation system. The soil in NT system, averaged over crop systems, showed higher SOC and TN stocks and their particulate pools than the soil in CT on the shallow soil layer (0 - 5 cm), while the CT showed higher particulate organic carbon and nitrogen stocks (POC and PN) on the 5 - 10 cm layer. The soil in NT showed 1.6% more SOC than CT, averaged on the rotation systems, estimated by the layer equivalent method. To the mass equivalent method this difference increase to 4.5%. The crop rotation R2 associated to the NT (NT R2) showed higher mineral-associated carbon, SOC, mineral-associated N and TN stocks than the others treatments, on the 0 – 30 cm layer. The soil organic matter restoration was more influenced by the crop rotations systems, with high biomass input, than the tillage system adopted. This result most likely is due to differences in the biomass inputs. Once the NT, in averaged on crop systems, resulted in only 14% higher C addition than the CT. When associated to the R2 (NT R2) this difference increased to 68% compared to the CT without crop rotation (CT R0). The C-CO₂ losses, evaluated by CO₂ flux, were similar among treatments (soil tillage and crop systems), it is mostly influenced by the moisture and soil temperature.

Key words: soil science, soil tillage, crop systems, organic carbon, total nitrogen.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	19
1 CAPÍTULO I: ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO - A ENTRADA -	24
1.1 RESUMO	24
1.2 INTRODUÇÃO	26
1.2.1 Hipóteses	29
1.2.2- Objetivos	29
1.3 MATERIAL E MÉTODOS	30
1.3.1 Condições experimentais	30
1.3.2 Avaliações	32
1.3.2.1 Produção de fitomassa	32
1.3.2.2 Cálculo da adição de carbono nos sistemas.....	36
1.3.2.3 Cálculo da adição de nitrogênio nos sistemas	36
1.3.3 Análise estatística	38
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
1.4.1 Adição de matéria seca e carbono	38
1.4.2 Adição de nitrogênio	48
1.4.3 Relações das adições de carbono e nitrogênio	53
1.5 CONCLUSÕES	54
2 CAPÍTULO II: : EVOLUÇÃO DE CO₂ E DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS EM SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO - A SAÍDA -	55
2.1 RESUMO	55
2.2 INTRODUÇÃO	57
2.2.1 Hipóteses	60
2.2.2 Objetivos	60
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	61
2.3.1 Condições experimentais	61
2.3.2 Avaliações	61
2.3.2.1 Evolução de CO ₂ em sistemas de preparo do solo e de culturas	61
2.3.2.2 Comparação de câmaras para captação de CO ₂	63
2.3.2.3 Análise da decomposição de resíduos	66
2.3.2.4 Análise de C dos resíduos vegetais dos sacos de decomposição	67
2.3.2.5 Indicadores ambientais	67
2.3.2.6 Umidade do solo	68

2.3.3 Análise estatística	68
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
2.4.1 Evolução de C-CO ₂	70
2.4.2 Comparação das câmaras de captação de CO ₂	75
2.4.3 Decomposição dos resíduos vegetais	80
2.5 CONCLUSÕES	85
3 CAPÍTULO III: FRACIONAMENTO DO CARBONO ORGÂNICO E DO NITROGÊNIO DO SOLO EM SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO - O ESTOQUE -	86
3.1 RESUMO	86
3.2 INTRODUÇÃO	88
3.2.1 Fracionamento físico do carbono orgânico	89
3.2.2. Métodos de cálculo camada equivalente e massa equivalente	91
3.2.3 Hipóteses	91
3.2.4 Objetivos	91
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	92
3.3.1 Condições experimentais	92
3.3.2 Avaliações	92
3.3.2.1 Fracionamento da matéria orgânica do solo	92
3.3.2.2 Análise de carbono orgânico e nitrogênio total e cálculo dos estoques desses elementos no solo	93
3.3.3 Análise estatística	96
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
3.4.1 Distribuição do C orgânico total e fracionado no perfil do solo	96
3.4.2 Estoques de C orgânico no solo	99
3.4.2.1 Método da camada equivalente x massa equivalente .	99
3.4.2.2 Sistemas de preparo e rotação de culturas	106
3.4.2.3 Fracionamento do C orgânico	116
3.4.2.4 Efeito dos sistemas de manejo no seqüestro de C no solo	119
3.4.3 Distribuição do N total e fracionado do N total no perfil do solo	121
3.4.4 Estoque do N total e fracionado do N total no perfil do solo	122
3.4.5 Relação C/N do solo	129
3.5 CONCLUSÕES	131
3.6 CONSIDERAÇÕES	131
4 CAPÍTULO IV: RELAÇÕES ENTRE A ENTRADA, A SAÍDA E O O ESTOQUE DO CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL DO SOLO EM SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO	

- O BALANÇO -	132
4.1 RESUMO	132
4.2 INTRODUÇÃO	134
4.2.1 Hipóteses	135
4.2.2 Objetivos	136
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	136
4.3.1 Condições experimentais	136
4.3.2 Avaliações	136
4.3.2.1 Amostragem e fracionamento do C e N do solo	136
4.3.2.2 Estimativas das adições de C e N ao solo pelos sistemas de culturas	137
4.3.2.3 Estimativas do coeficiente de humificação (k_1) e da taxa de perda de matéria orgânica (k_2)	138
4.3.2.4 Cálculo do índice de manejo de carbono (IMC) do solo	139
4.3.2.5 Taxa de perda de C orgânico do solo	140
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	141
4.4.1 Alterações nos estoques de carbono orgânico total (COT) do solo	141
4.4.2 Índice de manejo de carbono (IMC) do solo	144
4.4.3 Taxa de perda de C orgânico do solo	146
4.4.4 Alterações nos estoques de nitrogênio total (NT) do solo	149
4.5 CONCLUSÕES	152
5 AVALIAÇÃO DA CONJUNTURA E RECOMENDAÇÕES	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
APÊNDICES	168

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

1.1.	Produção de matéria seca da parte aérea da aveia e do consórcio aveia + ervilhaca, e estimativa do C adicionado considerando a concentração de C na matéria seca de 39,4% para aveia e 39,0% para aveia + ervilhaca	35
1.2.	Produção de matéria seca da parte aérea do nabo forrageiro e estimativa do carbono adicionado, considerando a concentração de C na matéria seca de 34%	35
1.3.	Produção de fitomassa do consórcio aveia + ervilhaca e estimativas do N no tecido vegetal da ervilhaca, considerando a proporção de 50% de cada cultura e teor de N da ervilhaca em 3% e, do N adicionado pela fixação biológica de nitrogênio pela ervilhaca	37
1.4.	Produção de matéria seca e carbono em diferentes sistemas de rotação de culturas, nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, nos anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/2000 e 2000 e a médias destes anos agrícolas	39
1.5.	Adição anual de matéria seca e carbono em diferentes sistemas de rotação de culturas, nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, considerando o somatório dos anos agrícolas 1998/99 e 1999 e, 1999/00 e 2000 e a médias destes somatórios	40
1.6.	Comparação dos valores obtidos de carbono pela coleta de resíduos vegetais (CR) e estimados pelo índice de colheita (IC) nos anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/00 e 2000	42
1.7.	Adições anuais de C pelos sistemas de culturas sob preparo convencional, nos anos agrícolas 1985/86 a 2003/04	44
1.8.	Adições anuais de C pelos sistemas de culturas sob plantio direto, nos anos agrícolas 1985/86 a 2003/04	45
1.9.	Adição média anual e total de carbono pelas culturas nos diferentes sistemas de rotação sob os preparos convencional e plantio direto, de acordo com os anos de cultivo em 19 anos de experimento (1985-2004)	49
1.10.	Balanço da entrada de nitrogênio pela adubação nitrogenada e da saída pela exportação no grão nas culturas de trigo e milho nos sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional e plantio direto, média de 19 anos de experimento (1985-2004)	50
1.11.	Produção média de fitomassa e estimativa da adição de N pela fixação biológica de nitrogênio pela soja nos sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional e plantio direto, média de 19 anos de experimento (1985-2004)	51

1.12. Nitrogênio adicionado nas culturas num ciclo de rotação completo e anualmente nos sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional e plantio direto	52
1.13. Carbono, nitrogênio e relação C/N das adições pelas culturas nos diferentes sistemas de rotação sob os preparos convencional e plantio direto em 19 anos de experimento	53

CAPÍTULO II

2.1. Precipitação pluviométrica e temperaturas mínimas, médias e máximas diárias ocorridas durante o período de realização do trabalho de comparação das câmaras de captação de CO ₂ (2 a 5/11/2003). Dados obtidos na Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, RS	70
2.2. Média dos fluxos de C-CO ₂ e umidade do solo sob sistemas de preparo e de culturas e, temperatura média do ar e precipitação ocorridas no período das estações do ano em 1999/2000 e 2000/2001	74
2.3. Evolução anual acumulada de C-CO ₂ sob sistemas de preparo convencional e plantio direto em diferentes rotações de culturas, de junho a maio de 1999/2000 e 2000/2001	76
2.4. Significância de F para valores médios de C-CO ₂ (kg ha ⁻¹ h ⁻¹), nos diferentes tempos de avaliação após o manejo do sistema convencional	77

CAPÍTULO III

3.1. Densidade do solo, concentração e estoque de C da área de campo nativo, Cruz Alta, RS (Jantalia, 2005)	95
3.2. Estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 μm), associado aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da camada equivalente	100
3.3. Estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 μm), associado aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da massa equivalente	102
3.4. Comparação da relação do COT e as frações particulada (COP) e associada aos minerais (COAM), calculados pelo método da camada equivalente, em sistemas de preparo do solo e culturas, entre os solos Argissolo e Latossolo	118

3.5.	Comparação da taxa anual de seqüestro de carbono, em sistemas de preparo do solo dentro de cada rotação de culturas, entre os solos Argissolo e Latossolo, calculados pelo método da camada equivalente, na camada de 0-20 cm	121
3.6.	Comparação da taxa anual de seqüestro de carbono, em sistemas de rotação de culturas dentro cada preparo do solo, entre os solos Argissolo e Latossolo, calculados pelo método da camada equivalente, na camada de 0-20 cm	122
3.7.	Estoque de nitrogênio total na fração particulada (NTP, >53 μm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 μm) e total (NT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da camada equivalente	124
3.8.	Estoque de nitrogênio total na fração particulada (NTP, >53 μm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 μm) e total (NT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da massa equivalente	126
3.9.	Relação C/N dos estoques de COT e NT do solo em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelos métodos da camada equivalente e da massa equivalente	130

CAPÍTULO IV

4.1.	Índice de estoque de C (IEC), labilidade do C (LC), índice de labilidade do C (ILC) e índice de manejo do C (IMC) do solo sob sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional (PC) e plantio direto (PD), e sob campo nativo, na camada de 0-20 cm	145
4.2.	Taxa de perda anual de C relacionando a evolução acumulada de CO ₂ anual e o estoque de COP, COAM e COT, na camada de 0-20 cm, calculado pela camada equivalente e pela massa equivalente, no solo sob sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional (PC) e plantio direto (PD)	148
4.2.	Taxa de perda anual de C do solo (k_2) calculada pela adição anual de resíduos, coeficiente de humificação, C-CO ₂ evoluído por ano e estoque de COT na camada de 0-20 cm	150

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- 1.1. Mecanismos de formação das substâncias húmicas. Compostos nitrogenados sintetizados por microrganismos reagem com ligninas modificadas (via 4), quinonas (vias 2 e 3) e açúcares reduzidos (via 1) para formar polímeros complexos de cor escura (adaptado de Stevenson, 1982). Em destaque a estrutura química da quinona 28
- 1.2. Esquema de distribuição dos tratamentos a campo no experimento de sistemas de preparo do solo e culturas. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Legenda: do trabalho original (Ruedell, 1995) e entre parênteses a nova denominação utilizada neste estudo 33
- 1.3. Relação entre o C determinado pela coleta de resíduos vegetais (CR) e o estimado pelo índice de colheita (IC) 43

CAPÍTULO II

- 2.1. Câmara para medição da evolução de CO₂ a campo 62
- 2.2. Câmara II para medição da evolução de CO₂ a campo 65
- 2.3. Distribuição da precipitação pluviométrica durante o período de realização da avaliação da evolução de CO₂ (7/6/1999 a 4/6/2001) e as temperaturas médias do ar nas amostragens. Dados obtidos na Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta (RS) 69
- 2.4. Fluxos de C-CO₂ nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), no período de 07/06/99 a 04/06/01. * = médias diferem pelo teste DMS a 5% 72
- 2.5. Umidade do solo nos sistemas de manejo do solo convencional e plantio direto em sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), no período de 07/06/99 a 04/06/01, na camada de 0-5 cm 73
- 2.6. Evolução acumulada de C-CO₂ e total evoluído em 728 dias nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), no período de 07/06/99 a 04/06/01 75
- 2.7. Fluxos de C-CO₂ medidos por duas câmaras de captação. Média de 24 repetições. Cruz Alta, RS 78
- 2.8. Fluxos de C-CO₂ medidos por duas câmaras de captação nos sistemas de manejo do solo convencional e plantio direto. Média de 12 repetições. Cruz Alta, RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste F a 5% 78

2.9. Fluxos de C-CO ₂ nos sistemas de manejo do solo convencional e plantio direto, medidos por duas câmaras de captação, após 4 horas de aração e gradagem no convencional. Cruz Alta, RS. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para sistemas e minúsculas para câmaras, não diferem estatisticamente pelo teste F a 5%	79
2.10. Fluxos de C-CO ₂ nos sistemas de manejo do solo convencional e plantio direto, medidos por duas câmaras de captação, após 28 horas de aração e gradagem no convencional. Cruz Alta, RS. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para câmaras e minúsculas para rotação, não diferem estatisticamente pelo teste F a 5%	79
2.11. Fluxos de C-CO ₂ nos sistemas de manejo do solo convencional e plantio direto em diferentes rotações de culturas, medidos por duas câmaras de captação, após 52 horas de aração e gradagem no convencional. Médias seguidas pela mesma letra, para câmara, não diferem estatisticamente pelo teste F a 5%	80
2.12. Estimativa da taxa de decomposição do C através da equação unicompartmental $C_t = C_o e^{-kt}$ (k, kg ha ⁻¹ dia ⁻¹) sistemas de rotação de culturas (0: <u>trigo</u> /soja; 1: <u>aveia</u> /soja/ <u>trigo</u> /soja; 2: aveia/soja/ <u>aveia+ervilhaca</u> /milho/nabo/ <u>trigo</u> /soja), nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, no período de novembro de 1998 a abril de 1999. Em cada sistema de rotação, a cultura sublinhada indica os resíduos estudados	81
2.13. Estimativa da taxa de decomposição do C através da equação unicompartmental $C_t = C_o e^{-kt}$ (k, kg ha ⁻¹ dia ⁻¹) sistemas de rotação de culturas (0: <u>trigo</u> /soja; 1: aveia/ <u>soja</u> / <u>trigo</u> /soja ; 2: aveia/soja/ <u>aveia+ervilhaca</u> /milho/nabo/ <u>trigo</u> /soja), nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, no período de abril a setembro de 1999. Em cada sistema de rotação, a cultura sublinhada indica os resíduos estudados	82
2.14. Estimativa da taxa de decomposição do C através da equação unicompartmental $C_t = C_o e^{-kt}$ (k, kg ha ⁻¹ dia ⁻¹) sistemas de rotação de culturas (0: <u>trigo</u> /soja; 1: aveia/soja/ <u>trigo</u> /soja; 2: aveia/soja/ <u>aveia+ervilhaca</u> /milho/nabo/ <u>trigo</u> /soja), nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, no período de novembro de 1999 a abril de 2000. Em cada sistema de rotação, a cultura sublinhada indica os resíduos estudados	84
 CAPÍTULO III	
3.1. Distribuição dos teores de carbono orgânico particulado (COP) (a), associado aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c) nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/ soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2)	97

3.2.	Concentração de carbono orgânico particulado (COP >53 μm) e associado aos minerais (CAM <53 μm) em diferentes rotações de culturas (R0, R1 e R2) nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD), nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm	98
3.3.	Relação entre o estoque de carbono orgânico total calculado pelos métodos da camada equivalente e massa equivalente, em sistemas de preparo do solo e de culturas, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30cm. Média de quatro repetições	104
3.4.	Estoques de carbono orgânico particulado (COP) (a), associado aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c) na camada de 0-30 cm do solo cultivado nos sistemas de preparo convencional e plantio direto com diferentes sistemas de rotação de culturas, calculados pela camada equivalente e massa equivalente	110
3.5.	Taxas diferenciais anuais do C orgânico comparativamente ao preparo convencional sem rotação (PC R0), para quatro camadas e camada total de solo (cm), nas frações particulada (COP) (a), associada aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c), calculados pela camada equivalente, em experimento com 19 anos	112
3.6.	Taxas diferenciais anuais do C orgânico comparativamente ao preparo convencional sem rotação (PC R0), para quatro camadas e camada total de solo (cm), nas frações particulada (COP) (a), associada aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c), calculados pela massa equivalente, em experimento com 19 anos	113
3.7.	Variação do COT do solo cultivado a partir de campo nativo por cerca de 30 anos em preparo convencional e após a instalação do experimento com os preparos convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/ trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/ soja (R2), em 0-20 cm, calculado pela camada equivalente (a) e pela massa equivalente (b)	115
3.8.	Distribuição dos teores de nitrogênio total particulado (NTP) (a), associado aos minerais (NTAM) (b) e total (NT) (c) nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2)	123

CAPÍTULO IV

4.1.	Relação entre a adição anual de C (A) com a variação dos estoques de C (dC/dt), calculados por camada equivalente e massa equivalente, na camada de 0-20 cm do solo submetido aos sistemas de preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD) e os sistemas de culturas trigo/soja (R0); aveia/soja/ trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/ soja (R2), em experimento conduzido há 19 anos	142
------	--	-----

- 4.3. Relação entre a adição anual de N (A) com a variação dos estoques de N (dN/dt), calculados por camada equivalente e massa equivalente, na camada de 0-20 cm do solo submetido aos sistemas de preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD) e os sistemas de culturas trigo/soja (R0); aveia/soja/ trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/ soja (R2), em experimento conduzido há 19 anos 151

LISTA DE APÊNDICES

1.1.	Precipitação ocorrida durante o período de 1974 a 2003. Dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, RS	168
1.2.	Probabilidade do teste F para matéria seca e carbono produzido em diferentes sistemas de rotação de culturas, nos sistemas de preparo convencional e plantio direto	169
1.3.	Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 1985/86 a 1990/91	170
1.4.	Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 1991/92 a 1996/97	170
1.5.	Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 1997/98 a 2001/02	171
1.6.	Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 2002/03 a 2003/04	171
2.1.	Dados gerais de C-CO ₂ ($\text{kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) obtidos nas câmaras de captação I de 15 cm (Anderson, 1982) e II de 30 cm (Aita, 1996)	172
2.2.	Comparação das câmaras para medição da evolução de CO ₂ a campo de 15 cm (I) e 30 cm (II) nos sistemas de preparo do solo convencional (A) e plantio direto (B). Cruz Alta, RS	173
3.1.	Densidade do solo nas diferentes profundidades em rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto ¹ e em área de campo nativo	174
3.2.	Concentração e estoque de carbono orgânico na fração particulada (COP, $>53 \mu\text{m}$), na fração associada aos minerais (COAM, $<53 \mu\text{m}$) e total (COT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, em diferentes rotações de culturas (R0, R1 e R2) ¹ nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD)	175
3.3.	Causas de variação e coeficiente de variação do estoque de carbono orgânico na fração particulada (COP $>53 \mu\text{m}$), na fração associada aos minerais (COAM $<53 \mu\text{m}$) e total (COT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 0-20 e 0-30 cm	180
3.4.	Concentração e estoque de nitrogênio na fração particulada (NTP, $>53 \mu\text{m}$), na fração associada aos minerais (NTAM, $<53 \mu\text{m}$) e total (NT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, em diferentes rotações de culturas (R0, R1 e R2) ¹ nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD)	182

3.5. Causas de variação e coeficiente de variação do estoque de nitrogênio na fração particulada (NTP, >53 μm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 μm) e total (NT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 0-20 e 0-30 cm 187

INTRODUÇÃO GERAL

Os gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), principalmente, são responsáveis pela manutenção da temperatura média de 16-18°C na Terra, promovendo o chamado "efeito estufa", essencial para a existência da vida no planeta (Cerri et al., 2004). Segundo Valverde et al. (2004), sem o efeito estufa a Terra seria 30°C mais fria. Entretanto, tem sido crescente a preocupação mundial em relação às mudanças do clima no planeta, decorrentes, principalmente, do aumento das emissões destes gases (Houghton et al., 1983; Cerri et al., 2004; Valverde et al., 2004).

Estudos revelam que, nos últimos 200 anos, a concentração de CH₄, N₂O e, principalmente de CO₂, tem aumentado na atmosfera, sendo este processo mais significativo nas últimas décadas, pela ação do homem (efeito estufa antrópico). Uma das principais conseqüências deste fenômeno é o que se pode chamar "aumento do efeito estufa" (Cerri et al., 2004). Este fator tem levado ao aquecimento global e alterações climáticas no planeta (Machado et al., 2004; Valverde et al., 2004).

O aumento das emissões destes gases origina-se do grande consumo de biomassa fóssil (petróleo e carvão) e de florestas (devido às queimadas e a utilização para produção de energia) (Reicosky & Lindstron, 1993; Cerri et al., 2004). Recentemente, verificou-se que parte dos gases do efeito estufa são oriundos de atividades agrícolas, caracterizando esse setor de produção como um dos responsáveis pelo aumento do efeito estufa (Cerri et al., 2004). A contribuição da atividade agrícola ocorre pelo aumento da taxa de decomposição da matéria orgânica em sistemas de preparo convencional do solo (Reicosky & Lindstron, 1993) e, principalmente, pela derrubada de florestas para expansão agrícola.

Machado et al. (2004), citam que a expansão da agricultura através da derrubada de florestas durante os últimos 140 anos levou a uma liberação líquida de 121 Pg de C (na forma de CO₂) para a atmosfera (1 Pg - petagrama = 1 Gt - gigatonelada = 10⁹ Mg - megagrama), o que levaria a contribuição de 0,86 Pg de C anualmente. Segundo Pradella & Alves (2005), para o IPCC (*International Panel of Climate Change*), o nível de emissão mundial de dióxido

de carbono em 1990, era de 7,4 Pg ano⁻¹, das quais 6,0 provenientes do setor de energia, 1,2 como resultado de queimadas e derrubadas de florestas (mudança no uso da terra) e 0,2 da produção de cimento. Para os autores, esses valores, entretanto, não contam com o reconhecimento amplo da comunidade científica. Verifica-se então que, de acordo com o IPCC, a agricultura contribuiria com aproximadamente 20% das emissões anuais de CO₂ para a atmosfera.

Uma das possíveis conseqüências deste aumento do CO₂ atmosférico é o aquecimento global cujas repercussões climáticas deverão ter impactos negativos sobre a produtividade agrícola em várias regiões do planeta (Wood et al., 1990). Esta preocupação com o aumento progressivo da concentração dos gases de efeito estufa (GEE), tem levado a vários painéis mundiais com o objetivo de estabelecer acordos para redução da emissão destes gases. As definições de metas e critérios de redução de emissões só foram estabelecidas durante a terceira Conferência das Partes, em Kyoto no Japão, conhecido como Protocolo de Kyoto (Valverde et al., 2004). Visando facilitar o cumprimento das metas de redução da emissão dos GEE, será permitida a utilização de mecanismos de flexibilização. Para Valverde et al. (2004), projetos do setor de energia, que visam diminuir a emissão, ou projetos de reflorestamento, que estocam o C atmosférico (CO₂) nos plantios florestais, são os únicos que permitem a participação, nestes mecanismos, de países em desenvolvimento, como o Brasil. Estes projetos devem contabilizar o C total da área em questão. Para isto, é necessário o conhecimento do fluxo de C no sistema, o que é conseguido através de pesquisas de quantificação do CO₂ que será captado no projeto (Valverde et al., 2004).

No setor agrícola, o reflorestamento ou florestamento (silvicultura) é uma das alternativas mais aceitáveis. Na floresta o C ficaria retido nas árvores e estas, após o corte, poderiam ser usadas na fabricação de móveis e casas, retendo este elemento por mais tempo. Caso contrário, deixando a árvore morrer, esta entraria em decomposição e grande parte do C voltaria à atmosfera. O mesmo ocorreria se fosse utilizada para produção de energia (carvão). Mas, a pergunta é: quanto tempo o C precisa ficar retido para ser

considerado no “Mercado do Carbono”?

Neste mercado, a parte energética parece ser a mais promissora. Também no setor agrícola, o uso do álcool (biocombustível) para veículos, por ser menos poluente que a gasolina e o diesel, deverá ser bastante explorado. Em setores não agrícolas, cita-se como exemplo, o potencial hidroelétrico do Brasil para a geração de energia, o que não ocorre em outros países que dependem de usinas termoelétricas movidas a carvão e, desta forma, grandes emissoras de GEE.

O Mercado de Créditos de Carbono servirá para que países ou empresas que não conseguirem ou não quiserem reduzir suas emissões possam comprar Certificados de Redução de Emissões (CRE) em países em desenvolvimento e usá-los para cumprir suas metas (Valverde et al., 2004).

Verifica-se que este mercado foi criado, de certa forma, para que os países desenvolvidos continuem a poluir e para que os países em desenvolvimento sirvam de avalistas desta poluição. Será que este mercado irá resolver os efeitos da poluição ou é apenas para amenizar as críticas da sociedade? Os Estados Unidos, o maior responsável pela emissão dos GEE, até o momento, não reconhece o Protocolo de Kyoto, não aceitando diminuir suas atividades industriais e o conforto de sua população.

Para o Brasil pode ser uma alternativa de entrada de recursos, desde que bem analisadas as conseqüências desta venda de Créditos de Carbono. Já existem preocupações relacionadas à compra de grandes áreas para reflorestamento, principalmente no centro do país. Não estaria o País colaborando para a formação de grandes latifúndios florestais dos países ricos? E a população local, seria incluída nas vantagens deste mercado ou apenas seria excluída do processo?

Certamente, as vantagens que o Brasil conseguirá, dependerá da habilidade do brasileiro em negociar, explorando ao máximo o grande potencial que o país tem neste mercado. Este potencial refere-se às características ambientais favoráveis ao seqüestro de C, como energia solar, extensão territorial, reservas hídricas, entre outros. A agricultura local precisa encontrar meios para participar deste mercado através, principalmente, das vantagens do

sistema plantio direto em seqüestrar carbono da atmosfera.

A matéria orgânica do solo, apesar de ocupar em média apenas 5% do volume total do solo, tem influência marcante sobre várias propriedades importantes dos solos – CTC, densidade aparente e agregação (Brady, 1984). Outras características dos solos afetadas pela matéria orgânica são a temperatura e umidade (Salton et al., 1995). Normalmente altos teores de matéria orgânica estão correlacionados com alta fertilidade, e, em consequência, alta produtividade potencial (Allison, 1973). Dentro desta mesma perspectiva, a diminuição dos teores de matéria orgânica levam usualmente à uma deterioração de várias propriedades do solo e, conseqüentemente, uma diminuição da produtividade potencial.

O carbono presente na matéria orgânica dos solos do planeta representa um componente fundamental do ciclo do carbono. Segundo estimativas, o solo é o maior compartimento terrestre deste elemento (Kern et al., 1993). Para Stevenson (1994) nele está armazenado 5,7 vezes mais C do que na atmosfera (4000 Pg no solo e 700 Pg na atmosfera), entretanto, para Eswaran et al. (1993) esta relação é de apenas duas vezes (1500 Pg no solo e 750 Pg na atmosfera).

Vários estudos têm demonstrado que a elevação da taxa de decomposição da matéria orgânica resultante do manejo convencional do solo (com lavração e gradagem) pode liberar para a atmosfera mais de 50% do carbono orgânico presente em solos não manejados (Reicosky & Lindstron, 1993; Bayer, 1996). O impacto dos sistemas de manejo do solo sobre a matéria orgânica do solo, ou em outras palavras, sobre o ciclo do carbono nos agroecossistemas merece especial atenção. Sistemas de manejo capazes de manter e até mesmo incrementar o carbono orgânico no solo podem contribuir para a manutenção da capacidade produtiva dos solos e para a atenuação do problema do incremento do CO₂ atmosférico. Para tanto, a disponibilidade de métodos práticos e eficientes para avaliar a dinâmica do carbono se faz necessária.

Assim, a agricultura pode atuar como fonte de emissão de CO₂ para atmosfera quando sob manejos convencionais com lavrações e gradagens, ou

como dreno de CO₂ atmosférico quando sob manejos conservacionistas que contemplam a mobilização mínima do solo, como o plantio direto, e alto aporte de resíduos vegetais (Bayer, 2004). Desta forma, além da expressiva melhoria na qualidade do solo pelo aumento dos estoques de matéria orgânica, a adoção do sistema plantio direto (semeadura direta associada à rotação de culturas) resulta na retirada de CO₂ da atmosfera e sua retenção no solo. Para ser considerado no Mercado de Carbono, o plantio direto tem que ser reconhecido oficialmente no Protocolo de Kyoto como uma atividade com redução certificada de emissões, similar ao realizado para silvicultura (reflorestamento) e produção de biocombustível (Bayer, 2004). Existem tratativas entre empresas e coordenadores agrícolas para criar acordos informais de certificação em áreas de plantio direto no Brasil, a semelhança do que já ocorre nos Estados Unidos (Consortium for Agricultural Soils Mitigation of Greenhouse Gases) (Amado, 2005). Mas também existem muitas dúvidas de como seria realizada a certificação em áreas agrícolas. Como fazê-la? Quem irá fazer?

Uma vez que a dinâmica do C é cada vez mais importante no potencial produtivo do solo e nas questões ambientais, esta deve ser monitorada frequentemente nos agroecossistemas. Faz-se necessário então comparar os diferentes métodos visando identificar aqueles com maior potencial para serem utilizados rotineiramente. Neste sentido, estudos sobre seqüestro de carbono em áreas de plantio direto, recentemente, vêm sendo realizados por vários grupos de pesquisa em diferentes regiões brasileiras, a fim de buscar metodologias adequadas e entender melhor os processos decorrentes dos sistemas de culturas e de preparo do solo.

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar componentes da dinâmica do carbono em diferentes sistemas de manejo de solos e das culturas, a fim de correlacioná-los às questões do efeito estufa e à melhoria da fertilidade e qualidade do solo. E, principalmente, servir de mais argumentos para que os agricultores usem a “semeadura direta” associada à rotação de culturas, adotando o **sistema plantio direto** e obtendo os benefícios que este pode trazer ao homem e ao ambiente.

1 CAPÍTULO I: ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO

- A ENTRADA -

1.1 RESUMO

Os resíduos vegetais são a principal fonte de carbono (C) ao solo, obtido pela transformação do CO₂ da atmosfera em substâncias orgânicas no processo de fotossíntese. As transformações biológicas destas substâncias orgânicas, adicionadas ao solo, geram a matéria orgânica do solo. Desta forma, avaliar a adição de resíduos culturais por diferentes sistemas de culturas inseridas em sistemas de preparo do solo e, conseqüentemente a entrada de carbono no solo, torna-se importante. Com este objetivo foi conduzido este trabalho em experimento de longa duração (19 anos) sob Latossolo Vermelho distrófico típico, localizado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. Neste, são conduzidos os sistemas de preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD), com diferentes sistemas de rotação de culturas, dos quais foram selecionados: sucessão (monocultura) trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (R0); rotação de inverno aveia (*Avena strigosa* Schreb)/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho (*Zea mays* L.)/nabo (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* Metzg.)/trigo/soja (R2). Em cada parcela, foram coletadas quatro amostras de resíduos para determinação da matéria seca, do carbono orgânico total e do nitrogênio total. Em quatro anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/00 e 2000 (dois invernos e dois verões), os maiores valores de adição média anual de carbono ocorreram na rotação R2, sendo intermediário na rotação R1 (soja/trigo/soja/aveia), e inferiores na sucessão R0, em ambos os sistemas de preparo do solo, considerando os dois períodos avaliados. As culturas em PD, em média (4,34 Mg ha⁻¹), forneceram 27% mais C ao solo, que em PC (3,43 Mg ha⁻¹). Na média dos sistemas de preparo, a rotação R2 (5,12 Mg ha⁻¹), forneceu 71% mais C que a monocultura R0 (3,00 Mg ha⁻¹). Comparando os

tratamentos, com maior diferença na adição de carbono, verificou-se que a rotação de culturas em plantio direto incluindo milho na rotação (PD R2, 5,50 Mg ha⁻¹) adicionou 109% mais C que o preparo convencional sem rotação de culturas (PC R0, 2,63 Mg ha⁻¹). Na estimativa de fornecimento de C nos 19 anos de experimento, estas proporções diminuem, mas mantêm a mesma tendência, ficando as áreas sob PD, em média (5,12 Mg ha⁻¹), com 14% mais adição de C ao solo, que as áreas sob PC (4,49 Mg ha⁻¹). Na média dos sistemas de preparo, a rotação R2 (5,77 Mg ha⁻¹), forneceu 49% mais C que a monocultura R0 (3,87 Mg ha⁻¹). Na comparação dos tratamentos com adições de C extremas, o PD R2 (6,20 Mg ha⁻¹) adicionou 68% mais C que o PC R0 (3,70 Mg ha⁻¹). Assim, os sistemas de rotação de culturas tiveram maior efeito na adição de C que os sistemas de preparo do solo. A sucessão trigo/soja adicionou mais N ao solo, que as rotações de culturas, devido a maior frequência de entrada de N na forma mineral no trigo e biológica na soja. A relação C/N das adições pelas culturas aumentou de acordo com a intensidade da rotação de culturas.

1.2 INTRODUÇÃO

O termo “matéria orgânica do solo” (MOS) refere-se a todos os compostos que contêm carbono orgânico no solo, incluindo os microrganismos vivos e mortos, resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos, produtos de sua decomposição e substâncias orgânicas microbiologicamente e/ou quimicamente alteradas (Silva et al., 2004). Segundo os autores, esse conceito é muito abrangente, determinando uma composição extremamente complexa, em função da mistura de diferentes compostos e à grande variedade de processos naturais de degradação e síntese que ocorrem na sua formação. Para Aita et al. (2003) a matéria orgânica do solo é definida como todos os compostos orgânicos presentes no solo [menos o tecido vegetal (palha) e animal morto e não decomposto], seus produtos parciais em decomposição e a biomassa do solo. Os autores consideram os tecidos não decompostos como resíduos culturais ou material orgânico. Entretanto, para Bayer & Mielniczuk (1999) no plantio direto pode-se também considerar os resíduos vegetais (palha) na superfície do solo como matéria orgânica do solo, devido a sua importância nos efeitos sobre o solo, apesar deste tema não ser consenso entre os pesquisadores. Entre estes efeitos estão a menor oscilação da temperatura, maior teor de umidade e controle da erosão, que não ocorrem no sistema convencional, onde a palha é incorporada.

Os principais constituintes da matéria orgânica são o carbono (52-58%), oxigênio (34-39%), hidrogênio (3,3-4,8%) e nitrogênio (3,7-4,15%) (Silva et al., 2004).

O carbono orgânico, importante componente do sistema solo, é obtido pelas plantas através da fixação fotossintética do CO_2 da atmosfera. O oxigênio e o hidrogênio acompanham o metabolismo do carbono e são obtidos da água (H_2O) também no processo de fotossíntese das plantas. Já o nitrogênio é absorvido do solo pelas plantas principalmente sob forma mineral, nítrica (NO_3^-) ou amoniacal (NH_4^+) e excepcionalmente sob outras formas orgânicas como ácidos aminados e vitaminas. Segundo Victoria et al. (1992), as principais fontes de nitrogênio para o solo são materiais vegetais (como restos de cultura

e adubos verdes) ou de natureza animal (esterco e urina), a utilização de fertilizantes industriais e, sais de amônio e nitratos trazidos pela precipitação. A entrada de nitrogênio via precipitação se deve a radiações e relâmpagos, que podem fornecer energia necessária para a reação do N_2 com o oxigênio e com o hidrogênio da água. A decomposição de materiais orgânicos e, principalmente, da matéria orgânica do solo, os fertilizantes industriais e a precipitação são as fontes de N mineral para as plantas. Além do N mineral do solo, algumas plantas, como as leguminosas, conseguem associar-se a microrganismos e, através da fixação biológica converter N_2 em NH_3 , que será utilizada pelo vegetal. Outra fonte de N para as plantas é a fixação assimiótica, bem como a associativa, na qual o microrganismo obtém a NH_3 para o seu metabolismo, ficando este N disponível para as plantas, após a mineralização das células microbianas.

Os resíduos vegetais depositados no solo são fracionados num primeiro momento pela fauna do solo e posteriormente decompostos pelos microrganismos, sendo a maior parte do C oxidada a CO_2 e o restante se torna parte da matéria orgânica do solo, passando a interagir com a fração mineral do solo (Bayer, 1996; De Bona, 2005). Parte do N contido nos resíduos também irá compor a matéria orgânica do solo.

No solo, o C se deposita, principalmente, na forma de húmus, que tem por definição a matéria orgânica estabilizada, também chamada de substância húmica (Cerri et al., 1992). Existem pelo menos quatro vias principais de formação das substâncias húmicas durante a decomposição de resíduos no solo, conforme esquematizado na Figura 1.1. (Cerri et al., 1992; Stevenson, 1994). A combinação de duas destas vias (2 e 3) é atualmente a teoria mais aceita pelos pesquisadores para a formação do húmus (Aita et al, 2003), conhecida como teoria dos polifenóis (Cerri et al., 1992; Stevenson, 1994).

Segundo Cerri et al. (1992), uma das vias (via 3) são polifenóis liberados durante a decomposição da lignina que sofrem conversões enzimáticas para quinonas, as quais se polimerizam na presença de compostos nitrogenados para formar o húmus. Outra via (via 2) é a síntese de polifenóis por fungos a partir de compostos não ligníticos, como a celulose, que são também

enzimaticamente oxidados para quinonas e convertidos para substâncias húmicas. Desta forma, na formação da matéria orgânica é importante a quantidade de resíduos que entram no sistema, que são fontes de C, mas também a entrada de compostos nitrogenados que estabilizam estas substâncias.

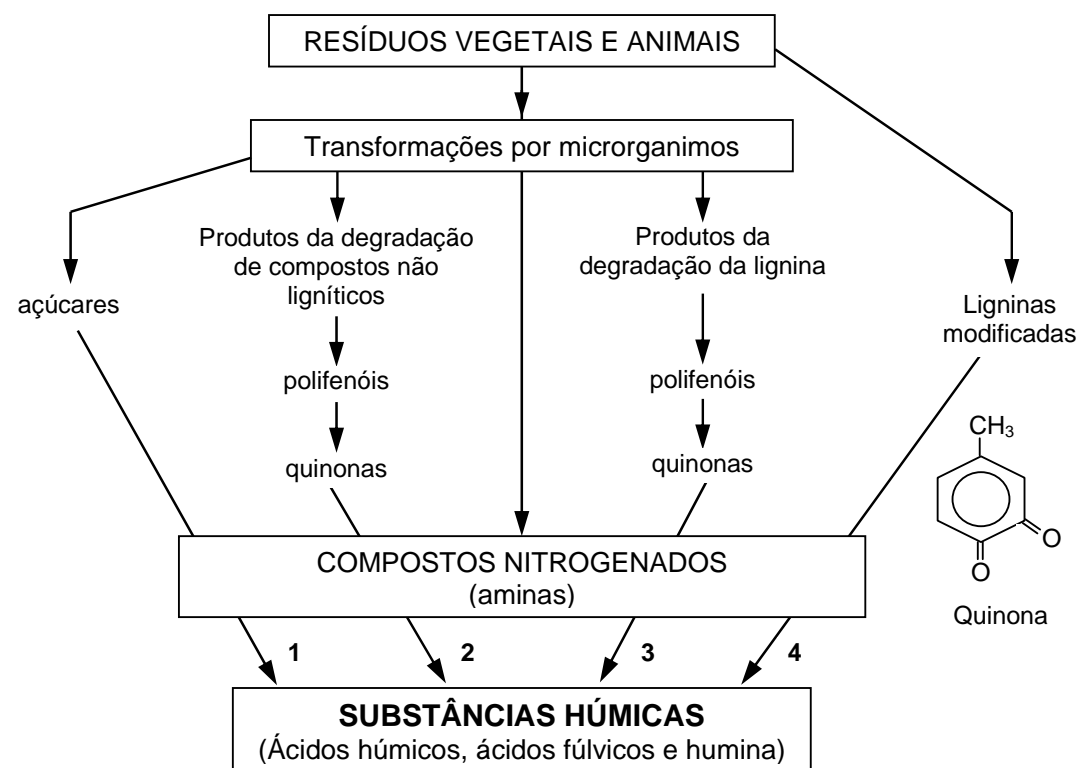


Figura 1.1. Mecanismos de formação das substâncias húmicas. Compostos nitrogenados sintetizados por microrganismos reagem com ligninas modificadas (via 4), quinonas (vias 2 e 3) e açúcares reduzidos (via 1) para formar polímeros complexos de cor escura (adaptado de Stevenson, 1994). Em destaque a estrutura química da quinona.

A retenção do C é conseqüência do balanço positivo entre os fatores de entrada (adição) e de saída (oxidação) deste no solo. Culturas que adicionam altas quantidades de resíduos apresentam maior potencial de adição de carbono e, por conseguinte, maior acúmulo deste no solo. As gramíneas, geralmente, produzem mais fitomassa que as leguminosas. Entretanto,

trabalhos mostram que, em determinadas condições, esta produção pode ser equivalente. Fiorin et al. (1998), trabalhando com plantas de cobertura de inverno, encontraram produções semelhantes em 1995/96 e 1996/97, entre a gramínea aveia preta e as leguminosas ervilhaca e tremoço. Interessante ressaltar que nos dois anos agrícolas, o consórcio aveia preta e ervilhaca superou as culturas isoladas em produção de matéria seca. As leguminosas apresentam a vantagem da fixação biológica de nitrogênio atmosférico, quando em simbiose com bactérias conhecidas como rizóbios. Ao mesmo tempo, podem fornecer este nutriente para o sistema solo e as culturas subsequentes. Assim, as culturas subsequentes terão maior potencial de produção de fitomassa, adicionando também mais C ao sistema.

Nas condições de clima subtropical do sul do Brasil, sistemas de manejo adequados à conservação do solo e produtividade das culturas devem ter como objetivo a cobertura do solo por culturas ou seus resíduos (Debarba & Amado, 1997; Bayer et al., 2000). Segundo Bayer et al. (2000), nesta região, experimentos de longa duração têm demonstrado que o plantio direto e sistemas de culturas com alto aporte de resíduos resultam num aumento dos estoques de carbono orgânico do solo.

Para Bayer & Mielniczuk (1999), a conservação (recuperação) da fração orgânica do solo, depende, entre outros fatores, de sistemas de culturas que incluam plantas leguminosas e culturas com alta produção de resíduos vegetais, como as gramíneas.

1.2.1 Hipótese

As adições de C e N ao solo são afetadas pelos sistemas de culturas e preparo de solo.

1.2.2 Objetivos

Avaliar a adição de resíduos culturais por sistemas de rotação de culturas, inseridas em sistemas de preparo do solo e, conseqüentemente, a entrada de carbono no solo.

1.3 MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1 Condições experimentais

Como base experimental foi utilizada área localizada na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. A FUNDACEP localiza-se na região do Planalto Médio do RS (Rio Grande do Sul, 1994), à latitude de 28°36' Sul, longitude de 53°40' Oeste e altitude média de 409 m. O solo ocorrente é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com predomínio de caulinita e óxidos de ferro (Streck et al., 2002). Entre os óxidos de ferro, a hematita está presente em maior proporção do que a goethita, conferindo cor avermelhada ao solo (Inda Jr. et al., 2004).

O local do estudo tem clima subtropical úmido, tipo Cfa 2a, segundo a classificação climática de Köeppen (Moreno, 1961). A precipitação média anual de 1.774 mm (média do período de 1974 a 2003 – dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP), com chuvas distribuídas uniformemente durante o ano, na média dos 29 anos, mas com ocorrência de períodos de estiagem em determinados anos (Apêndice 1.1). O mês mais quente do ano é janeiro, com a máxima normal de 30°C, e em julho ocorre o maior frio, com a mínima normal de 8,6°C (Moreno, 1961). A ocorrência freqüente de períodos de estiagem associada as altas temperaturas, que ocasionam maior evapotranspiração, tornam o meses de verão, dezembro, janeiro, fevereiro, os mais críticos quando a umidade do solo e, conseqüentemente, fornecimento de água para as culturas, em áreas não irrigadas. Nestas áreas as culturas de verão, milho e principalmente soja, são as principais culturas econômicas do Rio Grande do Sul.

Este trabalho utilizou parcelas constituintes do experimento "Influência do preparo do solo e da rotação de culturas sobre o rendimento e a rentabilidade das culturas", instalado em 1985 (Ruedell, 1995). A área do experimento apresenta declividade média de 4,7%.

Anteriormente, a área vinha sendo utilizada no preparo convencional há

aproximadamente 30 anos, principalmente com a cultura do trigo e posteriormente com a sucessão trigo/soja. Possivelmente, nos primeiros 15 anos de preparo convencional, a resteva de trigo era queimada, com o objetivo de eliminar os restos culturais e facilitar a semeadura da próxima cultura. Após a aquisição da área pela atual FUNDACEP em 1971, esta prática não foi mais realizada (José Ruedell, informação pessoal).

Na implantação o solo apresentava, na camada de 0-20 cm, 570 g kg⁻¹ de argila, 120 g kg⁻¹ de silte, 310 g kg⁻¹ de areia, 32 g kg⁻¹ de matéria orgânica, pH em água 4,5, P 19 mg dm⁻³, K 82 mg dm⁻³, Al 12 mmol_c dm⁻³ e Ca + Mg 42 mmol_c dm⁻³. Os métodos de análise utilizados foram baseados em Tedesco et al., 1995. Para P e K foi utilizado extrator Mehlich 1 e, leitura em espectrofotômetro a 660 nm para P e fotômetro de chama para K. A matéria orgânica foi determinada por solução sulfocrômica e leitura em espectrofotômetro a 645 nm. Análises realizadas em 2004, determinaram 63,5 g kg⁻¹ de Fe de óxidos, extraído por DCB (Jackson Fiorin, informação pessoal). Antes da instalação do experimento, foram aplicadas 5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico com 70% de PRNT, incorporado por uma gradagem pesada, a 12 cm, seguido de uma operação de gradagem niveladora (leve), a 8 cm de profundidade.

Este experimento consiste de dois métodos de preparo de solo, convencional (PC) e plantio direto (PD), combinados com três diferentes sistemas de rotação de culturas. As parcelas principais medem 40 x 60 m (2.400 m²) (Figura 1.2).

Os métodos de preparo do solo foram: a) convencional, consistindo de grade pesada ou arado de discos seguido de grade leve; b) plantio direto, com o estabelecimento de culturas diretamente através dos resíduos culturais remanescentes sobre a superfície do solo. Para este trabalho, foram escolhidos os sistemas de rotação de culturas R0, R1-3 (que passou a ser R2) e R2 (que passou a ser R1), sendo: monocultura de inverno e verão trigo/soja (R0); rotação de inverno e monocultura de verão aveia/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2), em cada sistema de preparo do solo. Esta nova denominação/

classificação (R0, R1 e R2) baseou-se na ordem crescente do uso da rotação de culturas. Os sistemas de culturas são sistemas comerciais possíveis de serem utilizados por agricultores da região.

No convencional os preparos do solo foram realizados duas vezes por ano, antes das culturas de verão e antes das culturas de inverno, totalizando 38 preparos em 19 anos. Na rotação R1, antes do quarto ano ou segundo ciclo da rotação (1988) era utilizado dois anos aveia e um ano com trigo. A partir do ano 1994, as parcelas foram divididas e se incorporou os tratamentos de utilização de fertilizante fosfatado solúvel e natural, além de tratamentos com e sem aplicação de calcário dolomítico. A partir do ano 1995, a divisão do fertilizante fosfatado foi re-dividida em três partes ficando a parte interna sem adubação fosfatada. O nabo forrageiro começou a ser utilizado após milho e antes do trigo a partir de 1996.

Maiores detalhes quanto a outros aspectos de manejo do experimento foram descritos por Ruedell (1995) e Campos et al. (1995).

As análises deste trabalho se restringiram aos tratamentos com fósforo solúvel e com calcário, nos dois sistemas de preparo de solo (convencional e plantio direto) (Figura 1.2), por serem os mais representativos de sistemas usualmente empregados por agricultores da região do Planalto Sulriograndense. Desta forma, as parcelas deste estudo mediram 13,3 x 30 m (399 m²).

As culturas de trigo, soja e milho tiveram por objetivo a produção de grãos, enquanto, as culturas de aveia, nabo e o consórcio aveia + ervilhaca foram utilizadas como plantas de cobertura do solo (adubação verde).

1.3.2 Avaliações

1.3.2.1 Produção de fitomassa

Nos anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/00 e 2000, a fitomassa foi determinada pela coleta de resíduos de todas as culturas, com exceção do nabo forrageiro.

PREPARO CONVENCIONAL				PLANTIO DIRETO			
	P solúvel	Sem fósforo	P natural		P natural	Sem fósforo	P solúvel
Com calcário	X 1	20	21	Rotação 0	40	41	60 X
Sem calcário	2	19	22		39	42	59
Com calcário	3	18	23	Rotação 1-1	38	43	58
Sem calcário	4	17	24		37	44	57
<= estufa							
Com calcário	5	16	25	Rotação 1-2	36	45	56
Sem calcário	6	15	26		35	46	55
Com calcário	X 7	14	27	Rotação 1-3	34	47	54 X
Sem calcário	8	13	28		33	48	53
Com calcário	X 9	12	29	Rotação 2	32	49	52 X
Sem calcário	10	11	30		31	50	51

Legenda:

Sistemas de culturas

Rotação 0: Trigo/soja (R0)

Rotação 1-1: Trigo/soja/aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo

Rotação 1-2: Aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja/aveia/soja

Rotação 1-3: Aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2)

Rotação 2: Aveia/soja/trigo/soja (R1)

X = Parcelas em estudo.

Figura 1.2. Esquema de distribuição dos tratamentos a campo no experimento de sistemas de preparo do solo e culturas. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Legenda: do trabalho original (Ruedell, 1995) e entre parênteses a nova denominação utilizada neste estudo.

Em cada parcela selecionada, antes dos procedimentos de dessecação e/ou da rolagem (passagem do rolo-faca), no plantio direto, e de gradagens, no preparo convencional, foram coletados quatro amostras de 1 m² de resíduos da parte aérea dos vegetais. Este material foi seco em estufa (60°C até peso constante) para determinação da matéria seca.

Nos demais anos, a produção de fitomassa das culturas comerciais (soja, milho e trigo) foi estimada pelo índice de colheita aparente (Debarba, 2002). O índice de colheita aparente representa a relação entre o rendimento de grãos e o rendimento da parte aérea da cultura, através da seguinte equação:

$$IC = \frac{P}{(PA + P)}, \quad \text{isolando-se PA, temos: } PA = \left(\frac{P}{IC} \right) - P$$

onde:

IC = índice de colheita;

P = produtividade de grãos (Mg ha⁻¹);

PA = produtividade de fitomassa da parte aérea.

Utilizaram-se os índices de colheita aparente de 0,35 para soja e 0,40 para trigo e milho (Debarba, 2002).

O ano agrícola 1987/86 não foi considerado devido a ser início do trabalho e os dados de produtividades, utilizados na estimativa do índice de colheita, apresentarem alta variação. Nos anos agrícolas de 1994/95 a 1997/98 não houve a coleta dos dados de produtividade, impossibilitando a estimativa da adição de fitomassa pelo índice de colheita aparente.

Para a aveia e o consórcio aveia + ervilhaca, foram utilizados os valores obtidos em 1998 e 2000 e por Ruedell (não publicado) de 1995 a 1997 e a média destes valores para os demais anos (Tabela 1.1).

Para o nabo forrageiro foi utilizada a média dos valores obtidos por Bianchi et al. (1997) e Fiorin et al. (1998) no mesmo período de cultivo e em áreas próximas ao experimento (Tabela 1.2).

Sobre os valores obtidos pela coleta de resíduos e estimado pelo IC foi acrescido 30% para contribuição do sistema radicular das culturas (Bayer,

1996). Este índice é bastante próximo ao obtido por Da Ros (2004), com uma relação de 31,4% do sistema radicular para a parte aérea na cultura da aveia preta.

Tabela 1.1. Produção de matéria seca da parte aérea da aveia e do consórcio aveia + ervilhaca, e estimativa do C adicionado considerando a concentração de C na matéria seca de 39,4% para aveia e 39,0% para aveia + ervilhaca.

Ano agrícola	Matéria seca		Carbono	
	PC ¹	PD	PC	PD
Mg ha ⁻¹				
Aveia				
1995 a 1997 ^{2,3}	4,76	4,98	1,88	1,96
1998 ⁴	5,39	7,65	2,13	3,02
2000 ³	4,44	4,64	1,75	1,83
Média	4,86	5,76	1,92	2,27
Aveia + ervilhaca				
1995 a 1997 ^{2,5}	4,55	4,69	1,78	1,83
1998 ⁵	5,80	6,85	2,26	2,67
2000 ⁶	4,73	5,58	1,85	2,18
Média	5,03	5,71	1,96	2,23

¹ PC = plantio convencional; PD = plantio direto. ² Fonte: Ruedell (dados não publicados).
³ Média das rotações R1 e R2. ⁴ Valor obtido na rotação R1. ⁵ Valor obtido na rotação R2.
⁶ Valor obtido na rotação R2-1, não utilizada neste trabalho.

Tabela 1.2. Produção de matéria seca da parte aérea do nabo forrageiro e estimativa do carbono adicionado, considerando a concentração de C na matéria seca de 34%.

Ano agrícola	Matéria seca	Carbono
	Mg ha ⁻¹	
1996 ¹	2,99	1,02
1998 ²	3,82	1,30
Média	3,41	1,16

Fonte: ¹ Bianchi et al. (1997) e ² Fiorin et al. (1998).

1.3.2.2 Cálculo da adição de carbono nos sistemas

Para as culturas produtoras de grãos trigo, soja e milho, nos anos agrícolas que foram realizadas as coletas de resíduos, o carbono foi determinado pela análise da concentração de carbono total no tecido, segundo método descrito por Tedesco et al. (1995). Nos demais anos, quando a fitomassa foi estimada pelo índice de colheita aparente, considerou-se em 40% a concentração de C no tecido.

Para a aveia e o consórcio aveia + ervilhaca foram utilizados as médias das concentrações de C obtidas em 1998 e 2000 de 39,4% para aveia e 39,0% para aveia + ervilhaca no cálculo do C no resíduo. Para os demais anos extrapolou-se a média destes dados (Tabela 1.1).

Para o nabo forrageiro foi utilizada concentração de C na matéria seca (34%) obtida por Bianchi et al. (1997) (Tabela 1.2).

A partir das estimativas das produções de fitomassa e concentrações de C no tecido foram calculadas as adições de C em cada sistema.

1.3.2.3 Cálculo da adição de nitrogênio nos sistemas

Na estimativa da adição N nos sistemas considerou-se a entrada de N mineral através da adubação mineral e da fixação biológica da simbiose entre bactérias e plantas leguminosas e, a saída de N através da colheita de grãos de soja, milho e trigo.

O balanço do N pelas culturas de trigo e milho foi calculado com base na adição pela adubação nitrogenada subtraindo-se a exportação de N pelo grão. De acordo com Ruedell (1995), a adubação nitrogenada utilizada nas culturas de trigo e milho foi de 12,5 e 60 kg ha⁻¹ de N na semeadura e em cobertura, respectivamente. Parte do N aplicado através da adubação nitrogenada pode ser perdida por volatilização ou por lixiviação para camadas mais profundas do solo (Alvez et al., 2006). Considerando a taxa de aproveitamento da adubação nitrogenada em 70% (Alvez et al., 2006), dos 72,5 kg ha⁻¹ de N aplicados nas culturas de trigo e milho, 50,8 kg ha⁻¹ ficaram no sistema solo-planta.

Considerou-se o teor médio de N nos grãos de trigo em 22 g kg^{-1} (2,2%) e de milho em 16 g kg^{-1} (SBCS, 2004).

A estimativa da adição de N pela fixação biológica de nitrogênio atmosférico (FBN) da soja seguiu o mesmo raciocínio da estimativa de adição de C pela cultura. O cálculo foi realizado pela média de produção de matéria seca da parte aérea, acrescido de 30% referente a contribuição do sistema radicular (raízes + exsudatos) (Bayer, 1996) e, o teor média de N obtido na safra 1998/99, pelo método de Tesdesco et al. (1995), de $17,5 \text{ g kg}^{-1}$ (1,75%). Considerou-se que 78% do N obtido pela cultura foi proveniente da fixação biológica (Vargas & Hungria, 1997).

Na estimativa da adição pela fixação biológica da ervilhaca em consorciação com aveia preta, considerou-se as produções de matéria seca da parte aérea obtidos neste experimento por Ruedell (1995) nos anos de 1985 a 1987, e em parcelas não apresentadas neste trabalho (1999 e 2000), acrescidos de 30% referentes à contribuição do sistema radicular (Tabela 1.3). A composição do consórcio foi considerada em 50% para cada cultura. Considerou-se teor de nitrogênio da ervilhaca em 30 g kg^{-1} (3%) (Fiorin et al., 1998) e 76% do N pela contribuição da FBN, de acordo com resultados obtidos por Jantalia (2005), neste experimento.

Tabela 1.3. Produção de fitomassa do consórcio aveia + ervilhaca e estimativas do N no tecido vegetal da ervilhaca, considerando a proporção de 50% de cada cultura e teor de N da ervilhaca em 3% e, do N adicionado pela fixação biológica de nitrogênio pela ervilhaca.

Ano agrícola	Matéria seca ¹		N no tecido		N adicionado ²	
	PC ³	PD	PC	PD	PC	PD
	Mg ha ⁻¹					
1995 a 1997 ⁴	5,92	6,10	0,089	0,091	0,067	0,069
1999	7,54	8,91	0,113	0,134	0,086	0,102
2000	6,15	7,25	0,092	0,109	0,070	0,083
Média	6,54	7,42	0,098	0,111	0,074	0,085

¹ Matéria seca da parte aérea acrescido de 30% referente a contribuição do sistema radicular. ² N adicionado pela fixação biológica considerando em 76% (Jantalia, 2005) proveniente da FBN. ³ PC = plantio convencional; PD = plantio direto. ⁴ Fonte: Ruedell, 1995.

1.3.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, com uso do programa computacional SAS (SAS, 1996). A normalidade dos dados foi verificada através do teste Shapiro-Wilk para o resíduo, considerando 10% de probabilidade, ou seja, abaixo deste valor o teste é significativo e os dados não seguem a distribuição normal. Para as causas de variação foi considerado 5% de significância e para as interações 10% pelo teste F. Para valores iguais ou menores que estes, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste DMS também a 5% de probabilidade do erro.

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.4.1 Adição de matéria seca e carbono

As produções de matéria seca e C pelas culturas nos diferentes sistemas, obtidas pela coleta de resíduos vegetais em cada período de cultivo, nos anos agrícolas de 1998/99, 1999, 1999/00 e 2000, encontram-se na Tabela 1.4. Na Tabela 1.5 encontram-se as adições anuais considerando os cultivos de verão e inverno 1998/99 e 1999 e, 1999/00 e 2000. A estes dados coletados foram acrescidos 30% (Bayer, 1996) referentes a estimativa da contribuição do sistema radicular das culturas.

No ano agrícola 1998/99, a cultura do milho, na rotação R2, incrementou em aproximadamente 85% o aporte de resíduos vegetais e C em relação à cultura da soja (rotações R0 e R1), destacando a sua importância quanto à adição de biomassa (Lovato et al., 2004). O PD, na média das rotações, apresentou aproximadamente 33% de aumento no aporte de resíduos vegetais e 32% de C em relação ao PC no verão (1998/99). No inverno (1999), este incremento foi de 54%. Neste inverno, não houve diferença estatística para a cultura do trigo nas diferentes rotações. Entretanto, esta cultura produziu mais de 40% de massa vegetal e C, em ambos os sistemas de preparo, após nabo (rotação R2) que na monocultura soja/trigo (R0).

Tabela 1.4. Produção de matéria seca e carbono em diferentes sistemas de rotação de culturas, nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, nos anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/2000 e 2000 e a médias destes anos agrícolas.

Rotação de Culturas ¹	Matéria seca ³			Adição de carbono ³		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média
Mg ha ⁻¹						
Ano agrícola 1998/99						
R0 (soja)	4,21	4,72	4,46 b	1,46	1,90	1,68 b
R1 (soja)	3,76	4,62	4,19 b	1,33	1,83	1,59 b
R2 (milho)	7,16	8,83	8,00 a	2,73	3,52	3,13 a
Média	4,49 B ⁴	6,06 A		1,83 B	2,42 A	
Ano agrícola 1999						
R0 (trigo)	1,98	2,98	2,47	0,79	1,20	1,00
R1 (trigo)	2,43	3,91	3,17	0,96	1,55	1,26
R2 (nabo/trigo) ⁵	2,85	4,30	3,58	1,12	1,66	1,39
Média	2,42 B	3,73 A		0,96 B	1,47 A	
Ano agrícola 1999/00						
R0 (soja)	4,72 Aab	5,23 Ab	4,98	1,89 Aab	2,02 Ab	1,95
R1 (soja)	4,36 Bb	6,72 Aa	5,54	1,72 Bb	2,64 Aa	2,17
R2 (soja)	5,34 Ba	6,25 Aa	5,80	2,07 Ba	2,43 Aa	2,25
Média	4,81	6,07		1,90	2,35	
Ano agrícola 2000						
R0 (trigo)	2,80 Bc	4,15 Ab	3,47	1,12 Bc	1,66 Ab	1,39
R1 (aveia)	4,41 Bb	5,50 Aa	4,95	1,82 Bb	2,28 Aa	2,05
R2 (aveia)	5,79 Aa	5,39 Aa	5,58	2,39 Aa	2,22 Aa	2,31
Média	4,33	5,01		1,78	2,05	
Média dos anos agrícolas 1998/99 a 2000						
R0	3,43	4,27	3,85 b	1,32	1,70	1,51 b
R1	3,74	5,19	4,46 b	1,46	2,08	1,77 b
R2	5,29	6,19	5,74 a	2,08	2,46	2,27 a
Média	4,15 B	5,22 A		1,62 B	2,08 A	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e, R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Acrescido 30% (Bayer, 1996) para contribuição do sistema radicular das culturas. ⁴ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, para sistemas de preparo, e minúsculas na coluna, para rotações, não diferem pelo teste DMS a 5% de significância. ⁵ Os dados apresentados referem-se somente à cultura do trigo.

Em 1999/00, houve interação entre as rotações e os sistemas de

preparo. Sob monocultura (R0), a soja em PD produziu estaticamente a mesma quantidade de matéria seca e C que no PC, mas foi superior nas rotações R1 e R2.

Tabela 1.5. Adição anual de matéria seca e carbono em diferentes sistemas de rotação de culturas, nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, considerando o somatório dos anos agrícolas 1998/99 e 1999 e, 1999/00 e 2000 e a médias destes somatórios.

Rotação de culturas ¹	Matéria seca ³			Adição de carbono ³		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média
Mg ha ⁻¹						
Anos agrícolas 1998/99 e 1999						
R0 (soja/trigo)	6,19	7,68	6,94	2,25	3,09	2,68
R1 (soja/trigo)	6,01	8,53	7,27	2,29	3,38	2,83
R2 (milho/nabo/trigo)	11,93	16,54	14,18	5,00	6,34	5,67
Média	8,04	10,92		3,18	4,27	
Anos agrícolas 1999/00 e 2000						
R0 (soja/trigo)	7,51	9,37	8,44	3,02	3,68	3,34
R1 (soja/aveia)	8,76	12,22	10,49	3,55	4,91	4,23
R2 (soja/aveia)	11,12	11,64	11,38	4,47	4,65	4,56
Média	9,14	11,08		3,68	4,41	
Média anual dos anos agrícolas						
R0	6,85	8,53	7,70	2,63	3,38	3,00
R1	7,38	10,37	8,88	2,91	4,15	3,54
R2	11,56	14,12	12,78	4,74	5,50	5,12
Média	8,60	11,01		3,43	4,34	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e, R2 = aveia /soja/aveia+ervilhaca/milho /nabo/trigo/soja. Os resíduos vegetais referem-se as culturas entre parênteses. ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Acrescido 30% (Bayer, 1996) para contribuição do sistema radicular das culturas. ⁴ Para o nabo utilizou-se a média dos dados de Bianchi et al. (1997) e Fiorin et al (1998).

A rotação R2 foi superior a R1, no convencional e a R0 no PD, nestas produções de matéria seca e C. Neste verão (1999/00), as culturas em PD incrementaram em 25% o aporte resíduos e carbono em relação às culturas em PC e, no inverno (2000) este incremento foi de 16%, entretanto, não havendo

diferença estatística em ambas as épocas. No inverno de 2000, novamente houve interação, com o PD superando o PC em matéria seca e carbono, na monocultura R0 e na rotação R2. As rotações superaram a monocultura em ambos os sistemas de preparo do solo. Entre as culturas, a aveia preta incorporou 52% mais massa vegetal e 57% mais C que o trigo, neste inverno (2000). Neste trabalho a aveia preta foi utilizada somente como planta de cobertura do solo, sendo manejada no pleno florescimento, ponto máximo de produção de fitomassa.

Na média dos anos agrícolas e sistemas de culturas, as culturas em PD adicionaram aproximadamente 30% mais resíduos vegetais e carbono do que as culturas em PC. A rotação intensiva (R2), na média de dois anos e dois sistemas de preparo, aumentou em 47% o aporte de massa vegetal e C em relação a monocultura (R0). Nestes anos, a rotação somente de inverno (R1) não incrementou o aporte de massa vegetal e carbono em relação a monocultura (R0).

A época de coleta dos resíduos após a colheita pode subestimar o fornecimento de fitomassa pela cultura da soja, pois nesta, as folhas caem ao solo anterior à colheita, as quais podem já entrar em processo de decomposição, não sendo coletadas e consideradas na adição de carbono, processo este que não ocorre no milho.

A seqüência de culturas milho/nabo/trigo no plantio direto (PD R2) adicionou maior quantidade de resíduos vegetais ($16,54 \text{ Mg ha}^{-1}$) e carbono ($6,34 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Tabela 1.5).

Os maiores valores de adição anual de carbono ocorreram na rotação R2 (milho/nabo/trigo/soja/aveia), sendo intermediário na rotação R1 (soja/trigo/soja/aveia), e inferiores na sucessão R0 (soja/trigo/soja/trigo), em ambos os sistemas de preparo do solo, considerando os dois períodos avaliados. As culturas em PD, em média ($4,34 \text{ Mg ha}^{-1}$), adicionaram 27% mais C ao solo, que em PC ($3,43 \text{ Mg ha}^{-1}$). Na média dos sistemas de preparo, a rotação R2 ($5,12 \text{ Mg ha}^{-1}$), forneceu 71% mais C que a monocultura R0 ($3,00 \text{ Mg ha}^{-1}$). Comparando os tratamentos, com maior diferença na adição de carbono, verificou-se que o plantio direto incluindo milho na rotação (PD R2 –

5,50 Mg ha⁻¹) adicionou 109% mais C que o preparo convencional sem rotação (PC R0 – 2,63 Mg ha⁻¹). Assim, as oportunidades de incremento de C ao solo pela fotossíntese seriam de 28% via modificação no sistema de preparo, 71% via modificação no sistema de culturas e, 109% na combinação dos dois sistemas.

Os valores de C orgânico obtidos pela coleta de resíduos a campo e estimados pelo índice de colheita (Debarba, 2002) foram bastante semelhantes (Tabela 1.6), com coeficiente de determinação elevado (0,89) (Figura 1.3), indicando que esta estimativa pode ser utilizada com confiabilidade para os demais anos que não foram realizadas coletas de resíduos vegetais.

Tabela 1.6. Comparação dos valores obtidos de carbono pela coleta de resíduos vegetais (CR) e estimados pelo índice de colheita (IC) nos anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/00 e 2000.

Sistema de Culturas ¹	Carbono orgânico total ³					
	Coleta de resíduos		Índice de colheita		Diferença (CR – IC)	
	PC ²	PD	PC	PD	PC	PD
	Mg ha ⁻¹					
	Ano agrícola 1998/99					
R0 (soja)	1,46	1,90	1,20	1,89	0,26	0,01
R1 (soja)	1,33	1,83	1,18	1,59	0,14	0,25
R2 (milho)	2,73	3,52	2,96	3,17	-0,23	0,35
	Ano agrícola 1999					
R0 (trigo)	0,79	1,20	0,87	0,98	-0,08	0,22
R1 (trigo)	0,96	1,55	1,07	1,27	-0,10	0,27
R2 (nabo/trigo) ⁴	1,12	1,66	1,16	1,33	-0,04	0,34
	Ano agrícola 1999/00					
R0 (soja)	1,89	2,02	1,89	2,48	0,00	-0,47
R1 (soja)	1,72	2,64	1,64	3,08	0,08	-0,44
R2 (soja)	2,07	2,43	2,13	2,89	-0,07	-0,46

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e, R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/ milho/nabo/trigo/soja. Os resíduos vegetais referem-se as culturas entre parênteses. ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Acrescido 30% (Bayer, 1996) para contribuição do sistema radicular das culturas. ⁴ Nesta avaliação não foi considerada a cultura do nabo, na seqüência milho/nabo/trigo.

Nas Tabelas 1.7 e 1.8 são apresentadas as adições anuais de C dos sistemas de rotação de culturas, conduzidos nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, respectivamente, considerando-se os dados obtidos neste trabalho pela coleta de resíduos nos anos agrícolas 1998/99, 1999, 1999/2000 e 2000 (Tabelas 1.4 e 1.5), a estimativa pelo índice de colheita para as culturas produtoras de grãos (trigo, soja e milho) nos demais anos e dados de outros autores no mesmo experimento ou em experimentos próximos a este.

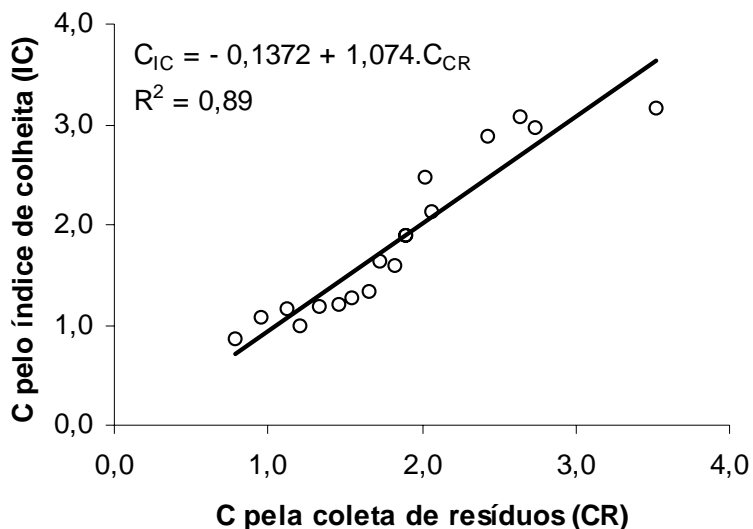


Figura 1.3. Relação entre o C determinado pela coleta de resíduos vegetais (CR) e o estimado pelo índice de colheita (IC).

Verifica-se que a rotação R2 (aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja) apresentou as maiores adições de C em ambos os sistemas de preparo do solo, com $5,34 \text{ Mg ha}^{-1}$ no PC e $6,20 \text{ Mg ha}^{-1}$ no PD, na média dos anos avaliados. A rotação R1 (aveia/soja/trigo/soja) apresentou adição intermediária. A monocultura R0 (trigo/soja) adicionou ao solo as menores quantidades de C.

Tabela 1.7. Adições anuais de C pelos sistemas de culturas sob preparo convencional, nos anos agrícolas 1985/86 a 2003/04.

Ano agrícola	Rotação R0			Rotação R1			Rotação R2							
	Trigo	Soja	Total	Aveia ⁴	Trigo	Soja	Total	Aveia ⁴	Aveia+erv. ⁴	Nabo ⁵	Trigo	Soja	Milho	Total
	Mg ha ⁻¹													
1985/86	nc ¹	nc	nc	nc	-	nc	nc	nc	-	-	-	nc	-	nc
1986/87	1,28	3,05	4,33	2,50	-	3,03	5,52	-	2,55	-	-	-	4,57	7,12
1987/88	0,98	1,25	2,22	-	1,81	1,15	2,96	-	-	-	1,63	1,20	-	2,83
1988/89	1,69	3,01	4,70	2,50	-	2,78	5,28	2,50	-	-	-	3,07	-	5,56
1989/90	1,63	3,70	5,32	-	1,92	3,29	5,22	-	2,55	-	-	-	3,73	6,28
1990/91	0,89	1,07	1,95	2,50	-	0,98	3,48	-	-	-	1,39	1,33	-	2,72
1991/92	1,63	3,84	5,47	-	2,07	3,76	5,83	2,50	-	-	-	3,99	-	6,49
1992/93	1,57	3,54	5,11	2,50	-	2,53	5,02	-	2,55	-	-	-	6,34	8,89
1993/94	1,17	2,15	3,32	-	1,50	2,10	3,59	-	-	-	1,88	2,44	-	4,32
1994/95	dnc ²	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	dnc	-	-	-	dnc	-	dnc
1995/96	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	dnc	-	dnc	-	-	-	dnc	dnc
1996/97	dnc	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	-	-	-	dnc	dnc	-	dnc
1997/98	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	dnc	dnc	-	-	-	dnc	-	dnc
1998/99	0,86	1,68	2,55	2,77	-	1,33	4,09	-	2,94	-	-	-	2,73	5,67
1999/00	0,79	1,89	2,68	-	0,96	1,72	2,68	-	-	1,51	1,12	2,07	-	4,69
2000/01	1,12	2,42	3,54	1,82	-	3,02	4,84	2,39	-	-	-	3,25	-	5,64
2001/02	1,55	1,88	3,44	-	1,56	1,98	3,53	-	2,55	-	-	-	2,19	4,74
2002/03	0,75	3,28	4,03	2,50	-	3,22	5,72	-	-	1,51	1,02	3,31	-	5,84
2003/04	1,71	1,42	3,13	-	2,70	1,52	4,22	2,50	-	-	-	1,45	-	3,95
Média	1,26	2,44	3,70	2,44	1,79	2,31	4,43	2,47	2,63	1,51	1,41	2,46	3,91	5,34

¹ nc = não consideradas, por ser início do trabalho e por apresentarem alta variação. ² dnc = dados não coletados. ³ Nos anos agrícolas 1998/99 (soja e milho), 1999 (trigo) e 1999/00 (soja) e 2000 (trigo) o C foi determinado pela coleta de resíduos, nos demais anos foi estimado pelo índice de colheita (IC).

⁴ Para a aveia e o consórcio aveia + ervilhaca, foram utilizados os valores obtidos em 1998 e 1999 e por Ruedell (não publicado) de 1995 a 1997 e a média destes valores para os demais anos. ⁵ Para o nabo forrageiro foi utilizado a média dos valores obtidos por Bianchi et al. (1997) e Fiorin et al. (1998) no mesmo período de cultivo e na mesma área experimental. Os dados foram acrescidos em 30% (Bayer, 1996) referentes a contribuição do sistema radicular.

Tabela 1.8. Adições anuais de C pelos sistemas de culturas sob plantio direto, nos anos agrícolas 1985/86 a 2003/04.

Ano agrícola	Rotação R0			Rotação R1			Rotação R2							
	Trigo	Soja	Total	Aveia ⁴	Trigo	Soja	Total	Aveia ⁴	Aveia+erv. ⁴	Nabo ⁵	Trigo	Soja	Milho	Total
	Mg ha ⁻¹													
1985/86	nc ¹	nc	nc	-	-	nc	nc	nc	-	-	-	nc	-	-
1986/87	1,17	3,36	4,53	2,95	-	2,96	5,91	-	2,89	-	-	-	4,79	7,69
1987/88	1,57	1,39	2,96	-	1,97	1,26	3,23	-	-	-	1,94	1,77	-	3,72
1988/89	1,99	3,07	5,06	2,95	-	2,96	5,91	2,95	-	-	-	3,12	-	6,07
1989/90	1,56	3,60	5,15	-	2,00	3,40	5,40	-	2,89	-	-	-	4,65	7,55
1990/91	0,76	1,10	1,86	2,95	-	0,97	3,92	-	-	-	1,41	1,82	-	3,23
1991/92	1,53	3,54	5,07	-	1,89	3,49	5,39	2,95	-	-	-	4,19	-	7,14
1992/93	1,71	3,44	5,15	2,95	-	3,17	6,12	-	2,89	-	-	-	7,24	10,14
1993/94	1,21	2,30	3,50	-	1,61	2,25	3,86	-	-	-	1,93	2,65	-	4,58
1994/95	dnc ²	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	dnc	-	-	-	dnc	-	dnc
1995/96	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	dnc	-	dnc	-	-	-	dnc	dnc
1996/97	dnc	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	-	-	-	dnc	dnc	-	dnc
1997/98	dnc	dnc	dnc	-	dnc	dnc	dnc	dnc	-	-	-	dnc	-	dnc
1998/99	0,96	1,90	2,86	3,92	-	1,83	5,75	-	3,47	-	-	-	3,52	7,00
1999/00	1,20	2,02	3,21	-	1,55	2,64	4,19	-	-	1,51	1,66	2,43	-	5,60
2000/01	1,66	3,46	5,12	2,28	-	3,24	5,52	2,22	-	-	-	3,38	-	5,60
2001/02	1,90	2,20	4,10	-	2,86	2,66	5,52	-	2,89	-	-	-	4,39	7,29
2002/03	0,59	3,59	4,18	2,95	-	3,70	6,65	-	-	1,51	1,21	3,68	-	6,40
2003/04	1,79	1,82	3,61	-	2,38	1,91	4,29	2,95	-	-	-	1,86	-	4,81
Média	1,40	2,63	4,03	2,99	2,04	2,60	5,12	2,77	3,01	1,51	1,63	2,77	4,92	6,20

¹ nc = não consideradas, por ser início do trabalho e por apresentarem alta variação. ² dnc = dados não coletados. ³ Nos anos agrícolas 1998/99 (soja e milho), 1999 (trigo) e 1999/00 (soja) e 2000 (trigo) o C foi determinado pela coleta de resíduos, nos demais anos foi estimado pelo índice de colheita (IC).

⁴ Para a aveia e o consórcio aveia + ervilhaca, foram utilizados os valores obtidos em 1998 e 1999 e por Ruedell (não publicado) de 1995 a 1997 e a média destes valores para os demais anos. ⁵ Para o nabo forrageiro foi utilizado a média dos valores obtidos por Bianchi et al. (1997) e Fiorin et al. (1998) no mesmo período de cultivo e na mesma área experimental. Os dados foram acrescidos em 30% (Bayer, 1996) referentes a contribuição do sistema radicular.

A maior adição de C da rotação R2, pode ser atribuída, principalmente, à cultura do milho, com adição anual média de 3,91 e 4,92 Mg ha⁻¹ de C no PC e PD, respectivamente, correspondendo a 59 e 78% a mais que a soja no mesmo sistema. Nesta rotação também há contribuição da aveia e do consórcio aveia + ervilhaca, utilizadas como plantas de cobertura. O nabo forrageiro, apesar da menor adição de C (1,51 Mg ha⁻¹) contribui para o somatório anual, num período que não interfere no cultivo das demais culturas. Além disto, esta cultura contribui para maior produtividade de grãos de trigo (Bianchi et al., 1997; Fiorin et al., 1998), e conseqüentemente, na maior adição de C pelo trigo. Entretanto, a cultura do trigo nesta rotação apresentou, em média, menor adição de C que na rotação R1, o que pode ter ocorrido devido as diferentes condições climáticas enfrentadas pela cultura, pois os anos agrícolas não foram correspondentes. Destaca-se que o trigo nas rotações R1 e R2 apresentou adições de C maiores que quando cultivado em monocultura na rotação R0, com aumento de 28 e 31%, na média das rotações R1 e R2, no PC e PD, respectivamente. Neste sentido, o efeito da monocultura foi mais expressivo no trigo do que na soja, pois esta apresentou baixa amplitude de variação de adição de C, variando de 2,31 a 2,46 Mg ha⁻¹ no PC e de 2,61 a 2,77 Mg ha⁻¹ no PD, nos diferentes sistemas de rotação de culturas. Mesmo em monocultura (R0), a soja apresentou adições de C semelhantes a quando em rotação de culturas. Este aspecto pode estar relacionado, a maior suscetibilidade da cultura do trigo às doenças quando em monocultura.

Na análise da estimativa de fornecimento adição anual de C pelos resíduos vegetais em 19 anos de experimento (Tabelas 1.7 e 1.8), as culturas em PD, em média (5,12 Mg ha⁻¹), forneceram 14% mais C ao solo, que em PC (4,49 Mg ha⁻¹). Na média dos sistemas de preparo, a rotação R2 (5,77 Mg ha⁻¹), forneceu 49% mais C que a monocultura R0 (3,87 Mg ha⁻¹). Comparando os tratamentos, com maior diferença na adição de carbono, verificou-se que o plantio direto incluindo milho na rotação (PD R2 – 6,20 Mg ha⁻¹) adicionou 68% mais C que o preparo convencional sem rotação (PC R0 – 3,70 Mg ha⁻¹). Assim, na análise global, as oportunidades de incremento de C ao solo pela fotossíntese seriam de 14% via modificação no sistema de preparo, 49% via

modificação no sistema de culturas e, 68% na combinação dos dois sistemas. Estes percentuais são bem menores que os estimados pelos dados obtidos nas safras 1998/99 e 1999/00 (Tabela 1.4), mas com mesma tendência, indicando a maior importância da rotação de culturas de inverno e verão e da interação desta com o plantio direto.

Jantalia (2005), neste mesmo experimento, estimou a adição de C pelos resíduos vegetais em 4,7, 4,8, 6,5 e 6,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o PC R0, PD R0, PC R2 e PD R2, respectivamente. Estes valores variam de 11 a 22% maiores aos obtidos neste trabalho.

Os valores de adição anual média de C pelos resíduos encontrados neste trabalho foram ligeiramente superiores aos encontrados por Sisti et al. (2004), em experimento de longo prazo (13 anos) em Passo Fundo, RS. Os autores verificaram adição média anual de C pelos resíduos na rotação trigo/soja de 3,2 e 3,4 Mg C ha⁻¹ em PC e PD, respectivamente. Já a rotação trigo/soja/aveia/soja/ervilhaca/milho apresentou adições anuais médias de 4,3 e 4,5 Mg C ha⁻¹ em PC e PD, respectivamente.

Da Ros (2004) obteve em aveia preta a produção de 6,19 Mg ha⁻¹ de matéria seca e 2,45 Mg ha⁻¹ de C, considerando parte aérea e raízes, em PD em Argissolo Vermelho distrófico arênico. Estes valores são ligeiramente superiores em matéria seca aos obtidos neste trabalho, que variaram de 5,39 a 5,76 Mg ha⁻¹ em PD (Tabelas 1.4 e 1.1). Para C orgânico os valores foram semelhantes, pois para a aveia preta variaram de 2,44 a 2,47 Mg ha⁻¹ no PC e de 2,77 a 2,99 Mg ha⁻¹ no PD (Tabelas 1.7 e 1.8). Esta diferença de relação de matéria seca e C obtida nos dois trabalhos pode ser atribuída ao teor de C orgânico das raízes. Da Ros (2004) determinou que a parte aérea da aveia apresentava 41,6% de C e as raízes 33,1%, enquanto que neste trabalho foi atribuído 39,4% de C tanto para parte aérea quanto raízes. A adição de C pelo consórcio aveia + ervilhaca foi semelhante aos obtidos por Bayer et al. (1998) e Amado et al. (1999), em PD no Rio Grande do Sul.

Lovato et al. (2004), trabalhando com sistemas de monocultura de milho no verão e diferentes plantas de cobertura no inverno, encontrou adições anuais de C (4,11 a 8,14 Mg ha⁻¹) maiores que neste trabalho (3,70 a 6,20 Mg

ha⁻¹). Esta diferença pode ser atribuída à maior adição de C pelo milho em comparação às outras culturas e pelo uso da irrigação no trabalho de Lovato et al. (2004).

Ao longo dos anos, o milho apresentou variação de adição de C de 2,19 a 6,34 Mg ha⁻¹ no PC e 3,52 a 7,24 Mg ha⁻¹ no PD. Esta alta variação pode ser atribuída as diferentes condições climáticas entre os anos, principalmente, relacionadas à precipitação pluviométrica. Comparando-se as culturas produtoras de grãos no mesmo sistema de rotação (R2), verifica-se que a cultura do milho foi mais influenciada pelo sistema de preparo do solo, pois apresentou aumento de 26% no fornecimento de C quando em PD em relação ao PC, enquanto que a soja apresentou aumento de 13% e o trigo 16%. Este aumento pode estar relacionado a maior umidade do solo encontrado no PD (Capítulo II), associado a maior resposta do milho a esta condição, em relação a soja e ao trigo.

Bayer (1996), com base nos trabalhos de Merten (1988), estimou a adição média anual de carbono, pela sucessão trigo/soja, em aproximadamente 3,25 Mg ha⁻¹, semelhantes àquela obtida neste trabalho, de 3,87 Mg ha⁻¹, na média dos sistemas de preparo do solo e dos anos agrícolas.

De acordo com a média anual adicionada por cada cultura (Tabelas 1.7 e 1.8) e os anos de cultivo de cada cultura foi estimada a adição total de C nos diferentes sistemas de rotação em cada sistema de preparo, nos 19 anos de experimento (Tabela 1.9). Verifica-se que houve maior adição de C ao solo com aumento da intensidade da rotação de culturas e cultivo destas em PD. Jantalia (2005), estimou a adição de C pelos resíduos vegetais em 80, 82, 110 e 118 Mg ha⁻¹ para o PC R0, PC R2, PD R0 e PD R2, respectivamente, aos 17 anos deste experimento, valores 8, 14, 0 e 8% superiores aos obtidos neste trabalho aos 19 anos.

1.4.2 Adição de nitrogênio

A estimativa de adição de N nos sistemas de preparo e de rotação de culturas baseou-se na adição de N mineral de 72,5 kg ha⁻¹ nas culturas de trigo

e milho (Tabela 1.10) e na adição através da fixação biológica de N₂ (FBN) pelas culturas de soja, em todas as rotações (Tabela 1.11), e de ervilhaca na rotação R2 (Tabela 1.3).

Tabela 1.9. Adição média anual e total de carbono pelas culturas nos diferentes sistemas de rotação sob os preparos convencional e plantio direto, de acordo com os anos de cultivo em 19 anos de experimento (1985-2004).

Culturas	Anos de cultivo	Adição média anual		Adição total	
		PC ¹	PD	PC	PD
Mg ha ⁻¹					
Rotação R0 ²					
Trigo	19	1,26	1,40	23,94	26,60
Soja	19	2,44	2,63	46,36	49,97
Total				70,30	76,57
Rotação R1					
Aveia	10	2,44	2,99	24,40	29,90
Soja	10	2,41	2,69	24,10	26,90
Trigo	9	1,79	2,04	16,11	18,36
Soja	9	2,22	2,52	19,98	22,68
Total				84,59	97,84
Rotação R2					
Aveia	7	2,47	2,77	17,29	19,39
Soja	7	2,94	3,14	20,58	21,98
Aveia+ervilhaca	6	2,63	3,01	15,78	18,06
Milho	6	3,91	4,92	23,46	29,52
Nabo	3	1,51	1,51	4,53	4,53
Trigo	6	1,41	1,63	8,46	9,78
Soja	6	2,07	2,47	12,42	14,82
Total				102,52	118,08

¹ PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ² R0 = trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/ milho/nabo/trigo/soja.

Nos cereais produtores de grãos, o balanço de N variou de -5,6 a 15,0 kg ha⁻¹ no trigo e foram negativos no milho da rotação R2, em ambos os sistemas de preparo. Os balanços negativos ocorreram, provavelmente devido

à adubação nitrogenada não ter suprido a demanda de N pela maior exportação ocasionada pelas colheitas de grãos de trigo e milho. A adubação foi realizada sempre com a mesma dose de N, independente da produtividade e conseqüente exportação pelo grãos das culturas. Alvez et al. (2006), também verificaram balanço negativo de N na cultura do milho em $-23,6 \text{ kg ha}^{-1}$.

Tabela 1.10. Balanço da entrada de nitrogênio pela adubação nitrogenada e da saída pela exportação no grão nas culturas de trigo e milho nos sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional e plantio direto, média de 19 anos de experimento (1985-2004).

Cultura	N adicionado ¹		N exportado ²		N remanescente	
	PC ³	PD	PC	PD	PC	PD
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹						
Rotação R0 ⁴						
Trigo	50,8	50,8	35,7	37,3	15,0	13,5
Rotação R1						
Trigo	50,8	50,8	50,8	56,4	0,0	-5,6
Rotação R2						
Trigo	50,8	50,8	40,0	44,2	10,8	6,6
Milho	50,8	50,8	82,7	101,2	-31,9	-50,4

¹ N adicionado considerando taxa de aproveitamento de 70% (Alvez et al., 2006). ² N exportado = média de produtividade de grãos, considerando teor de N de 2,2% para o trigo e 1,6% para o milho (SBCS, 2004). ³ PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ⁴ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e, R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/ nabo/trigo/soja.

A adição de N pela FBN da cultura da soja foi positiva, variando de 71 a 107 kg ha⁻¹ ano⁻¹. As maiores adições ocorreram após a cultura da aveia preta do que após a cultura do trigo, nas rotações R1 e R2 e, no PD em relação ao PC. Não considerando a contribuição do sistema radicular, Alvez et al. (2006), verificaram entrada de N pela FBN em soja de 175,9 a 193,2 kg ha⁻¹ e saída pela colheita de grãos de 165,9 a 200,9 kg ha⁻¹, resultando num balanço de -7,7 a 10 kg ha⁻¹.

Tabela 1.11. Produção média de fitomassa e estimativa da adição de N pela fixação biológica de nitrogênio pela soja nos sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional e plantio direto, média de 19 anos de experimento (1985-2004).

Rotação ¹	Matéria seca ²		N no tecido		N adicionado ³	
	PC ⁴	PD	PC	PD	PC	PD
	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹			
R0 (trigo) ⁵	6,10	6,58	107	115	83	90
R1 (aveia)	6,09	6,73	107	118	83	92
R1 (trigo)	5,55	6,31	97	110	76	86
R2 (aveia)	7,35	7,85	129	137	100	107
R2 (trigo)	5,21	6,22	91	109	71	85
Média	6,06	6,74	106	118	83	92

¹ R0 = trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ² Matéria seca da parte aérea acrescido de 30% referente a contribuição do sistema radicular. ³ N adicionado pela fixação biológica = considerando em 78% o N do tecido vegetal proveniente da FBN. ⁴ PC = plantio convencional; PD = plantio direto. Entre parênteses, cultura antecessora a soja.

A estimativa de adição de N nos sistemas de preparo e de rotação de culturas por cultura no ciclo completo e anual são apresentadas na Tabela 1.12. A adição anual de N foi maior na sucessão trigo/soja (R0), seguido da rotação R1 e posteriormente da rotação R2. Estes resultados provavelmente são devidos a freqüência de entrada de N, na forma de adubação mineral e fixação biológica, que na sucessão trigo/soja ocorre em todos os cultivos. Para os sistemas de preparo, o aporte de N pelas culturas no PD foi maior que no PC, no total do ciclo completo e ciclo anual.

Jantalia (2005), no mesmo experimento, obteve alta variação no balanço de N adicionado pelas culturas. Em soja, esta variação foi de -139 a 189 kg ha⁻¹, enquanto neste trabalho a variação foi menor de 71 a 107 kg ha⁻¹.

Quanto à avaliação das quantidades de N adicionadas ao solo pelos sistemas de culturas depara-se com dificuldades maiores do que aquelas relativas às adições de C (Lovato et al., 2004). Segundo os autores, enquanto todo o C adicionado pela fitomassa vem do ar via fotossíntese, o N na fitomassa vem do solo, da fixação simbiótica e da adubação nitrogenada,

dificultando a separação do N reciclado, daquele realmente adicionado ao sistema.

Tabela 1.12. Nitrogênio adicionado nas culturas num ciclo de rotação completo e anualmente nos sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional e plantio direto.

Cultura	Ciclo completo		Ciclo anual	
	PC ¹	PD	PC	PD
	kg ha ⁻¹			
	Rotação R0 ²			
Trigo	15,0	13,5		
Soja	83,0	90,0		
Total	98,0	103,5	98,0	103,5
	Rotação R1			
Aveia	-	-		
Soja	83,0	92,0		
Trigo	0,0	-5,6		
Soja	76,0	86,0		
Total	159,0	172,4	79,5	86,2
	Rotação R2			
Aveia	-	-		
Soja	100,0	107,0		
Aveia+ervilhaca	74,0	85,0		
Milho	-31,9	-50,4		
Nabo	-	-		
Trigo	10,8	6,6		
Soja	71,0	85,0		
Total	223,8	233,2	74,6	77,7

¹ PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ² R0 = trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/ milho/nabo/trigo/soja.

As adições de N pela chuva e fixação assimbiótica normalmente não são consideradas (Lovato et al., 2004). A adição pela chuva é semelhante entre os tratamentos, devido às pequenas distâncias entre os mesmos. Entretanto, a adição via assimbiótica, principalmente em associações entre gramíneas e bactérias diazotróficas, pode ser expressiva (Döbereiner, 1992). Assim, a

adição de N nos sistemas que possuem a gramínea aveia preta, R1 e R2, pode ser subestimada pois não foi considerada a fixação assimbiótica. Salienta-se que as condições de cultivo da aveia são mais favoráveis a esta adição de N, do que as outras gramíneas trigo e milho, devido ao não uso de adubação nitrogenada, pois a fixação assimbiótica de N é inibida em presença de N mineral (Ruschel & Pontes, 1992).

1.4.3 Relações das adições de carbono e nitrogênio

Na Tabela 1.13. são apresentados os valores estimados da adição média de C e N pelas culturas nos sistemas de preparo convencional e plantio direto e, a relação C/N destas adições, considerando a média dos 19 anos de experimento. À medida que se intensificou a rotação de culturas houve aumento da relação C/N dos resíduos adicionados. Na média dos sistemas de preparo, esta relação foi 33 e 48% menor na rotação R0 do que R1 e R2, respectivamente. As culturas em PD apresentaram maior relação C/N que em PC.

Tabela 1.13. Carbono, nitrogênio e relação C/N das adições pelas culturas e adubação nitrogenada nos diferentes sistemas de rotação sob os preparos convencional e plantio direto, média de 19 anos de experimento (1985-2004).

Rotação de culturas ¹	C		N		Relação C/N	
	PC ²	PD	PC	PD	PC	PD
	Mg ha ⁻¹					
R0	3,700	4,030	0,098	0,103	37,7	39,1
R1	4,430	5,120	0,079	0,086	55,7	59,4
R2	5,340	6,200	0,076	0,079	70,3	78,4
Média	4,490	5,120	0,084	0,090	53,1	57,2

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/ soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto.

1.5 CONCLUSÕES

Os maiores valores de adição anual de C ocorreram na rotação de inverno e verão (R2 - aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja).

Os sistemas de culturas sob PD, forneceram mais C ao solo, que sob PC.

Os sistemas de rotação de culturas tiveram maior efeito na adição de C que os sistemas de preparo do solo.

A sucessão trigo/soja adicionou mais N ao solo do que as rotações de culturas.

A relação C/N das adições pelas culturas aumentou de acordo com a intensidade da rotação de culturas.

2 CAPÍTULO II: EVOLUÇÃO DE CO₂ E DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS EM SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO

- A SAÍDA -

2.1 RESUMO

A evolução do CO₂ é um indicador sensível dos efeitos das alterações no solo sobre a atividade da biomassa microbiana, em decorrência de diferentes manejos. Os sistemas de preparo do solo e de culturas podem influenciar na emissão de CO₂ para a atmosfera, contribuindo para alteração do efeito estufa, bem como para o teor de matéria orgânica no solo e, conseqüente na fertilidade e qualidade do solo. As principais fontes de CO₂ nos sistemas agrícolas é a decomposição da matéria orgânica do solo e dos resíduos culturais efetuada por microrganismos. Foi desenvolvido estudo em experimento de longa duração (19 anos) com o objetivo de identificar o efeito dos métodos de preparo do solo e das culturas na emissão de CO₂ e na decomposição de resíduos culturais, em Latossolo Vermelho distrófico típico. Este experimento está situado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrig (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. Neste são conduzidos os sistemas de preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD). Foram selecionados três sistemas comerciais de rotação: sucessão (monocultura) trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (R0); rotação de inverno aveia (*Avena strigosa* Schreb)/soja/trigo/ soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho (*Zea mays* L.)/nabo (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* Metzg.)/trigo/ soja (R2), em cada sistema de preparo do solo. As avaliações foram feitas a campo através do método da absorção estática para medição da evolução do CO₂, proposto por Anderson (1982). Estas foram realizadas de junho de 1999 a abril de 2001, totalizando 728 dias. Também avaliou-se a umidade gravimétrica do solo, na camada de 0-5 cm. Foi realizada a comparação da câmara usada neste trabalho (Anderson, 1982) com a câmara usada por Aita (1996) e Chapinotto

(2003). Em cada parcela, foram coletadas quatro amostras de resíduos culturais para determinação da matéria seca. Sub-amostras foram colocadas em sacos de malha de nylon. Estes foram depositados na superfície do solo nas parcelas de plantio direto e a 10 cm de profundidade de preparo convencional. Após 14, 28, 56, 84, 112, 140 dias, foram analisadas as quantidades de C orgânico dos resíduos remanescentes. Durante o período de avaliação não houve diferenças marcantes entre os sistemas de preparo do solo e entre os sistemas de culturas para os fluxos de C-CO₂. De modo geral, os fluxos tiveram relação com o período do ano, com maiores valores nos períodos de verão (setembro a abril) e os menores no períodos de inverno (maio a agosto), relacionados à influência da temperatura do ambiente. Entretanto, no período de dezembro de 1999 a janeiro de 2000, mesmo em maiores temperaturas, houve decréscimo acentuado do fluxo, provavelmente, ocasionado pelas menores precipitações ocorridas e conseqüente menor umidade do solo. A não diferença da evolução de C-CO₂ entre os sistemas de preparo do solo e das culturas também foi demonstrado na evolução acumulada, com comportamento semelhante das curvas de evolução. Na maior parte do período de avaliação, observou-se maior umidade do solo em PD em relação ao solo em PC, condição que permite ao PD manter maior atividade microbiana, enquanto, em alguns casos esta atividade já estava bastante reduzida no solo em PC. As câmaras estatísticas, uma proposta por Anderson (1982) e a outra por Aita (1996), não apresentaram diferença estatística em todas as avaliações. Ambas discriminaram semelhantemente os tratamentos, onde o convencional apresentou maior fluxo de C-CO₂ nas primeiras avaliações, às 4 e 16 horas, após o manejo do solo. O PC apresentou maior taxa de decomposição dos resíduos que o PD, principalmente, no ano agrícola 1998/99. Esta taxa não apresentou correlação com a evolução de CO₂ que foi semelhante entre os sistemas de preparo do solo.

2.2 INTRODUÇÃO

O incremento da concentração de CO₂ atmosférico é um dos mais inquietantes problemas ambientais que a humanidade vem enfrentado nas últimas décadas (Houghton et al., 1983). Este problema origina-se do grande consumo de biomassa fóssil (petróleo e carvão) e biomassa de florestas, esta última tanto devido às queimadas quanto à utilização para produção de energia. Constatou-se também que a agricultura através do aumento da taxa de decomposição da matéria orgânica principalmente em sistemas de preparo convencional do solo tem contribuído para esse efeito (Reicosky & Lindstron, 1993). Uma das possíveis conseqüências deste aumento do CO₂ atmosférico é o aquecimento global, cujas repercussões climáticas deverão ter impactos negativos sobre a produtividade agrícola em várias regiões do planeta (Wood et al., 1991)

O carbono (C) presente na matéria orgânica dos solos do planeta representa um componente fundamental do ciclo do carbono. Segundo estimativas, o solo é o maior compartimento terrestre deste elemento (Kern et al., 1993). Para Stevenson (1994) nele está armazenado 5,7 vezes mais C do que na atmosfera (4000 Pg no solo e 700 Pg na atmosfera), entretanto, para Eswaran et al. (1993) esta relação é de apenas duas vezes (1500 Pg no solo e 750 Pg na atmosfera).

A matéria orgânica do solo, apesar de ocupar em média apenas 5% do volume total do solo, tem influência marcante sobre várias propriedades importantes dos solos – CTC, densidade aparente e agregação (Brady, 1984). Outras características dos solos afetadas pela matéria orgânica são a temperatura e umidade (Salton et al., 1995). Normalmente altos teores de matéria orgânica estão correlacionados com alta fertilidade e, em conseqüência, alta produtividade potencial (Allison, 1973). Dentro desta mesma perspectiva, a diminuição dos teores de matéria orgânica levam usualmente à uma deterioração de várias propriedades do solo e, conseqüentemente, uma diminuição do potencial produtivo do solo.

O impacto dos sistemas de preparo do solo sobre a dinâmica da matéria

orgânica do solo, ou em outras palavras sobre o ciclo do carbono nos agroecossistemas merecem especial atenção. Sistemas de manejo capazes de manter e até mesmo incrementar o carbono orgânico no solo podem contribuir para a manutenção da capacidade produtiva dos solos e para a atenuação do problema do incremento do CO₂ atmosférico. Para tanto, a disponibilidade de métodos práticos e eficientes para avaliar a dinâmica do carbono se faz necessária.

Sistemas conservacionistas de manejo do solo vêm sendo apontados como capazes de aumentar a quantidade de matéria orgânica armazenada nos solos agrícolas (Dick, 1983; Carter, 1986, Campbell et al., 1991; Wood et al., 1991; Bayer, 1992; Franzluebbers et al., 1994; Sá, 1994). A matéria orgânica tem repercussões significativas sobre propriedades físicas, químicas e biológicas associadas à produtividade e resistência à degradação do solo. Mais recentemente tem-se dado grande ênfase ao estudo da matéria orgânica enquanto componente do ciclo biogeoquímico do carbono (Lal et al., 1995).

A produção de CO₂ pelos solos não-alcalinos, às vezes chamada respiração do solo, resulta do metabolismo da biomassa do solo. Esta biomassa é composta preponderantemente por organismos (microrganismos e macrofauna) e pelas raízes de plantas (Anderson, 1982; Anderson & Ingram, 1993). O metabolismo dos organismos ocorre principalmente sobre os resíduos orgânicos, que são os tecidos vegetais e animais mortos ainda não decompostos (Stevenson, 1994), e em menor escala sobre a matéria orgânica do solo. Esses resíduos, ao serem depositados, sofrem inicialmente decomposição parcial pela mesofauna (formigas, ácaros, colêmbolos, miriápodes, etc.) e, posteriormente, ação decompositora dos microrganismos. Os microrganismos atuam como transformadores, realizando a quebra dos polímeros orgânicos, através de enzimas extracelulares, em compostos orgânicos solúveis, os quais são absorvidos pelas células microbianas. O carbono orgânico presente nos compostos é transformado em energia e biomassa microbiana e também mineralizado na forma de CO₂ (Moreira & Siqueira, 2002). A energia é obtida dos elétrons presentes nas ligações dos átomos de C. Assim, parte do carbono presente nos resíduos é liberada para

atmosfera como CO₂ e o restante passa a fazer parte da matéria orgânica, como componente do solo (Bayer & Mielniczuk, 1999). O CO₂ do solo também é produzido pela respiração das raízes das plantas

A taxa de evolução do CO₂ pelo solo é determinada principalmente pela temperatura ambiente, umidade, C disponível para atividade dos microrganismos e relação C/N da matéria orgânica e dos resíduos incorporados (Buyanovsky et al., 1986).

A evolução do CO₂ do solo é um indicador sensível das alterações na biomassa microbiana em decorrência de diferentes manejos de solos (Carter & Rennie, 1982; Campbell et al., 1991; Franzluebbers et al., 1994). Esta evolução, juntamente com o acompanhamento de outros compartimentos do C, são necessários para o entendimento da dinâmica da matéria orgânica no solo, podendo ser medida em laboratório ou no local (*in situ*). Medições em laboratório podem ser mais exatas pois a variabilidade decorrente de diferenças microclimáticas pode ser eliminada e a complexidade do aparato de medição pode ser reduzida. As alterações sofridas pela manipulação da amostra ao ser preparada para medição em laboratório podem às vezes compensar as desvantagens dos métodos a campo. Por outro lado, medições *in situ* da evolução de CO₂ têm sido usadas para avaliar genericamente a atividade da biomassa do solo em climas, solos e práticas agrícolas diversas. Estas medições podem ser empregadas para medir a mineralização de C, procurando observar como nutrientes e matéria orgânica podem ser mais eficientemente utilizados e conservados (Anderson, 1982). Diferentes tipos de câmaras têm sido propostos para captação do CO₂ evoluído.

A taxa de decomposição (oxidação) dos resíduos culturais está relacionada com as suas características bioquímicas e com a relação C/N (Da Ros, 2004). Muitos trabalhos têm mostrado que os resíduos culturais de baixa relação C/N (como as leguminosas) decompõem mais rápido que os de relação C/N alta (como as gramíneas). A menor decomposição dos resíduos de alta relação C/N tem sido atribuída à deficiência de N e à presença de constituintes recalcitrantes. Os microrganismos decompositores possuem menor relação C/N do que os resíduos culturais. Dessa forma, o N é reconhecido como um

fator limitante para o crescimento e para a atividade microbiana durante o processo de decomposição (Da Ros, 2004).

A menor taxa de decomposição das gramíneas faz com que estas permaneçam mais tempo na superfície do solo. A presença de resíduos culturais (palha) na superfície do solo é o principal mecanismo de controle da erosão do solo. Além disto, estes resíduos diminuem a amplitude da temperatura e mantêm por mais tempo a umidade do solo, o que favorece a atividade microbiana, que, se por um lado, aumenta a taxa de decomposição, por outro, libera nutrientes para o crescimento vegetal.

Os estudos da decomposição de resíduos vegetais no solo baseiam-se comumente no método do saco de resíduo (*litter bag*). Neste, a biomassa vegetal de peso e composição química conhecida é colocada em pequenos sacos de material permeável, garantindo assim a troca de umidade e calor com o meio, assim como acesso de microrganismos que utilizam este material para seu metabolismo (Wieder & Lang, 1982; Amado et al., 2003).

2.2.1 Hipóteses

O plantio direto diminui a emissão de CO₂ para a atmosfera em comparação ao preparo convencional.

A taxa de decomposição dos materiais orgânicos é influenciada pelo preparo do solo e pelo tipo de resíduo cultural.

As maiores emissões de CO₂ no Rio Grande do Sul ocorrem no verão (maior temperatura) do que no inverno (menor temperatura).

2.2.2 Objetivos

Identificar métodos de preparo de solo e de culturas que diminuam a emissão de CO₂ para a atmosfera.

Adaptar e aplicar a campo o método da absorção estática para medição da evolução do CO₂ do solo em diferentes sistemas de manejo de solos.

Comparar dois tipos de câmaras na sua eficiência de captação e na diferenciação dos tratamentos.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1 Condições experimentais

Neste trabalho utilizou-se o mesmo experimento e parcelas do trabalho do Capítulo 1, descritas no item 1.3.1.

Foi utilizada área experimental localizada na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigo (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. O solo ocorrente é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999).

O experimento consistiu de dois métodos de preparo de solo, preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), combinados com diferentes sistemas de rotação de culturas. As parcelas mediram 40 x 60 m (2.400 m²) (Figura 1.2).

2.3.2 Avaliações

2.3.2.1 Evolução de CO₂ em sistemas de preparo do solo e de culturas

Para este trabalho, foram escolhidos os sistemas de rotação de culturas R0, R1-3 (que passou a ser R2) e R2 (que passou a ser R1), sendo: monocultura de inverno e verão trigo/soja (R0); rotação de inverno e monocultura de verão aveia/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2), em cada sistema de preparo do solo. Esta nova denominação/classificação (R0, R1 e R2) baseou-se na ordem crescente do uso da rotação de culturas. Os sistemas de culturas são sistemas comerciais possíveis de ser utilizados por agricultores da região.

A emissão de CO₂ do solo foi coletada com o aparato proposto por Anderson (1982), com algumas modificações segundo Kowalenko (1978) e Franzluebbbers et al. (1994), conforme a Figura 2.1.

Três cilindros de PVC de 30 cm de comprimento e 25 cm de diâmetro foram utilizados em cada parcela experimental, colocados na entrelinha das

culturas, no período de novembro de 1998 a abril de 1999. A partir de junho de 1999, passou-se a utilizar cinco cilindros de 15 cm de diâmetro. Esta adaptação foi necessária devido ao espaçamento entre linhas nas culturas de inverno, em torno de 20 cm, evitando-se com isto colocar os aparatos sobre as plantas em desenvolvimento, o que alteraria as quantidades de CO_2 coletadas devido ao metabolismo (respiração/fotossíntese) das plantas. O aumento no número de cilindros foi em função da grande variabilidade dos dados observada. Neste trabalho somente serão considerados os dados a partir de junho de 1999, após o ajuste da metodologia.

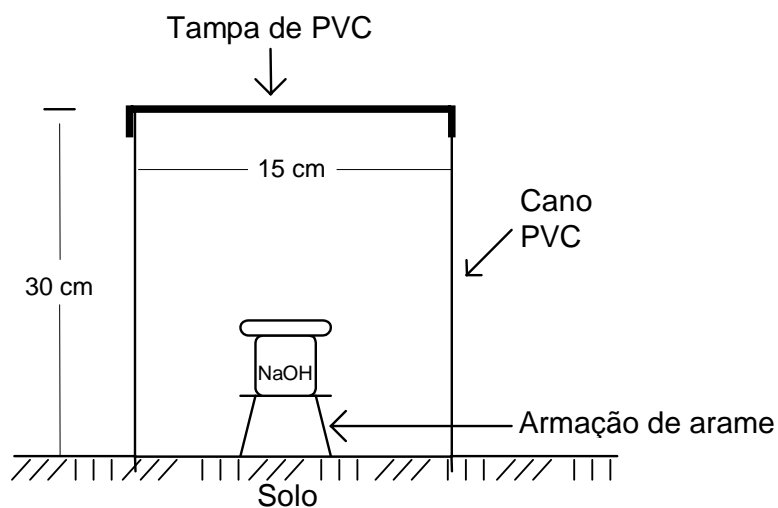


Figura 2.1. Câmara para medição da evolução de CO_2 a campo.

Os cilindros foram introduzidos no solo até 4 cm profundidade. Um recipiente com tampa atarrachável, contendo 20 ml de NaOH 1N, foi colocado dentro do cilindro sobre um suporte de arame, a cerca de 3 cm da superfície do solo. Imediatamente após a introdução do recipiente com solução alcalina, o cilindro foi colocado sobre o recipiente. Três cilindros, ditos de controle, por cada amostragem, consistiram de cilindros com extremidade inferior selada, colocados a campo com recipientes de solução alcalina pelo mesmo período, sem exposição ao solo.

Os períodos de amostragem – intervalos de 24 h (das 14 h até às 14 h

do dia seguinte) – foram: o dia anterior ao manejo de dessecação da cultura de cobertura, seguindo-se no dia seguinte ao manejo, e aos 14, 28, 56, 84, 112 e 140 dias, no período de novembro de 1998 a abril de 1999. A partir de junho de 1999, também houve a alteração dos períodos de amostragem, passando para intervalos regulares de 14 dias. Esta intensificação foi necessária para garantir fluxo contínuo de amostragens, levando em conta que os sistemas de rotação de culturas requerem diferentes épocas de manejo.

A cada período de amostragem definido, o recipiente de solução alcalina foi fechado imediatamente e todo o aparato removido. O CO₂ emitido foi medido pela titulação da solução alcalina com HCl 0,5 N em presença de excesso de BaCl₂. A quantidade de CO₂ emitido por unidade de superfície foi calculada pela seguinte equação:

$$C\text{-CO}_2 = ((B - V) \times N \times E) / (A \times T)$$

onde:

C-CO₂ = carbono evoluído na forma de CO₂ (mg m⁻² h⁻¹)

B = volume de HCl para controles (prova em branco) (ml)

V = volume de HCl para amostras expostas ao solo (ml)

N = normalidade do HCl

E = equivalente-grama do C (6 g)

A = área do seção transversal do cilindro (superfície do solo amostrada) (m²)

T = tempo de coleta (h)

A evolução acumulada foi calculada pela equação:

$$C\text{-CO}_2 \text{ acumulado} = ((Dias_f - Dias_i) \times ((CO_{2f} - CO_{2i})/2)) + CO_{2ac}$$

onde:

C-CO₂ acumulado = carbono acumulado evoluído na forma de CO₂ (kg ha⁻¹)

Dias_f = número de dias final ou posterior.

Dias_i = número de dias inicial ou anterior.

ac = acumulado anteriormente.

2.3.2.2 Comparação de câmaras para captação de CO₂

Após a realização das medições de evolução de CO₂, visando diminuir

dúvidas quanto à eficiência da câmara de coleta proposta por Anderson (1982), utilizada neste trabalho, foram realizadas avaliações de comparação de câmaras de captação de CO₂.

A evolução de CO₂ foi avaliada por dois tipos de câmaras de coleta em novembro de 2003, utilizando-se os manejos para implantação da cultura da soja nos preparos convencional e plantio direto. Nesta avaliação foi acrescentada mais uma subdivisão do sistema de rotação de culturas R2, ficando, em R2-1 (trigo/soja/aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo) e R2-3 (aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja). Esta inclusão teve por objetivo aumentar o número de avaliações a campo. A análise foi realizada antes da soja após trigo no sistema R2-1 e, aveia nos sistemas R1 e R2-3.

Câmara I

A primeira câmara testada foi similar a proposta por Anderson (1982), com algumas modificações segundo Kowalenko (1978) e Franzluebbers et al. (1994), de acordo com o descrito no item 2.3.2.1.

Câmara II

A segunda câmara é similar àquelas utilizadas por Aita (1996) e Chapinotto (2003) (Figura 2.2).

Cada câmara é constituída por um cilindro de cloro polivinil (PVC) com altura e diâmetro de 30 cm, para o plantio direto, e 35 cm de altura e 30 cm de diâmetro, para o preparo convencional. A parte superior é revestida com uma borracha para facilitar a sua completa vedação pela tampa, impedindo trocas gasosas com a atmosfera externa. A tampa é constituída de uma chapa de zinco galvanizado, fixada ao cilindro de PVC por meio de quatro parafusos externos distribuídos simetricamente em sua circunferência. Sobre a tampa foi colada uma camada de isopor (1,5 cm de espessura), a fim de evitar variações bruscas na temperatura interna das câmaras.

No interior da câmara e a 5 cm da superfície do solo foi instalada uma armação em ferro, em forma de "X", para receber o recipiente contendo a solução alcalina (NaOH 1 M) utilizada para captar o CO₂ evoluído. O recipiente

contendo a solução de NaOH apresentava 4 cm de altura e 25 cm de diâmetro e o volume de solução de NaOH utilizado em cada coleta foi de 100 ml.

As câmaras estáticas foram inseridas 7 cm de profundidade no solo no preparo convencional e 5 cm no plantio direto.

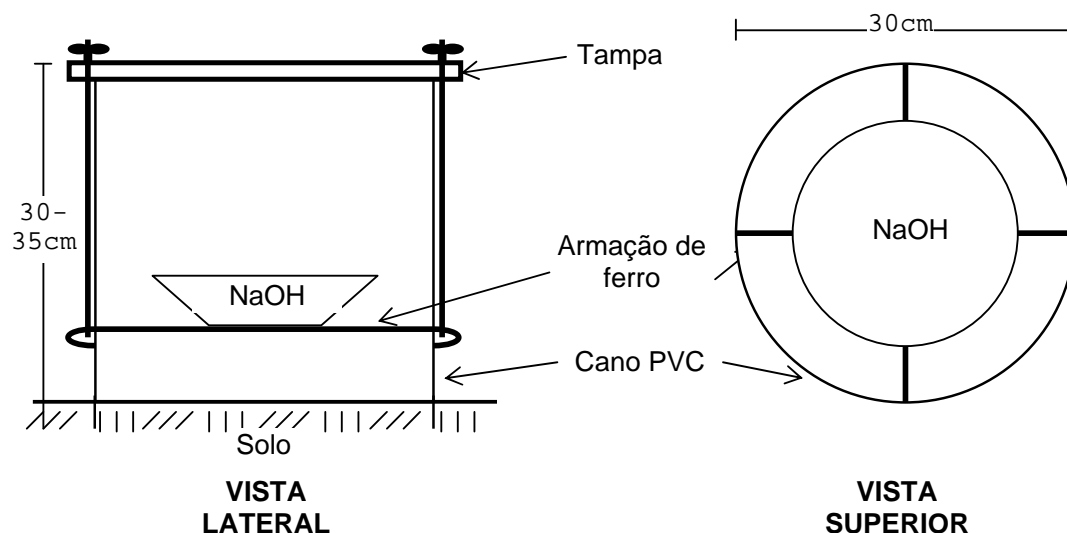


Figura 2.2. Câmara II para medição da evolução de CO₂ a campo.

Procedimento

Foram utilizados 3 cilindros de PVC (câmaras) para cada tipo de coletor, em cada parcela experimental. Estes foram instalados imediatamente após a passagem dos implementos, no preparo convencional e, concomitantemente no plantio direto. Os implementos utilizados foram arado de discos e grade de discos. Após a aração, imediatamente foi realizada a gradagem, utilizando-se um cilindro de cada câmara em cada passada simultânea. A dessecação no plantio direto foi realizada um dia antes.

O período de tempo entre cada troca da solução de NaOH variou conforme a velocidade de liberação do ar do solo de modo a evitar a saturação da solução pelo CO₂ liberado. Assim, a primeira coleta teve intervalo de 4 horas, a segunda e terceira intervalos de 12 horas e a quarta e quinta coletas intervalos de 24 horas, correspondendo a 4, 16, 28, 52 e 76 horas após a instalação das câmaras.

Um cilindro, dito de controle, para cada câmara e cada amostragem, consistiu de cilindros com extremidade inferior selada, colocados a campo com recipientes de solução alcalina pelo mesmo período, sem exposição ao solo.

O excesso de NaOH (solução alcalina) foi titulado com solução ácida (HCl 0,5 N) em presença de excesso de BaCl₂, conforme descrito por Stotzky (1956). Titulou-se todo o conteúdo do recipiente da câmara I (20 ml) e, para câmara II foram utilizados 20 ml dos 100 ml contido no recipiente coletor desta câmara. Para a câmara I a quantidade de C-CO₂ emitido por unidade de superfície foi calculada pela equação descrita no item 2.3.2.1. Para a câmara II, o procedimento de cálculo foi mais complexo. Devido a apenas uma parte do NaOH ser titulado, foi realizada a pesagem do recipiente vazio e deste com NaOH antes e depois da colocação a campo, bem como a pesagem do NaOH titulado. Foi realizada a correção da normalidade do NaOH, a partir das pesagens através da seguinte relação: peso NaOH antes da colocação a campo / peso do NaOH depois da colocação a campo. Esta nova normalidade foi utilizada para corrigir o gasto de HCl da titulação. Depois o cálculo utilizou a mesma relação usada na câmara I.

2.3.2.3 Análise da decomposição de resíduos

Nesta análise inclui-se os resultados obtidos no ano agrícola 1998/99, pois já havia melhor domínio desta metodologia, o que não ocorreu com a metodologia de evolução de CO₂ para este ano agrícola inicial.

Os resíduos vegetais foram picados, simulando o efeito da passagem dos implementos. A partir do material picado foram preparadas amostras, numa primeira fase (1998/1999) com quantidade equivalente de resíduos nos dois sistemas de preparo. Numa segunda fase (1999 e 1999/2000) a quantidade foi proporcional à matéria seca encontrada em cada área, devido as diferenças em termos de resíduos encontrados em superfície, principalmente comparando-se o plantio direto com o preparo convencional. A seguir estas amostras foram introduzidas em sacos de nylon (*litter bags*) de 10 x 20 cm e malha de 0,5 mm. Seis sacos foram depositados em cada parcela - na superfície do solo nas

parcelas de plantio direto e a 10 cm de profundidade nas com preparo convencional. Após 14, 28, 56, 84, 112, 140 dias, um saco foi retirado de cada vez de cada parcela para as análises da quantidade de resíduos remanescentes.

2.3.2.4 Análise de C dos resíduos vegetais dos sacos de decomposição

Os resíduos vegetais foram retirados dos sacos de decomposição e secos ao ar. As raízes de plantas que por ventura cresceram para o interior dos sacos foram removidas manualmente. O teor de C das amostras foi determinado pela metodologia descrita em Tedesco et al. (1995).

Os dados obtidos relativos ao C dos resíduos remanescentes nos sacos de decomposição, representantes da taxa de decomposição do C dos resíduos (k), foram ajustados conforme um modelo unicompartmental exponencial (Wieder & Lang, 1982; Whitmore, 1996). A taxa de decomposição (k) foi estimada através de gráfico, plotando o tempo (t) de cada avaliação com o C orgânico remanescente. Em programa gráfico que disponha de análise estatística (Excel[®], Sigma Plot[®]), solicita-se a regressão exponencial simples ($y = a e^{-bx}$). Assim a equação de ajuste segue o modelo exponencial (Bayer, 1996; De Bona, 2005), onde a taxa de decomposição (k) corresponde ao coeficiente angular da equação (b):

$$C_t = C_o e^{-kt}$$

onde: C_t = carbono remanescente no tempo t

C_o = carbono original

t = intervalo de tempo desde início do processo (dias)

k = taxa de decomposição ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)

2.3.2.5 Indicadores ambientais

A precipitação pluviométrica ocorrida durante o período de realização das avaliações e as temperaturas médias do ar no momento das amostragens

de evolução de CO₂ nos sistemas de preparo e culturas, encontram-se na Figura 2.3.

A precipitação pluviométrica e as temperaturas mínimas, médias e máximas diárias ocorridas durante o período de realização da comparação das câmaras de captação de CO₂ encontram-se na Tabela 2.1.

2.3.2.6 Umidade do solo

Foi avaliada a umidade do solo através de avaliação gravimétrica da água presente em amostras de solo, coletadas durante os mesmos períodos de amostragem referidos no item 2.3.2.1, na camada de 0 a 5 cm.

2.3.3 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Programa Estatístico SAS (SAS, 1996). A retirada de valores discrepantes (“outliers”) foi realizada pelo teste Q de Dixon, conforme a equação abaixo, eliminando-se os valores discrepantes quando o quociente obtido excedeu o valor crítico da tabela a 5% (Neves, 2004):

$$Q = \frac{|\text{valor discrepante} - \text{valor mais próximo}|}{(\text{valor máximo} - \text{valor mínimo})}$$

A análise de correlação entre CO₂ evoluído e umidade do solo foi feita com os dados originais, sendo o CO₂ pela média do tratamento.

Na comparação das câmaras, para as causas de variação principais foi considerado 5% de significância e para as interações 10% pelo teste F. Os dados referentes ao C dos resíduos vegetais remanescentes nos sacos de decomposição foram submetido à análise de regressão, com auxílio do programa computacional Sigma Plot[®]. Equações de regressão do tipo exponencial simples (Wieder & Lang, 1982; Whitmore, 1996) foram ajustadas para explicar a relação entre tempo e C dos resíduos remanescentes nos sacos de decomposição, ou seja, a taxa de decomposição dos resíduos vegetais (De Bona, 2005).

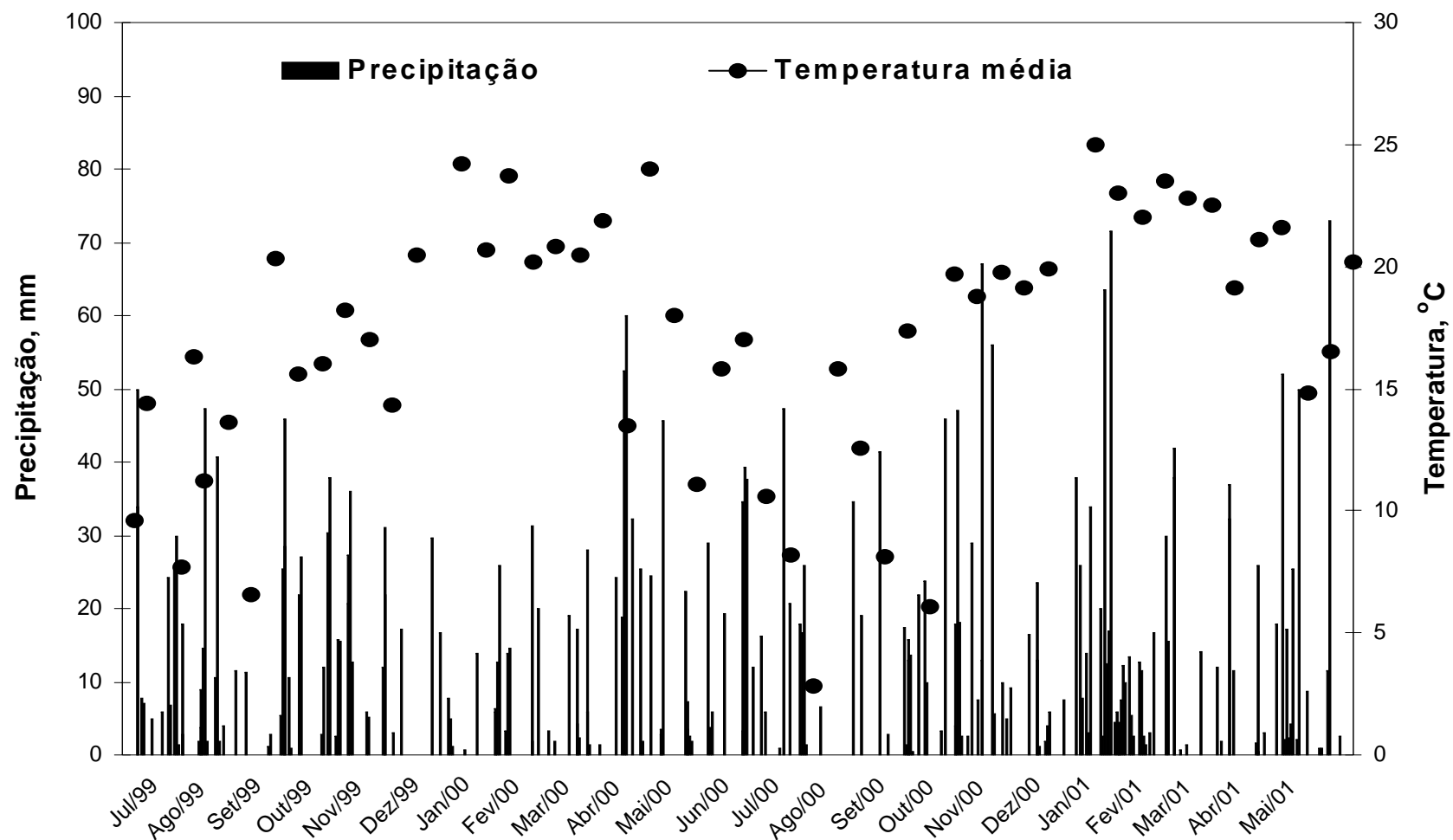


Figura 2.3. Distribuição da precipitação pluviométrica durante o período de realização da avaliação da evolução de CO₂ (7/6/1999 a 4/6/2001) e as temperaturas médias do ar no período das amostragens. Dados obtidos na Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta (RS).

Tabela 2.1. Precipitação pluviométrica e temperaturas mínimas, médias e máximas diárias ocorridas durante o período de realização do trabalho de comparação das câmaras de captação de CO₂ (2 a 5/11/2003). Dados obtidos na Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, RS.

Dia	Temperatura diária			Precipitação
	Mínima	Máxima	Média ⁽¹⁾	
°C				mm
1º	15,0	21,0	15,4	0,0
2º	7,0	23,0	14,8	0,0
3º	9,2	27,0	18,4	0,0
4º	13,8	22,8	18,0	1,2

⁽¹⁾ Temperatura média = ((temperatura mínima + temperatura máxima + temperatura das 9:00 horas + (2 x temperatura das 21:00)) / 5.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Evolução de C-CO₂

Durante o período de avaliação, as curvas de fluxos de C-CO₂ dos sistemas de preparo do solo e rotações de culturas foram semelhantes (Figura 2.4).

De modo geral, os fluxos tiveram relação com o período do ano, com maiores valores nos períodos de verão (setembro a abril) e os menores no período de inverno (maio a agosto), relacionados à influência da temperatura do ambiente (Figura 2.3). Entretanto, no período de dezembro de 1999 a janeiro de 2000, mesmo em maiores temperaturas, houve decréscimo acentuado do fluxo, provavelmente, ocasionado pelas menores precipitações ocorridas (Figura 2.3) e conseqüente menor umidade do solo (Figura 2.5). Estes resultados evidenciam que a evolução de C-CO₂, depende de vários fatores ambientais, entre os quais, principalmente, temperatura e umidade do solo. A maior emissão foi de 2,18 kg ha⁻¹ h⁻¹ em janeiro de 2001 sob o PC R2 e, a menor foi de 0,10 kg ha⁻¹ h⁻¹ em junho de 1999 sob PD R0.

Na Tabela 2.2, são apresentados a média do fluxo de C-CO₂ (Figura 2.4), da umidade do solo, na camada de 0-5 cm (Figura 2.5) e, da temperatura

média do ar e, a precipitação (Figura 2.3) ocorridas no período das estações do ano, na épocas de 1999/2000 e 2000/2001. Os fluxos de C-CO₂ tiveram relação direta com a temperatura do ar em cada época avaliada, verificando-se que os maiores fluxos ocorreram no período de verão, que apresentaram as maiores médias de temperaturas do ar. Entretanto, analisando as duas épocas, verifica-se maior fluxo de C-CO₂ em 2000/2001, acompanhado de maior precipitação e, conseqüentemente, maior umidade do solo, sem contudo haver diferença na temperatura do ar. Este fato indica a importância da relação entre temperatura do ambiente e umidade do solo na atividade microbiana e conseqüente fluxo de C-CO₂.

Na maior parte do período de avaliação, fica evidente a maior umidade do solo do plantio direto em relação ao convencional (Figura 2.5 e Tabela 2.2). Em 2000/2001, na média das estações, a diferença de umidade do solo em favor do PD chegou a 0,05 kg kg⁻¹, em relação ao PC. Considerando densidade média do solo de 1,3 g cm⁻¹, esta diferença equivaleria a 32.500 L ha⁻¹ de água (3,25 mm), na camada de 0-5 cm. A umidade do solo é um fator muito importante na atividade microbiana e, conseqüentemente, na evolução de CO₂. Esta condição permite ao plantio direto manter a atividade microbiana, enquanto, em alguns casos, esta já está bastante reduzida no preparo convencional, por limitação de umidade do solo. Entretanto, apesar de significativa, a correlação entre a umidade do solo e a evolução de CO₂ foi baixa (R=0,26), provavelmente, porque outros fatores também interferiram, principalmente, temperatura do solo e adição de resíduos, ao longo dos 728 dias de avaliação.

A ausência de diferença da evolução de C-CO₂ entre os sistemas de preparo do solo e das culturas também foi demonstrada na evolução acumulada, com comportamento das curvas semelhante (Figura 2.6). Na análise do total evoluído, a diferença do preparo convencional para o plantio direto foi de apenas -0,5, +0,4 e -6,8 %, nas rotações R0, R1 e R2, respectivamente, e -2,4% na média das rotações. Estes resultados provavelmente estão relacionados ao menor revolvimento do solo realizado pela grade pesada seguida de grade leve, implementos utilizados no preparo convencional durante o período de avaliação. Reicosky & Lindstron (1993),

encontraram maior fluxo de C-CO₂ em solo manejado por arado de aiveca, seguido de arado de aiveca com grade após e menor fluxo na área somente com grade e com plantio direto. Os autores associaram o menor fluxo ao menor ou nulo distúrbio no solo.

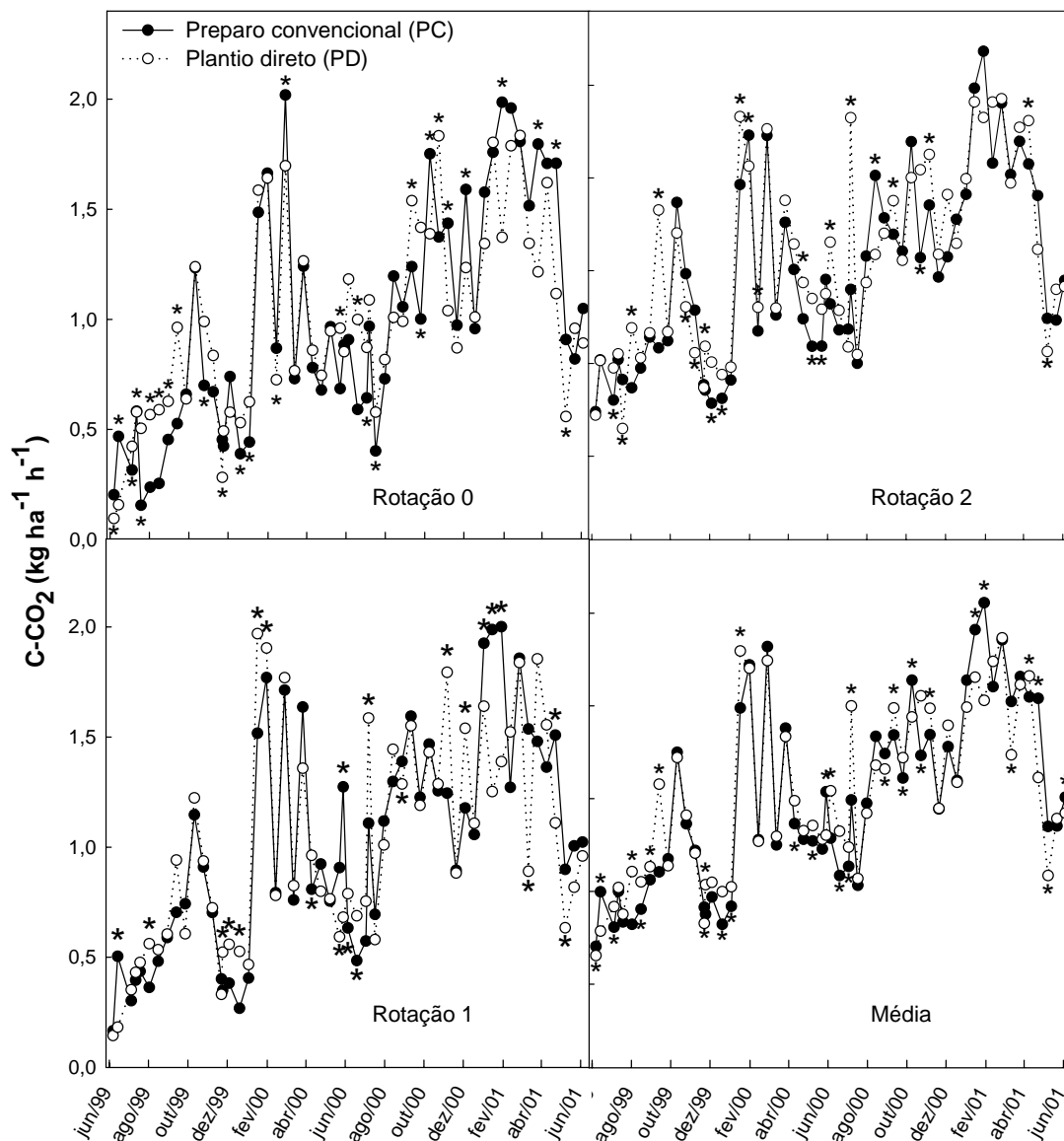


Figura 2.4. Fluxos de C-CO₂ nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), no período de 07/06/99 a 04/06/01. * = médias diferem pelo teste DMS a 5%.

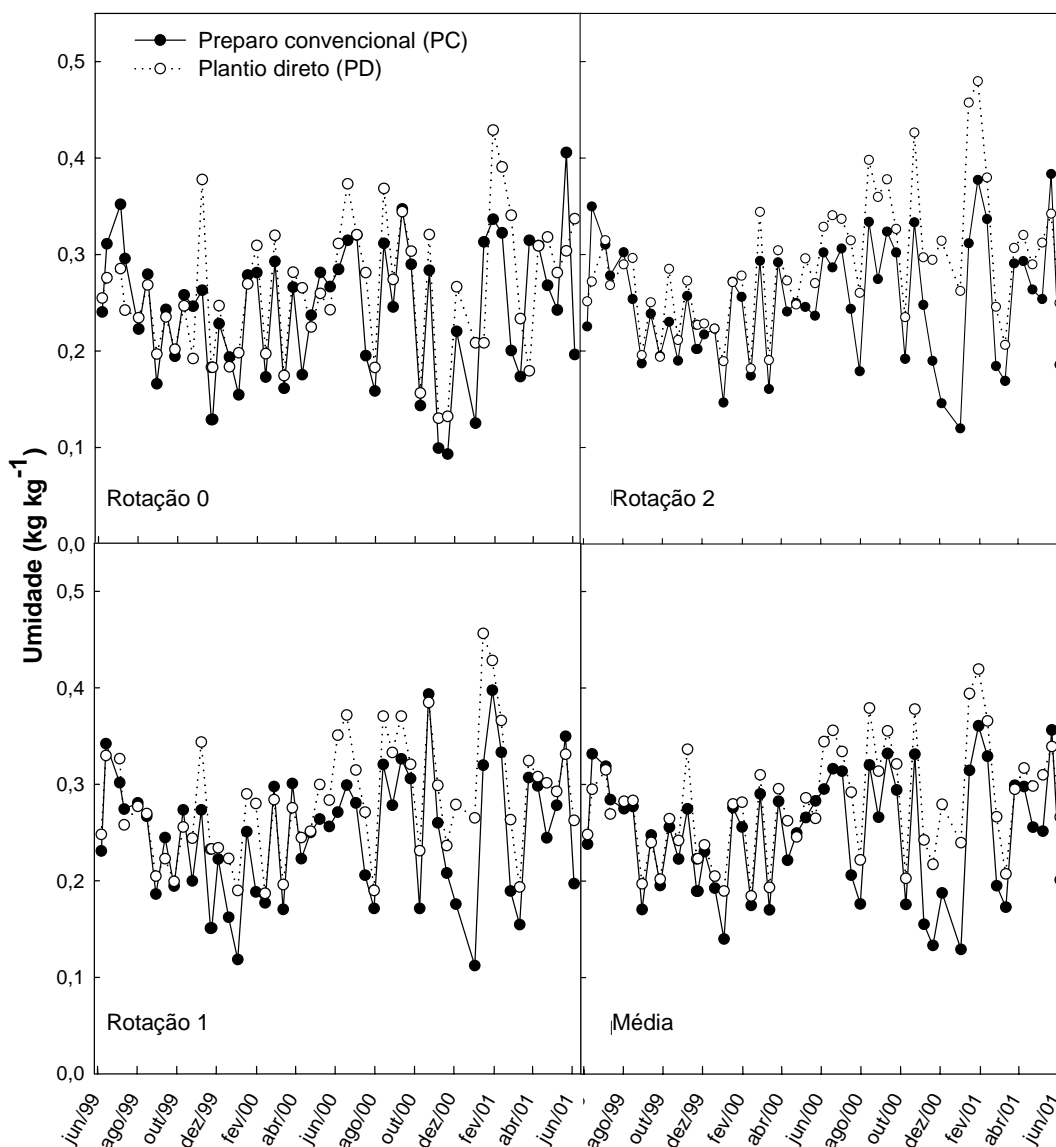


Figura 2.5. Umidade do solo, nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), no período de 07/06/99 a 04/06/01, na camada de 0-5 cm.

A evolução anual acumulada de C-CO₂ (Tabela 2.3) foi muito diferente entre as épocas, inverno (junho) de 1999 a outono (maio) de 2000 e inverno de 2000 a outono de 2001, sendo que em 2000/20001 a emissão de C-CO₂ foi praticamente o dobro do período anterior. Este comportamento pode ser devido a maior precipitação ocorrida na primeira época (1885 mm) em comparação a

segunda época (1539 mm), o que pode ter contribuído para maior atividade microbiana. A temperatura média foi ligeiramente maior (0,4°C) no segundo período.

Tabela 2.2. Média dos fluxos de C-CO₂ e umidade do solo sob sistemas de preparo e de culturas e, temperatura média do ar e precipitação ocorridas no período das estações do ano em 1999/2000 e 2000/2001.

Estação do ano ¹	Fluxo de C-CO ₂		Umidade do solo		Precipitação	Temperatura do ar
	PC	PD	PC	PD		
	kg ha ⁻¹ h ⁻¹		kg kg ⁻¹		mm	°C
1999/2000						
Inverno	0,39	0,44	0,27	0,27	380,8	12,5
Primavera	0,70	0,77	0,22	0,25	475,6	16,9
Verão	1,00	1,08	0,22	0,24	258,5	21,7
Outono	0,90	0,91	0,25	0,26	423,7	17,4
Média	0,75	0,80	0,24	0,26	384,7	17,1
2000/2001						
Inverno	0,89	0,99	0,27	0,32	384,2	10,7
Primavera	1,27	1,36	0,24	0,29	515,0	16,8
Verão	1,63	1,54	0,25	0,33	574,0	22,7
Outono	1,33	1,18	0,27	0,29	411,6	19,3
Média	1,28	1,27	0,26	0,31	471,2	17,4

¹ Inverno = junho, julho e agosto; primavera = setembro, outubro e novembro; verão = dezembro, janeiro e fevereiro e, outono = março, abril e maio.

Na média dos preparos, das rotações e das épocas, o fluxo chegou a 9,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, considerando a área de cultivo de soja e milho, de aproximadamente 5,4 milhões de hectares no Rio Grande do Sul (IBGE, 2006), a emissão anual chegaria a 0,049 Pg ano⁻¹ (1 Pg = 10¹⁵ g), neste estado. Machado et al. (2004), citam que a expansão da agricultura no mundo através da derrubada de florestas durante os últimos 140 anos levou a uma liberação líquida de 121 Pg de C (na forma de CO₂) para a atmosfera, o que levaria a contribuição de 0,86 Pg de C anualmente.

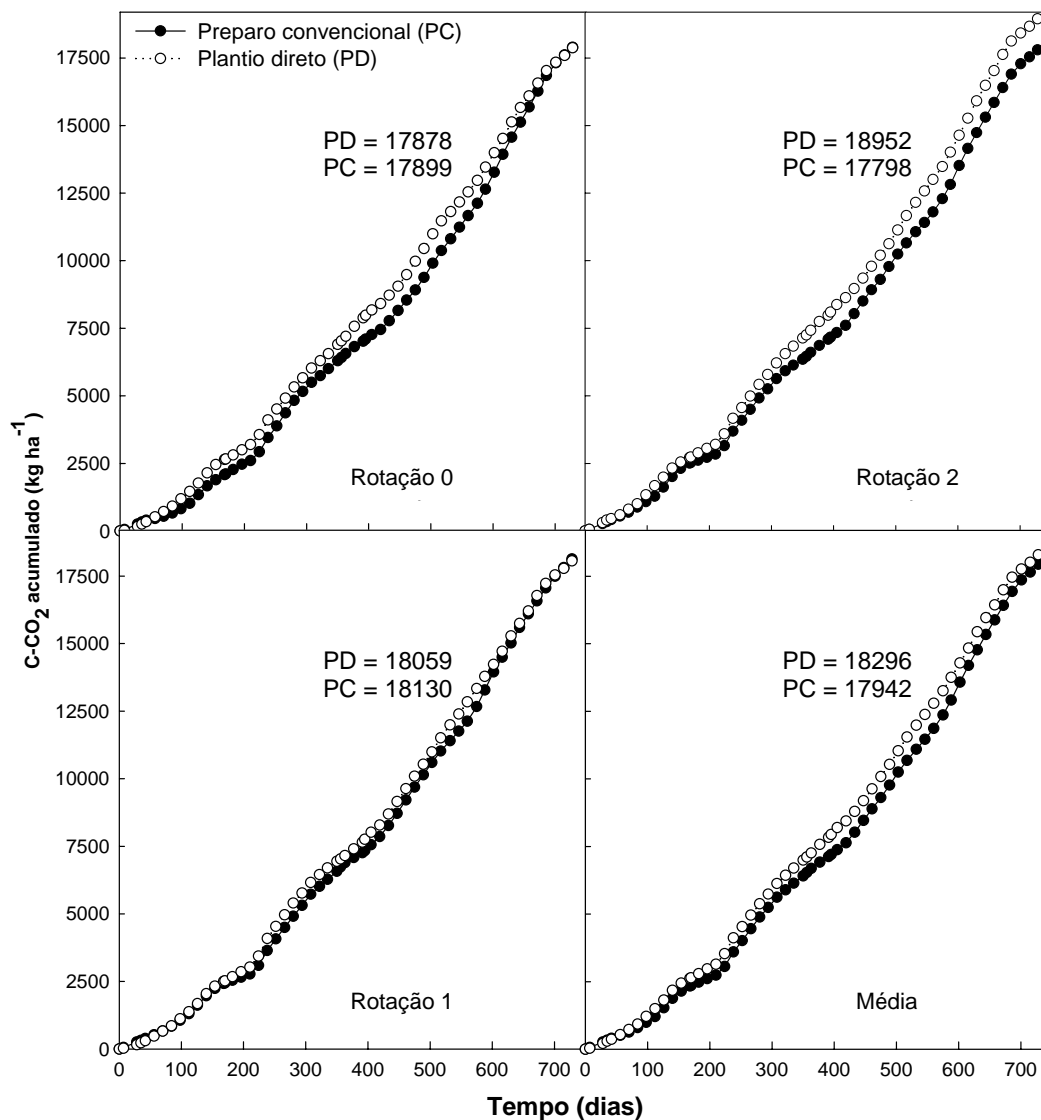


Figura 2.6. Evolução acumulada de C-CO₂ e total evoluído em 728 dias nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja, 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), no período de 07/06/99 a 04/06/01.

2.4.2 Comparação das câmaras de captação de CO₂

Não houve diferença estatística entre as duas câmaras pelo teste F a 5% de probabilidade em todas as avaliações (Tabela 2.4). Apesar de não ter significância estatística são apresentadas as Figuras 2.7 e 2.8 com o objetivo

de visualização do comportamento das câmaras. A Figura 2.7 mostra que a captação de C-CO₂ das câmaras foi similar durante o período de avaliação. A Figura 2.8, também no mesmo sentido, indica que a diferenciação dos sistemas de manejo do solo foi similar entre as câmaras, com exceção da última avaliação, onde a câmara II mostra diferenciação estatística entre os sistemas, o que não ocorreu na câmara I.

Com relação aos preparos do solo, o PC apresentou maior fluxo de C-CO₂ nas primeiras avaliações, as 4 e 16 horas, após o manejo com arado e grade, nas duas câmaras (Figura 2.8), com valores de 2,45 e 1,17 kg C-CO₂ ha⁻¹ h⁻¹ para o PC e 1,39 e 0,69 kg C-CO₂ ha⁻¹ h⁻¹ para o PD, respectivamente em cada avaliação. Após este período os fluxos foram iguais, apresentando, em média, 0,95 kg C-CO₂ ha⁻¹ h⁻¹. Isto evidencia que o fluxo de C-CO₂ é maior imediatamente após o manejo do solo através da aração e gradagem.

Tabela 2.3. Evolução anual acumulada de C-CO₂ sob sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em diferentes rotações de culturas, de junho a maio de 1999/2000 e 2000/2001.

Rotações de culturas	Preparo convencional	Plantio direto	Média
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹			
1999/2000			
R0	6412	7033	6723
R1	6733	7034	6884
R2	6462	7253	6858
Média anual	6536	7107	6821
2000/2001			
R0	11487	10845	11166
R1	11397	11025	11211
R2	11336	11698	11517
Média anual	11407	11190	11298
Média 1999/2000 e 2000/2001			
R0	8950	8939	8945
R1	9065	9030	9048
R2	8899	9476	9188
Média dos anos	8971	9148	9060

Reicosky (1999) descreve que o fluxo inicial de CO₂ após preparo com arado de aiveca foi alto chegando a 35 g m⁻² h⁻¹ (0,95 kg C-CO₂ ha⁻¹ h⁻¹), declinando para 6 g m⁻² h⁻¹ (0,16 kg C-CO₂ ha⁻¹ h⁻¹) cinco horas após o preparo. Para o plantio direto o autor obteve 0,2 g m⁻² h⁻¹ (0,005 kg C-CO₂ ha⁻¹ h⁻¹) para as primeiras cinco horas de fluxo. Nota-se que os valores obtidos por Reicosky (1999) são inferiores aos obtidos neste trabalho.

Tabela 2.4. Significância de F para valores médios de C-CO₂ (kg ha⁻¹ h⁻¹), nos diferentes tempos de avaliação após o manejo do preparo convencional.

Causa de variação	Tempo (horas)				
	4	16	28	52	76
Preparo	0,0001 *	0,0001 *	0,7085 ns	0,6011 ns	0,1945 ns
Rotação	0,4228 ns	0,0159 *	0,0090 *	0,0050 *	0,3446 ns
Câmara	0,4092 ns	0,0937 ns	0,7822 ns	0,4130 ns	0,1724 ns
Preparo x Câmara	0,0566 **	0,8319 ns	0,1365 ns	0,1985 ns	0,3035 ns
Rotação x Câmara	0,6362 ns	0,9431 ns	0,0574 **	0,1527 ns	0,7553 ns
Preparo x Rotação	0,1220 ns	0,0018 **	0,0205 **	0,2048 ns	0,5903 ns
Preparo x Rotação x Câmara	0,2627 ns	0,4678 ns	0,6046 ns	0,0841 **	0,5473 ns

* significativo a 5%. ** interação significativa a 10%. ns = não significativo.

Em negrito, significâncias que incluem a causa de variação câmara.

Houve interações nos diferentes tempos de avaliação, com exceção da amostragem às 76 horas após o preparo convencional, que não apresentou significância. Serão discutidas somente as interações que envolvem a causa de variação câmara, por ser este o objetivo do trabalho.

Na amostragem de 4 horas houve interação entre as causas de variação câmara e preparo do solo (Figura 2.9). Nota-se que a diferenciação ocorre entre os preparos do solo, onde o PC foi superior no fluxo de C-CO₂ que o PD, nesta amostragem. As câmaras não apresentaram diferenças.

Na amostragem de 16 horas, não houve interação para câmara. Houve interação entre os sistemas de rotação e as câmaras na amostragem de 28 horas (Figura 2.10), onde a única diferenciação entre as câmaras ocorreu na rotação 2-1 (trigo/soja/aveia/soja/aveia+ervilhaca+aveia/milho/nabo), quando a câmara II apresentou maior fluxo de C-CO₂ que a câmara I.

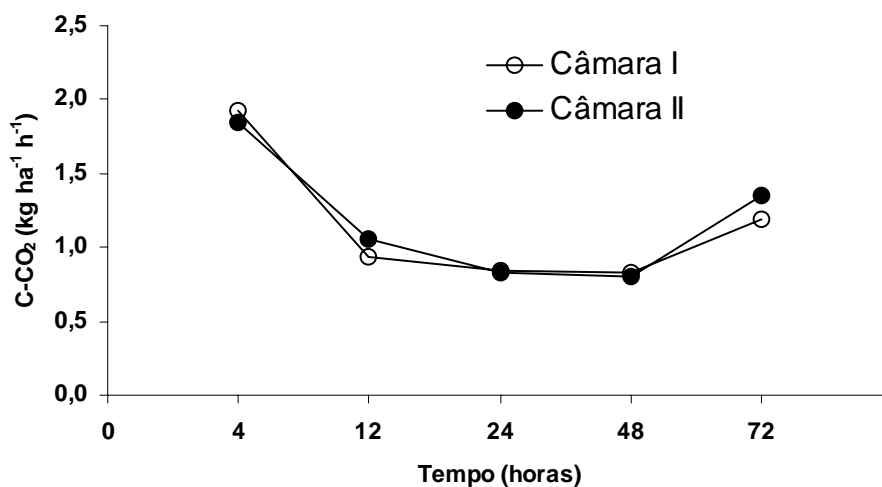


Figura 2.7. Fluxos de C-CO₂ medidos por duas câmaras de captação. Média de 24 repetições. Cruz Alta, RS.

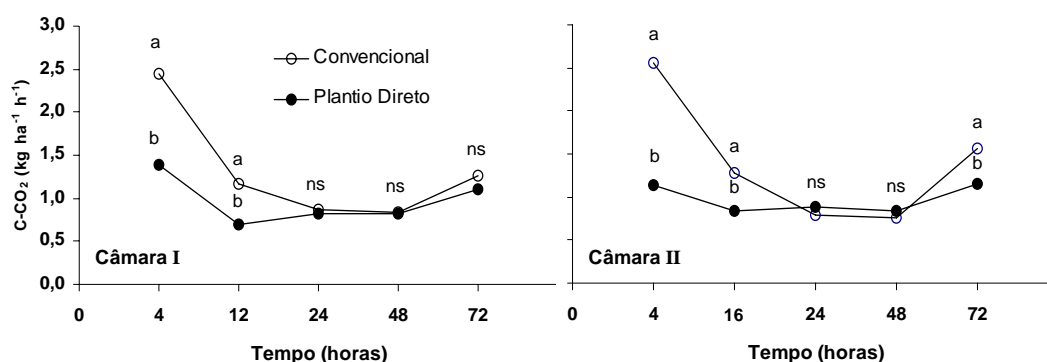


Figura 2.8. Fluxos de C-CO₂ medidos por duas câmaras de captação nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto. Média de 12 repetições. Cruz Alta, RS. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste F a 5%.

Na avaliação às 52 horas houve interação tríplice (Figura 2.11). A única diferenciação entre as câmaras ocorreu na rotação 2-1 (trigo/soja; aveia/soja; ervilhaca+aveia/milho) no plantio direto, onde a câmara II apresentou maior fluxo de C-CO₂ que a câmara I, da mesma forma que ocorreu na avaliação às 28 horas, considerando as médias dos preparos do solo (Figura 2.10).

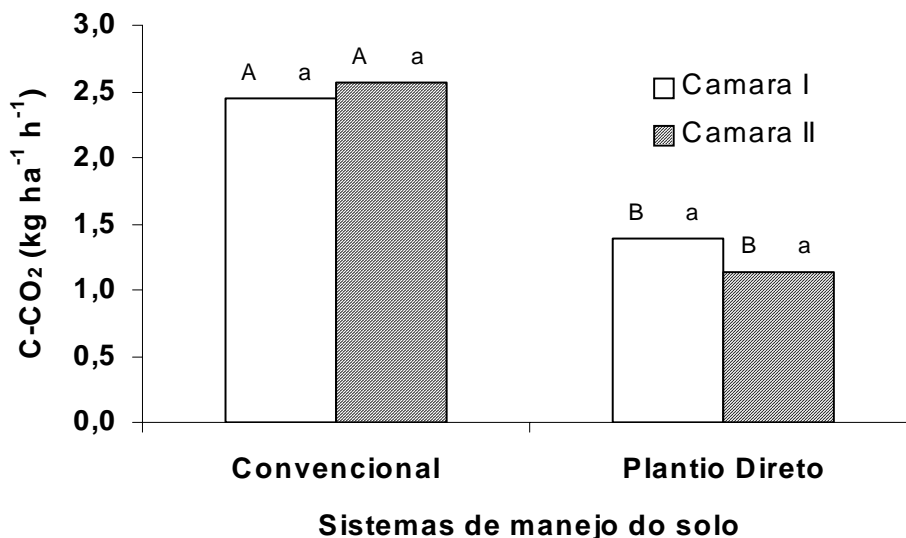


Figura 2.9. Fluxos de C-CO₂ nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, medidos por duas câmaras de captação, nas 4 horas após a aração e gradagem no convencional. Cruz Alta, RS. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para sistemas e minúsculas para câmaras, não diferem estatisticamente pelo teste F a 5%.

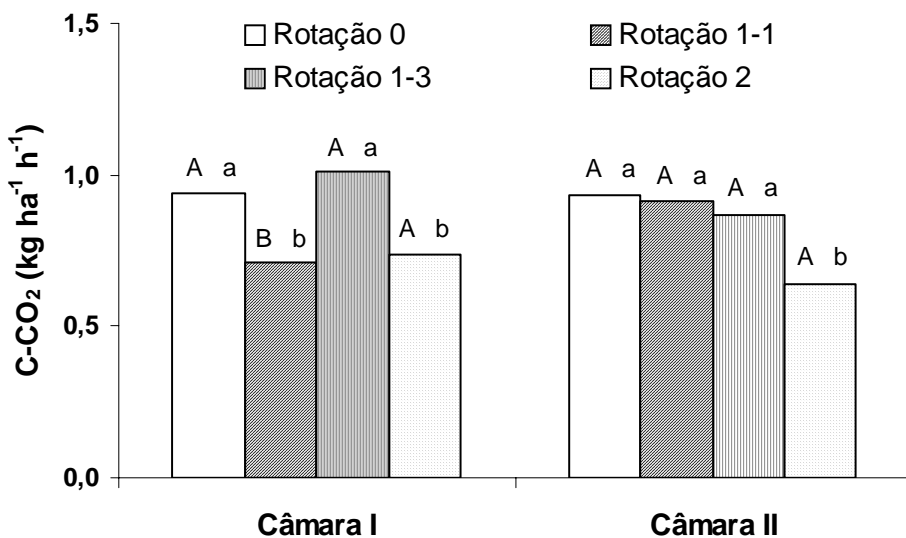


Figura 2.10. Fluxos de C-CO₂ nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, medidos por duas câmaras de captação, nas 28 horas após a aração e gradagem no convencional. Cruz Alta, RS. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para câmaras e minúsculas para rotação, não diferem estatisticamente pelo teste F a 5%.

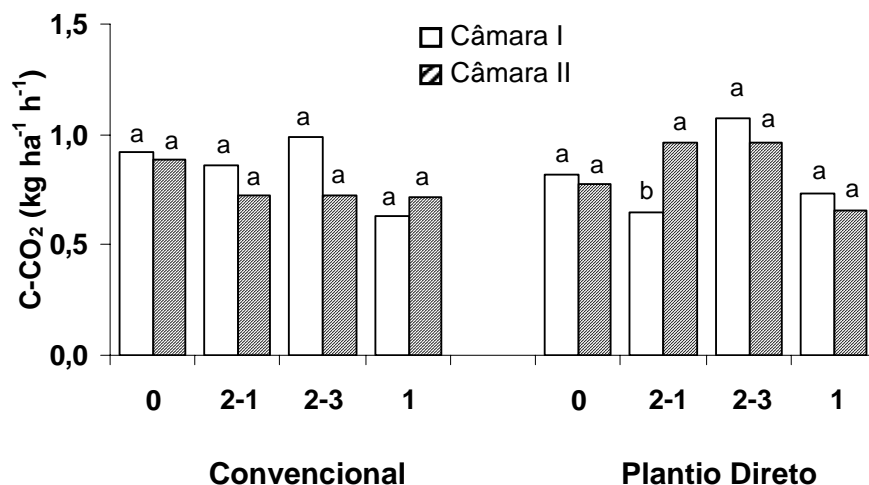


Figura 2.11. Fluxos de C-CO₂ nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto em diferentes rotações de culturas, medidos por duas câmaras de captação, nas 52 horas após a aração e gradagem no convencional. Médias seguidas pela mesma letra, para câmara, não diferem estatisticamente pelo teste F a 5%.

2.4.3 Decomposição dos resíduos vegetais

A decomposição dos resíduos vegetais ocorre normalmente pela ação inicial da fauna do solo e posterior ação dos microrganismos, sendo os componentes deste último grupo, os principais responsáveis por esta atividade biológica. A ação dos microrganismos é influenciada, principalmente, pelos fatores temperatura, umidade e fontes de alimentos no solo.

Nas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14 são apresentadas as taxas de decomposição do C orgânico dos resíduos das culturas em cada sistema de rotação nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, estimadas a partir das equações de ajuste das curvas de decomposição (Bayer, 1996; De Bona, 2005). As equações de ajuste utilizadas seguem o modelo exponencial decrescente simples proposto por Wieder & Lang (1982) e definido por $C_t = C_o e^{-kt}$, onde C_t é o conteúdo de C (kg ha⁻¹) do resíduo remanescente no saco de decomposição no tempo t , C_o é o conteúdo original de C do resíduo e k é a taxa de decomposição do C do resíduo vegetal. Esta equação foi calculada

pelo programa computacional Sigma Plot®. O coeficiente de determinação (R^2) de todas as curvas de ajuste foram superiores a 0,99.

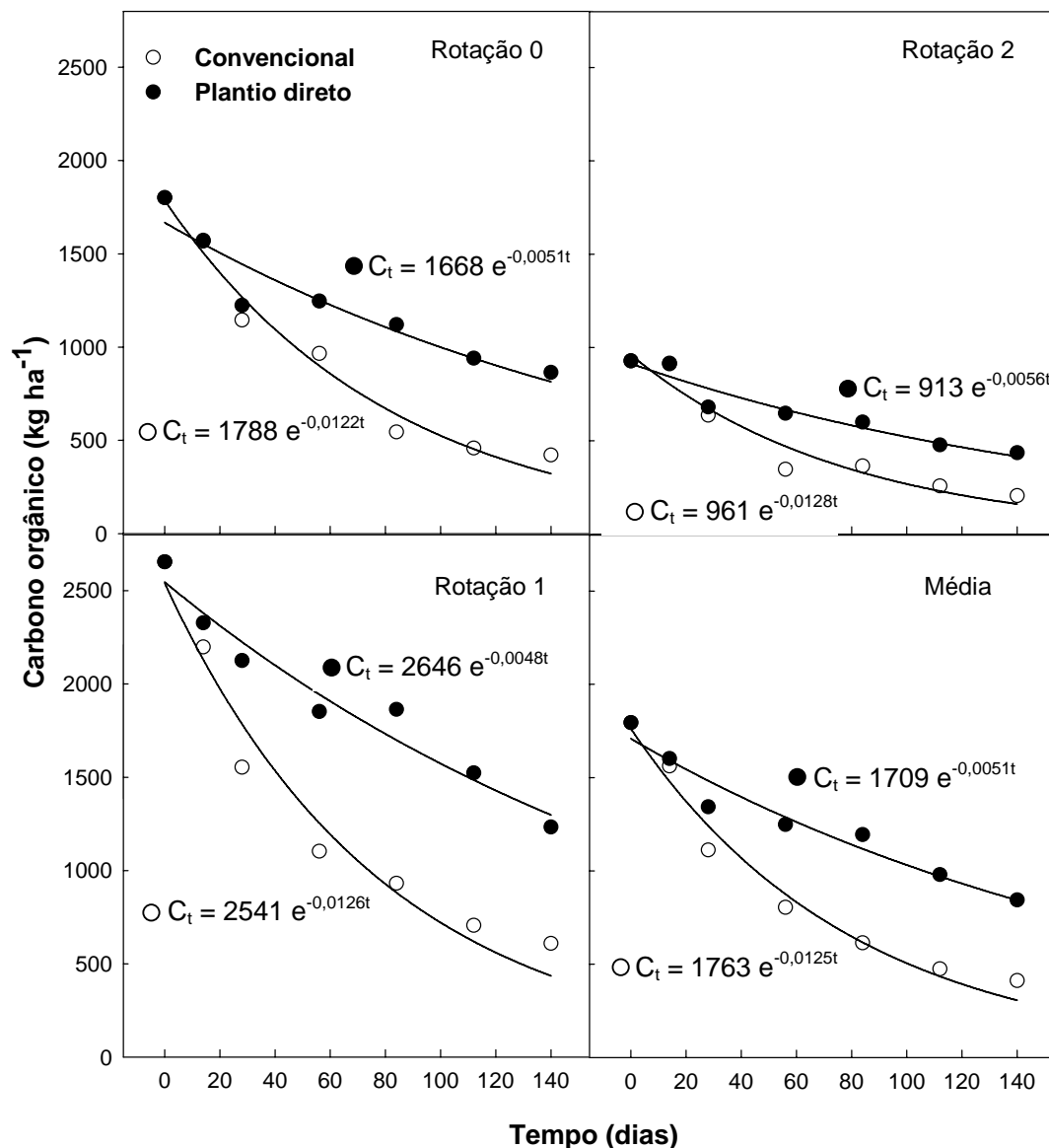


Figura 2.12. Estimativa da taxa de decomposição do C através da equação unicompartimental $C_t = C_0 e^{-kt}$ (k , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) nos sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja) e a média das rotações, nos preparos do solo convencional e plantio direto, no período de novembro de 1998 a abril de 1999. Em cada sistema de rotação, a cultura sublinhada indica os resíduos estudados.

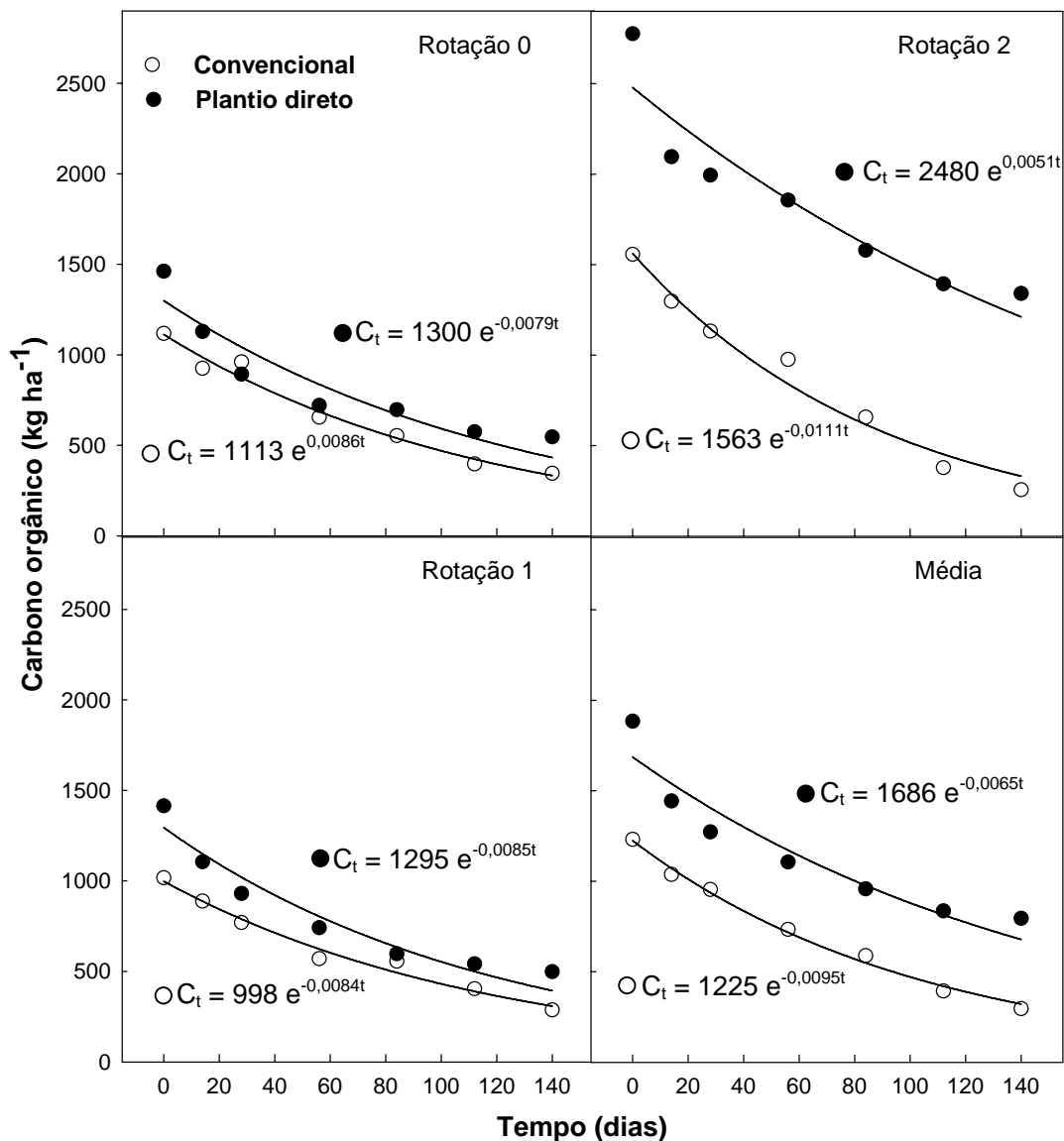


Figura 2.13. Estimativa da taxa de decomposição do C através da equação unicompartimental $C_t = C_o e^{-kt}$ (k , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, no período de abril a setembro de 1999. Em cada sistema de rotação, a cultura sublinhada indica os resíduos estudados.

No ano agrícola de verão 1998/99, avaliou-se a decomposição dos resíduos vegetais produzidos nos cultivos de inverno anteriores. Nesta avaliação utilizou-se a mesma quantidade de resíduos tanto no PC quanto no PD, proporcional à quantidade produzida em cada cultura anterior. Neste ano

agrícola, a ervilhaca produziu baixa quantidade de resíduos, ficando o consórcio desta com aveia preta (rotação 2) com quantidade inferior aos resíduos de trigo (rotação 0) e aveia (rotação 1). Avaliando-se os efeitos dos sistemas de preparo do solo, verifica-se que o PD apresentou praticamente a metade da taxa de decomposição (k) do PC.

Nos anos agrícolas 1999 e 1999/00, utilizou-se a quantidade proporcional de resíduos encontrados após a colheita das culturas em cada sistema de preparo e de culturas. Nesta situação o PD apresentou maior quantidade de resíduos que o PC, que foram proporcionalmente colocados nos sacos de decomposição. A maior quantidade de resíduos do PD em relação ao PC levou a aproximação das taxas de decomposição, entretanto, o PD continuou a apresentar menor taxa de decomposição em relação ao PC, na maior parte dos sistemas avaliados. Esta aproximação ocorreu mais por diminuição da taxa no PC do que aumento no PD, pois comparando-se os anos agrícolas com período de decomposição no período de maior temperatura, 1998/99 e 1999/00, verifica-se uma diminuição elevada da taxa de decomposição no PC e praticamente a manutenção desta taxa no PD.

No ano agrícola 1999/00, a taxa de decomposição do C foi realizada com a cultura do trigo em todas as avaliações (Figura 2.14). Verificou-se que esta taxa foi bastante semelhante, variando de 0,53 a 0,71% $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$, apesar de variação do conteúdo original de C do resíduo (C_0) de 557 a 1318 kg ha^{-1} . Nesta avaliação o PD apresentou taxa de decomposição ligeiramente inferior ao PC.

Da Ros (2004), encontrou, em média, uma taxa de decomposição (k) de 0,47% $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$ para o C da cultura aveia preta em PD, valores semelhantes aos obtidos neste trabalho, de 0,48% $\text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$ (Figura 2.12), para a mesma cultura e sistema de preparo. O autor expressou os resultados em $\text{kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$, o que não parece coerente, pois os dados seriam muito baixos.

A taxa de decomposição do C apresentou maior relação com o sistema de preparo do solo do que com o tipo de resíduo cultural. Este fato pode ser evidenciado no ano agrícola 1999, onde os resíduos da cultura do milho apresentaram decomposição inferior aos resíduos da soja no PD, mas superior a estes no PC (Figura 2.13).

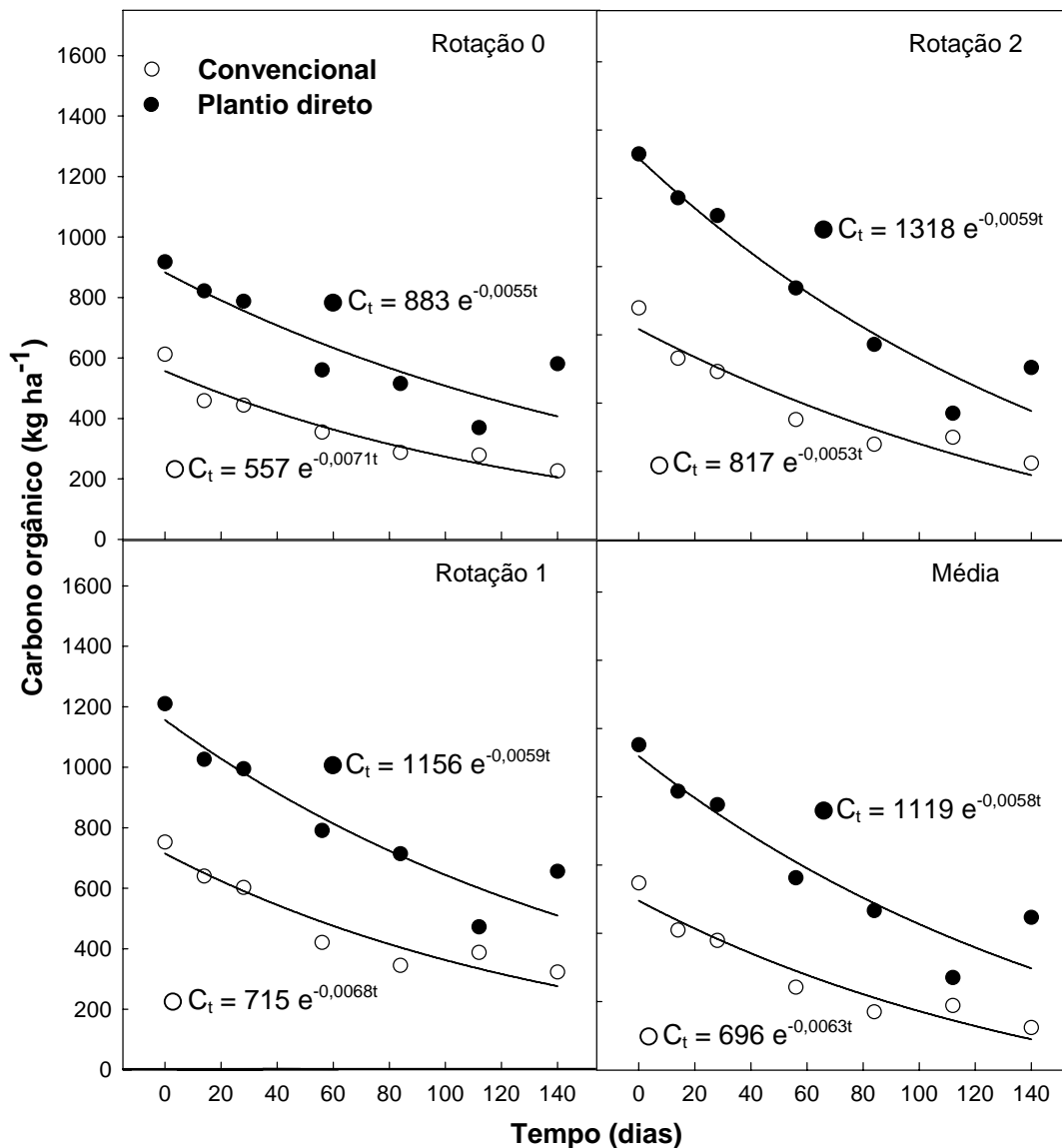


Figura 2.14. Estimativa da taxa de decomposição do C através da equação unicompartimental $C_t = C_o e^{-kt}$ (k , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) sistemas de rotação de culturas (0: trigo/soja; 1: aveia/soja/trigo/soja; 2: aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja), nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, no período de novembro de 1999 a abril de 2000. Em cada sistema de rotação, a cultura sublinhada indica os resíduos estudados.

No preparo convencional há uma aproximação maior do solo e dos microrganismos com os resíduos, pela incorporação realizada pelo implementos agrícolas, facilitando o contato e a decomposição. Por outro lado,

o plantio direto, apresenta maior umidade do solo (Figura 2.5), porém apresenta uma amenização da temperatura do solo pela palha em superfície, criando ambiente edáfico favorável à atividade microbiana e decomposição de resíduos pela maior umidade, mas desfavorável pela menor temperatura. No conjunto o ambiente formado no PD, não foi suficiente para apresentar maior atividade dos microrganismos na decomposição da palha, avaliada pela taxa de decomposição do C dos resíduos, em relação ao PC. Supõe-se que o menor contato dos microrganismos do solo com os resíduos vegetais não foi compensado pela maior umidade do solo sob PD.

A maior taxa de decomposição do PC não se correlacionou com evolução cumulativa de CO₂ (atividade microbiana), pois esta evolução foi semelhante entre os sistemas de preparo do solo (Figura 2.6), entretanto, no aspecto geral, se correlaciona com o menor estoque de C do solo (Capítulo I). Este fato indica que a fonte de CO₂ não só é a decomposição dos resíduos culturais efetuada por microrganismos, mas também esta ação sobre o C orgânico do solo, que em geral foi maior no PD. Este comportamento será melhor discutido no Capítulo IV, que trata do balanço do C no solo.

2.5 CONCLUSÕES

Não houve diferenças entre os sistemas de preparo do solo e rotações de culturas para os fluxos de C-CO₂, sendo estes influenciados principalmente pela temperatura e umidade do solo.

O elevado fluxo de C-CO₂ quantificado (9,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) exige elevada adição de resíduos via fotossíntese.

O PD manteve maior umidade do solo do que o PC, explicando parcialmente o fluxo semelhante de C-CO₂ entre os dois sistemas de preparo do solo.

A taxa de decomposição do C dos resíduos vegetais foram, em geral, maiores no PC do que no PD e não se correlacionou com evolução cumulativa de CO₂ (atividade microbiana).

3 CAPÍTULO III: FRACIONAMENTO DO CARBONO ORGÂNICO E DO NITROGÊNIO DO SOLO EM SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO

- O ESTOQUE -

3.1 RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser considerada um importante indicador dos efeitos que o preparo do solo e as culturas causam no solo. Neste atributo, frações físicas da matéria orgânica têm se correlacionado melhor aos sistemas de manejo adotados, do que à análise do carbono total do solo. Visando avaliar a correlação dos sistemas de preparo do solo e de rotações de culturas com o conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio total do solo, foi desenvolvido estudo em experimento de longa duração (19 anos) sob Latossolo Vermelho distrófico típico. Este experimento está situado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigio (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. Neste são conduzidos os preparos de solo convencional (PC) e plantio direto (PD). Foram selecionados três sistemas comerciais de rotação: sucessão (monocultura) trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (R0); rotação de inverno aveia (*Avena strigosa* Schreb)/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho (*Zea mays* L.)/nabo (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* Metzg.)/trigo/soja (R2), em cada sistema de preparo do solo. As amostras foram coletadas nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm. As coletas foram realizadas em maio de 2004, após a colheita da cultura da soja. O somatório destas camadas correspondeu às camadas de 0-20 e 0-30 cm. Após realizado o fracionamento físico do solo, foram analisados o carbono orgânico e nitrogênio total nas frações maior e menor que 53 μm , correspondendo, respectivamente, C e N na fração particulada (COP e NTP) e C e N fração associada aos minerais (COAM e NTAM). O somatório destas duas frações resultou no carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT). O PD apresentou maior teor de C e N totais e fracionados que o PC na camada superficial do solo (0-5 cm). Enquanto que o PC apresentou, mais carbono orgânico e nitrogênio total particulados (COP e

NTP) na camada de 5-10 cm. A partir da profundidade de 10 cm as diferenças entre os sistemas de preparo e culturas diminuíram. Este maior teor refletiu diretamente no estoque de C orgânico e N total do solo. O conteúdo de C apresentou valores menores quando calculado pelo método da massa equivalente em relação ao método da camada equivalente. Analisando todo o perfil avaliado (0-30 cm), no método da camada equivalente, o PD apresentou 1,6% ($1,20 \text{ Mg ha}^{-1}$) mais COT do que o PC, na média das rotações de culturas e, no método da massa equivalente esta diferença foi de 4,5% ($2,93 \text{ Mg ha}^{-1}$). No método de cálculo camada equivalente, quando o PD foi associado à rotação culturas R2 (PD R2 – $80,59 \text{ Mg ha}^{-1}$), apresentou 11,2% mais COT que a monocultura trigo/soja (R0) (PD R0 – $72,46 \text{ Mg ha}^{-1}$). Nesta camada, as rotações de culturas não apresentaram diferenças de COT no PC. No método massa equivalente não houve interação entre preparo e rotações, sendo que a rotação R2 e o PD apresentaram maior estoque de COAM e COT na média dos preparos e das rotações, respectivamente. Considerando o estoque inicial de C do solo, na camada de 0-20 cm, na implantação do experimento (1985), de $50,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, calculado pela camada equivalente, as rotações de culturas R0, R1 e R2 teriam fixado $14,2$, $17,3$ e $21,6 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, no PC e, $10,9$, $23,1$ e $32,3 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ no PD, nesta camada, em 19 anos do experimento, respectivamente. Os tratamentos extremos, PD R2 e PD R0, a diferença chegaria a $21,4 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ou $1,13 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, neste período. No método da massa equivalente, os valores se alteram significativamente, com estoque inicial de $44,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, as rotações R0, R1 e R2 teriam fixado $-3,8$, $6,7$ e $18,4 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, no PC e, $5,2$, $16,7$ e $27,7 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ no PD, na mesma camada e período, respectivamente. Para os tratamentos extremos, novamente, PD R2 e agora, PC R0. Estes resultados mostram a importância de sistemas de rotação de culturas de inverno e verão (R2), principalmente, quando associado a sistema de preparo de menor mobilização do solo (PD) no aumento do estoque de MOS e seqüestro de CO_2 da atmosfera.

3.2 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo é definida como todos os compostos que contêm carbono orgânico no solo, incluindo os microrganismos vivos e mortos, resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos, produtos de sua decomposição e substâncias orgânicas microbiologicamente e/ou quimicamente alteradas (Silva et al., 2004). Entretanto, no plantio direto pode-se também considerar os resíduos vegetais, que não entraram no processo de decomposição, presentes na superfície do solo, como matéria orgânica do solo (MOS), devido a sua importância nos efeitos sobre o solo, apesar deste tema não ser consenso entre os pesquisadores (Bayer & Mielniczuk, 1999). Entre estes efeitos estão a menor oscilação da temperatura, maior teor de umidade e controle da erosão, que não ocorrem no preparo convencional, onde a palha é incorporada.

Em solos tropicais e subtropicais, a MOS tem grande importância para o fornecimento de nutrientes às culturas, à retenção de cátions, à complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, à estabilidade da estrutura, o fluxo da água, à aeração e à atividade biológica (Bayer & Mielniczuk, 1999).

O acúmulo da MOS depende basicamente da ação das enzimas microbianas decompositoras. A diferença na estabilidade da matéria orgânica pode ser determinada pela complexidade química dos compostos orgânicos (estabilidade química) ou pela sua interação com a fração mineral, conhecida como estabilidade física. Somente a estabilidade química intrínseca das moléculas húmicas não explicam a extrema variação de idade e tempo de permanência da MOS.

Segundo Duxbury et al. (1989), a interação da matéria orgânica com a fração mineral (estabilidade física) pode ser dividida em proteção física estrutural e proteção física coloidal. Para Bayer (1996), a estabilização física da matéria orgânica é considerada como o principal fator determinante das suas taxas de decomposição no solo.

A proteção estrutural é decorrente da formação dos agregados no solo, estando a matéria orgânica no interior dos agregados, protegida da ação das enzimas dos microrganismos. O preparo do solo, por ocasionar ruptura dos

agregados e expor o C às enzimas microbianas, também é um fator de redução dos estoques de matéria orgânica.

A estabilidade coloidal é resultante das interações entre os grupos funcionais da matéria orgânica com a superfície dos argilominerais e óxidos. Neste caso, os mecanismos de interação dependem dos grupos funcionais envolvidos, do tipo de carga predominante no mineral, da presença de cátions metálicos e das condições do meio (Duxbury et al., 1989).

A argila é a fração mais reativa no solo devido ao seu tamanho coloidal. Nesta fração estão os argilominerais e os óxidos de Fe e Al. Desta forma, solos mais argilosos devem apresentar maior teor de COT, principalmente, associado aos minerais, quando comparado a solos arenosos.

No Rio Grande do Sul, levando-se em consideração apenas a textura e mineralogia dos solos, espera-se encontrar maior teor de C em solos do Planalto (mais argilosos) que em solos da Depressão Central (mais arenosos). Entre solos com o mesmo teor de argila, os que apresentam argilas do tipo 2:1 (grupo das vermiculitas) devem possuir mais C que solos que apresentam argilas do tipo 1:1, como a caulinita. Esta consideração baseia-se no fato das 2:1 serem mais reativas que as 1:1, e com isto, proporcionam maior proteção à matéria orgânica. Entre os óxidos, no Estado, predominam os de Fe, nos quais existem também diferenças de reatividade, onde a goethita é mais reativa que a hematita. Por isto, comparando-se os solos, de mesma textura, da região de Vacaria, estes terão maior teor de C, devido ao clima mais frio, a maior acidez do solo, bem como ao maior teor de goethita, que os solos da região de Cruz Alta, que são mais ricos em hematita.

3.2.1 Fracionamento físico do carbono orgânico

Existe uma tendência em se adotarem métodos físicos para o fracionamento do solo em estudos da matéria orgânica (Roscoe & Machado, 2002). Segundo os autores, os métodos físicos são considerados menos destrutivos e mais relacionados com a função e estrutura da matéria orgânica do solo no campo (*in situ*) do que os métodos químicos.

Mielniczuk (1999), apresentou uma divisão da MOS em quatro

compartimentos principais, descritos a seguir:

- a) Compartimento 1: biomassa vegetal viva – parte aérea de vegetais em desenvolvimento. É dependente dos sistemas de culturas, da fertilidade e acidez do solo, da disponibilidade de água, da temperatura e da radiação solar.
- b) Compartimento 2: resíduos vegetais, raízes e exsudatos - relacionado diretamente com o compartimento anterior, ao tipo de resíduo (relação C/N), ao grau de trituração e incorporação dos resíduos.
- c) Compartimento 3: matéria orgânica não protegida: dentro deste compartimento estão a biomassa microbiana e a fração lábil, também chamada de particulada ou grosseira (Bayer et al., 2001; Conceição, 2002). A fração particulada possui tamanho de partículas maiores que 0,05 mm (50 μm), sendo uma das principais fontes de nutrientes às plantas.
- d) Compartimento 4: matéria orgânica protegida - nesse compartimento as partículas possuem tamanho inferior a 0,05 mm, sendo responsável pela agregação permanente e CTC do solo. Este compartimento é referido como a fração da matéria orgânica do solo associada aos minerais (Bayer et al., 2001; Conceição, 2002).

Os compartimentos 1 e 2 referem-se às adições primárias de carbono ao solo (Mielniczuk, 1999). O plantio direto permite o aumento de todas frações da MOS, devido a adição contínua de fitomassa e a proteção da matéria orgânica dentro dos agregados, associado ao não revolvimento do solo (Conceição, 2002). A adição de fitomassa depende basicamente do sistema de culturas adotado. Por ser lábil, a fração particulada (>53 μm) é mais sujeita a mudanças, podendo ser utilizada como indicador da qualidade do solo para avaliar conseqüências do preparo do solo e das culturas (Conceição, 2002). Este autor verificou, em solo Argissolo Vermelho distrófico, que a fração particulada da matéria orgânica, expressa pelo C orgânico >53 μm (COP), foi mais sensível em discriminar os sistemas de culturas do que o C orgânico total (COT) e o carbono orgânico ligado aos minerais (<53 μm , COAM). Entretanto, o COAM é responsável pela maior parte do COT do solo (Bayer et al., 2001).

3.2.2 Métodos de cálculo do estoque de C do solo pela camada equivalente e massa equivalente

A metodologia tradicionalmente utilizada para o cálculo dos estoques de C é denominada de camada equivalente, realizada em função da concentração do elemento, densidade do solo e espessura da camada. Esta recebe este nome porque os teores e estoques são estimados a partir de camadas de mesma espessura para diferentes solos e sistemas de manejo (De Bona, 2005). O autor cita que, esta metodologia é aplicada para camadas de mesma espessura, independente de existir ou não diferenças entre densidades do solo.

Na metodologia de massa equivalente de solo, as espessuras das camadas são ajustadas de modo que as quantidades de solo nas camadas comparadas sejam equivalentes sob qualquer sistema de manejo. Neste cálculo é escolhido um sistema de referência para corrigir os demais tratamentos (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Verifica-se que esta é a diferença básica entre as metodologias, pois a camada equivalente não utiliza um sistema referência. De Bona (2005) salienta que esta metodologia não é válida para corrigir resultados entre solos diferentes, devido as características morfogénicas distintas e, sim para corrigir resultados obtidos em diferentes tratamentos no mesmo solo.

3.2.3 Hipóteses

O plantio direto, quando associado a sistemas de rotações de culturas com alta produção de resíduos vegetais, por longo período de tempo aumenta o estoque de carbono orgânico do solo, alcançando profundidade de 0-30 cm.

Em solos argilosos e com elevado teor de óxidos de ferro o efeito dos sistemas de culturas, pela adição de resíduos, é preponderante ao efeito do sistema de preparo.

3.2.4 Objetivos

Avaliar o potencial do plantio direto em aumentar o carbono orgânico do solo em Latossolo Vermelho distrófico típico.

Selecionar sistemas de rotações de culturas eficientes no aumento de carbono orgânico do solo.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Condições experimentais

Neste trabalho utilizaram-se as mesmas parcelas experimentais do trabalho do Capítulo I.

O solo ocorrente é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com predomínio de caulinita e óxidos de ferro (Streck et al., 2002). Entre os óxidos de ferro, a hematita está presente em maior proporção do que a goethita, conferindo cor avermelhada ao solo (Inda Jr. et al., 2004).

Os métodos de preparo do solo foram: a) convencional (PC), consistindo de grade pesada seguida de grade leve; b) plantio direto (PD), com a semeadura das culturas sob resíduos culturais remanescentes sobre a superfície do solo. Os sistemas de rotação de culturas foram: sucessão trigo/soja (R0); rotação de inverno aveia/soja/trigo/soja (R1) e rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2).

3.3.2 Avaliações

3.3.2.1 Fracionamento da matéria orgânica do solo

O fracionamento da matéria orgânica do solo para separação da fração particulada daquela associada aos minerais foi efetuado mediante separação física (Roscoe & Machado, 2002; Conceição, 2002). O solo coletado nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm foi seco ao ar, peneirado a 2 mm e armazenado. Em frascos snap-cap foram pesados 20 g do solo e adicionado 60 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) e, colocados para agitar por 15 h em agitador horizontal (Cambardella & Elliotti, 1992). Posteriormente, o

material foi passado em peneira de 53 μm (0,053 mm), com o auxílio de jato fraco de água, para separar a fração areia mais material orgânico das frações silte e argila. O material retido na peneira é considerado a fração particulada (grosseira) e o material que passa constitui a fração associada aos minerais. Para coletar a fração menor que 53 μm foi utilizado um balde plástico. O líquido do balde foi quantificado com o auxílio de uma proveta de um litro. Após a quantificação da amostra, esta foi homogenizada e retirada uma alíquota de 100 mL. O material retido e que passou na peneira foi transferido para recipientes plásticos e seco a 90 °C, nos primeiros dias, e a 50 °C após a diminuição do conteúdo de água. No material que passou pela peneira, foi adicionado 0,5 mL de CaCl_2 (110 g L^{-1}) nos 100 mL, para flocular a argila e facilitar a evaporação da água. Todos os potes onde as amostras foram armazenadas para secagem, foram previamente pesados para quantificar o material seco. Após secas e quantificadas, as amostras maiores que 53 μm foram moídas em gral e as menores que este diâmetro, no próprio pote plástico.

3.3.2.2 Análise de carbono orgânico e nitrogênio total e cálculo dos estoques desses elementos no solo

Após moídas, as amostras fracionadas foram analisadas com relação ao teor de C orgânico pela metodologia de Mebius modificado no bloco de digestão (Yeomans & Bremner, 1988; Nelson & Sommers, 1996; Rheinheimer et al., no prelo), obtendo-se o carbono orgânico particulado (COP), na fração > 53 μm , e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM), na fração < 53 μm . Os teores de N total, nestas frações, foram determinados por digestão ácida e destilação de arraste de vapor em semi-micro Kjeldhal, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Calcularam-se os estoques de C orgânico e N total do solo em função da camada e da massa equivalente de solo (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Segundo a metodologia da camada equivalente de solo, os estoques de C orgânico e N total do solo foram calculados levando-se em consideração considerou-se as densidades do solo obtidas por Jantalia (2005) para as

rotações R0 e R2 e a média destas rotações para a rotação R1 (Apêndice 3.3), teores desses elementos no solo e espessura de cada camada amostrada, utilizando-se a seguinte equação:

$$\text{Estoque}_{ce} = cc \times ds \times E \times A \times f_{kg}$$

onde:

Estoque_{ce} = massa de C ou N por unidade de área em camada equivalente (Mg ha^{-1});

cc = concentração de C ou N (g kg^{-1} de solo);

ds = densidade do solo na camada (Mg m^{-3});

E = espessura de solo da camada (m);

A = unidade de área, neste caso, 1 ha (10000 m^2);

f_{kg} = fator de conversão de kg para Mg ($0,001 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Assim como na camada equivalente, no método da massa equivalente considera-se a massa relativa de solo nos diferentes tratamentos:

$$M_{\text{solo}} = ds \times E \times A$$

onde:

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

Neste cálculo foi utilizada a massa do solo, considerando-se a densidade do solo da área sob pastagem natural (campo nativo) como tratamento referência, que resultou num valor positivo ou negativo, conforme a relação dos tratamentos, de acordo com a seguinte equação:

$$E_{ad/sub} = (M_{ref.} - M_{trat.}) \times f_{ha} / ds_{trat.}$$

onde:

$E_{ad/sub}$ = espessura de solo da camada a ser adicionada (+) ou subtraída (-) (m);

$M_{ref.}$ = massa equivalente de solo do tratamento referência (Mg ha^{-1});

$M_{trat.}$ = massa equivalente de solo do tratamento (Mg ha^{-1});

f_{ha} = fator de conversão de ha para m^2 ($0,0001 \text{ ha m}^{-2}$).

A área sob pastagem natural (campo nativo), utilizada como tratamento referência para o cálculo da massa equivalente e como representante das condições iniciais antes da introdução da agricultura, foi amostrada por Jantalia (2005), localizada a ~2 km de distância. Esta área era utilizada como área de descanso e pastejo para cavalos, com predomínio de espécies gramíneas de crescimento rasteiro como a grama forquilha (*Paspalum notatum* Flüegge). O autor determinou que o solo da área experimental e da área sob campo nativo pertencem a mesma classe textural, através do conteúdo de areia. Os dados da densidade do solo e da concentração e estoque de C da área sob campo nativo encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Densidade do solo, concentração e estoque de C da área de campo nativo, Cruz Alta, RS (Jantalia, 2005).

Camada	Densidade do solo	Concentração de C	Estoque de C
cm	Mg m ⁻³	g kg ⁻³	Mg ha ⁻¹
0-5	1,29	26,87	17,33
5-10	1,26	22,13	13,94
10-15	1,24	20,50	12,71
15-20	1,23	20,13	12,38
20-30	1,22	18,70	22,81
0-20	-	-	56,36
0-30	-	-	79,18

Neste método de cálculo também se considerou a densidade do solo obtida por Jantalia (2005) para as rotações R0 e R2 e a média destas rotações para a rotação R1. As massas de C ou N em massa equivalente é obtida pela equação:

$$\text{Estoque}_{\text{me}} = \text{cc} \times \text{ds} \times (\text{E} \pm \text{E}_{\text{ad/sub}}) \times \text{A} \times \text{f}_{\text{kg}}$$

onde:

$\text{Estoque}_{\text{me}}$ = massa de C ou N por unidade de área em massa equivalente (Mg ha⁻¹).

3.3.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, com uso do programa computacional SAS (SAS, 1996). A normalidade dos dados foi verificada através do teste Shapiro-Wilk para o resíduo, considerando 10% de probabilidade, ou seja, abaixo deste valor o teste é significativo e os dados não seguem a distribuição normal.

Para as causas de variação isoladas foi considerado 5% de significância e para as interações 10% pelo teste F. Para valores iguais ou menores que estes, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste DMS também a 5% de probabilidade do erro.

As análises de correlação entre COT e as frações particulada ($>53 \mu\text{m}$) e associada aos minerais ($<53 \mu\text{m}$) foram feitas pelos resíduos dos dados de cada repetição.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Distribuição do C orgânico total e fracionado no perfil do solo

As análises de C na fração particulada ($>53 \mu\text{m}$) foram mais variáveis que na fração associada aos minerais ($<53 \mu\text{m}$), fato este verificado pelo maior número de repetições de re-análise de valores discrepantes. Isto, provavelmente, ocorreu devido a presença de partículas grosseiras que dificultam a homogeneidade da amostra.

A Figura 3.1 ilustra o comportamento do carbono orgânico nos sistemas de preparo e rotações de culturas, ao longo do perfil analisado. Devido a deposição de resíduos culturais na superfície do solo, o plantio direto apresentou maior conteúdo de COP e COAM, bem como de COT na camada superficial do solo. O aumento do COAM e COT em profundidade abaixo de 5 cm, no preparo convencional é reflexo da inversão das camadas pela gradagem, apresentando conteúdo maior que o plantio direto. Entretanto, em relação a superfície (0-5 cm) o COP apresentou ligeira diminuição na camada de 5-10 cm no preparo convencional, mas mantendo-se superior ao PD.

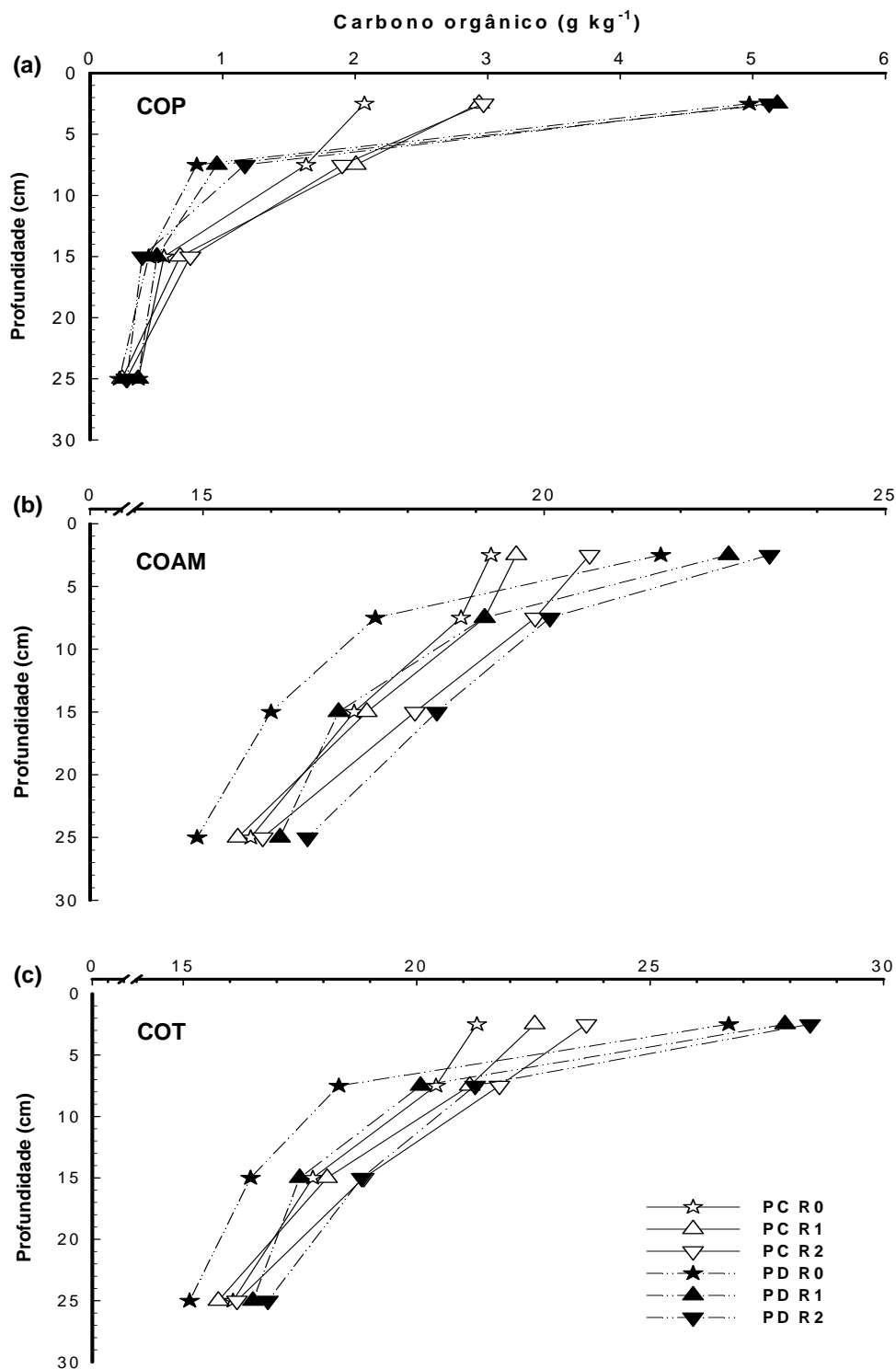


Figura 3.1. Distribuição dos teores de carbono orgânico particulado (COP) (a), associado aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c) nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2).

Este comportamento provavelmente foi devido a coleta de solo após a colheita da soja e antes da ação dos implementos, causando maior concentração de COP na superfície do solo, mesmo no PC. Para esta fração, em maior profundidade, acima de 15 cm, os efeitos dos preparos são menos pronunciados. A partir de 5 cm, a monocultura no PD (PD R0), apresentou menor teor de COAM e COT, quando comparada aos demais tratamentos.

Na Figura 3.2, de forma ilustrativa, verifica-se o predomínio da concentração do COAM sobre o COP, em todas as camadas, com maior participação do COP na camada superficial do solo (0-5 cm).

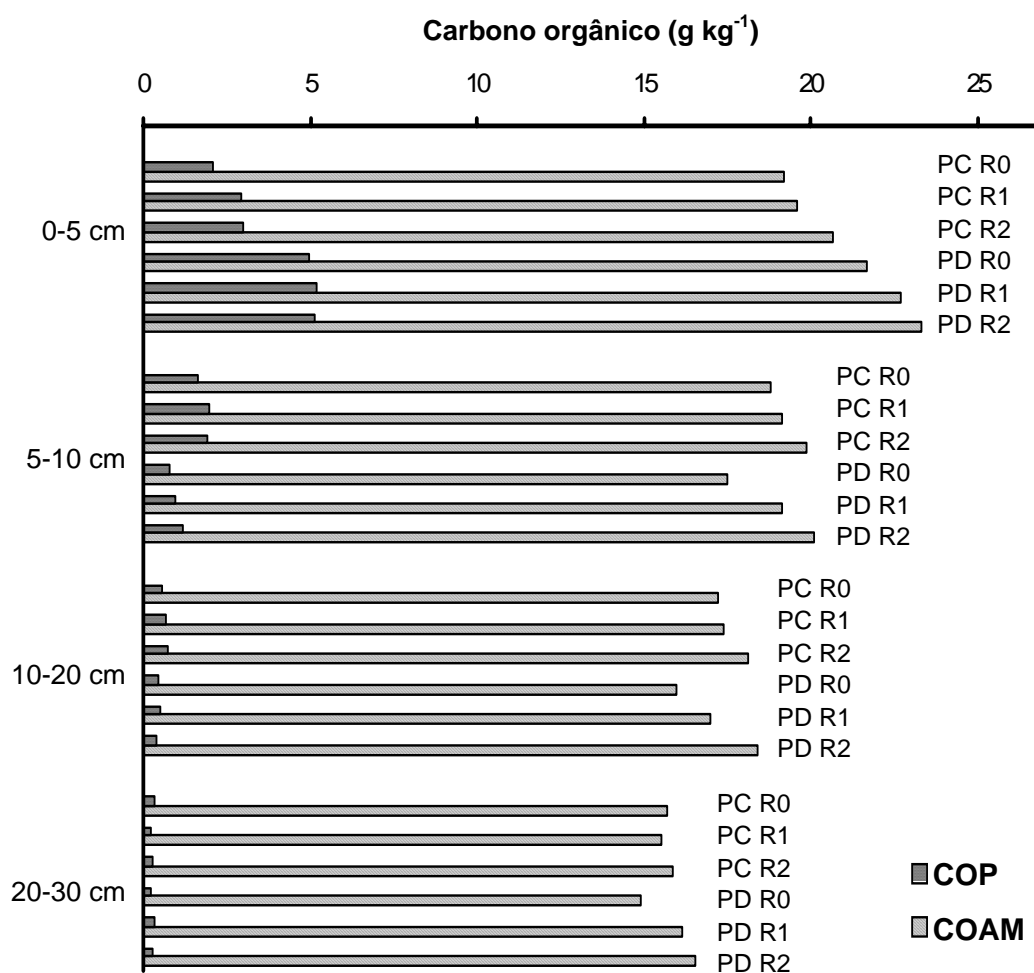


Figura 3.2. Concentração de carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM) nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca /milho/nabo/trigo/soja (R2), nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm.

O C orgânico da fração associada aos minerais (COAM) representou de 81,4 (0-5 cm) a 98,5% (20-30 cm) do teor total de C orgânico do solo.

3.4.2 Estoques de C orgânico no solo

3.4.2.1 Método da camada equivalente x massa equivalente

Os resultados obtidos referentes ao estoque de carbono orgânico total e seu fracionamento calculados pelo método da camada equivalente são apresentados na Tabela 3.2 e pelo método da massa equivalente na Tabela 3.3.

Para a metodologia da massa equivalente utilizou-se o solo sob campo nativo como referência, amostrado por Jantalia (2005), onde as correções e ajustes na espessura das camadas foram realizados com base na massa de solo das camadas individualizadas do solo sob campo nativo (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Em todas as camadas avaliadas, o método de massa equivalente diminui o estoque de COT e fracionado em todos os tratamentos, em comparação ao método da camada equivalente, com comportamento estatístico semelhante em ambos os métodos de cálculo.

Na análise do perfil de 0-20 cm e de todo o perfil amostrado, camada de 0-30 cm, o plantio direto apresentou mais carbono orgânico na fração particulada (COP), em ambos os métodos de cálculo. Nestas camadas, houve interação entre os tratamentos no cálculo camada equivalente, o que não ocorreu na massa equivalente. Na camada de 0-30 cm, o PD apresentou 1,6% ($1,20 \text{ Mg ha}^{-1}$) mais COT do que o PC, na média das rotações de culturas e, no método da massa equivalente esta diferença foi de 4,5% ($2,93 \text{ Mg ha}^{-1}$).

O solo sob campo nativo apresentou menores densidades que o solo cultivado sob preparo convencional e plantio direto, em todas as camadas (Tabela 3.1 e Apêndice 3.2). O solo sob PD apresentou densidades maiores na camada superficial (0-10 cm) em relação ao PC. De Bona (2005), em Argissolo vermelho (186 g kg^{-1} de argila) encontrou também maiores densidades para o PC e PD nas camadas superficiais (0-5 cm), mas menores nas camadas subsuperficiais (5-20 cm) em relação ao solo sob campo nativo.

Tabela 3.2. Estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 μm), associado aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da camada equivalente.

Rotação de culturas ¹	COP			COAM			COT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	0-5 cm								
R0	1,40	3,46	2,43	12,97	15,09	14,03	14,37	18,55	16,46 b
R1	1,98	3,55	2,77	13,22	15,55	14,39	15,21	19,10	17,15 ab
R2	1,99	3,43	2,71	13,85	15,61	14,73	15,84	19,04	17,44 a
Média	1,79 B ³	3,48 A		13,35 B	15,42 A		15,14 B	18,90 A	
	5-10 cm								
R0	1,13	0,56	0,85	13,05	12,27	12,66 b	14,19	12,83	13,51 b
R1	1,37	0,66	1,02	13,10	13,20	13,15 ab	14,48	13,83	14,17 ab
R2	1,28	0,79	1,04	13,41	13,66	13,53 a	14,70	14,45	14,57 a
Média	1,26 A	0,67 B		13,19	13,04		14,45 A	13,71 B	
	10-20 cm								
R0	0,80	0,58	0,69	24,62 A	21,12 Bc	22,87	25,42 A	21,70 Bc	23,56
R1	0,94	0,68	0,81	24,19 A	22,76 Bb	23,48	25,13 A	23,44 Bb	24,29
R2	1,02	0,53	0,78	24,44 B	24,88 Aa	24,66	25,47 A	25,41 Aa	25,44
Média	0,92 A	0,60 B		24,42	22,92		25,34	23,52	

Continua...

Continuação da Tabela 3.2.

Rotação de culturas ¹	COP			COAM			COT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	20-30 cm								
R0	0,47 Aa	0,28 Bb	0,38	20,41	19,09	19,75	20,88	19,37 b	20,13
R1	0,31 Bb	0,47 Aa	0,39	20,16	20,81	20,49	20,48	21,27 a	20,88
R2	0,36 Aab	0,36 Aab	0,36	20,64	21,33	20,98	21,00	21,69 a	21,34
Média	0,38	0,37		20,40	20,41		20,78	20,78	
	0-20 cm								
R0	3,33	4,60	3,97	50,65 A	48,48 Bc	49,56	53,97 A	53,08 Ac	53,53
R1	4,30	4,89	4,59	50,52 A	51,51 Ab	51,01	54,81 A	56,40 Ab	55,61
R2	4,29	4,76	4,53	51,70 B	54,15 Aa	52,92	56,00 B	58,90 Aa	57,45
Média	3,97 B	4,75 A		50,95	51,38		54,93	56,13	
	0-30 cm								
R0	3,80	4,89	4,34	71,06 A	67,57 Bc	69,31	74,86 A	72,46 Ab	73,66
R1	4,61	5,35	4,98	70,68 A	72,32 Ab	71,50	75,29 A	77,67 Aa	76,48
R2	4,65	5,12	4,88	72,34 B	75,47 Aa	73,91	76,99 B	80,59 Aa	78,79
Média	4,35 B	5,12 A		71,36	71,79		75,71	76,91	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. As amostragens foram feitas após a cultura da soja (sublinhadas). ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, para sistemas de preparo, e minúsculas na coluna, para rotações, não diferem pelo teste DMS a 5% de significância.

Tabela 3.3. Estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 μm), associado aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da massa equivalente.

Rotação de culturas ¹	COP			COAM			COT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	0-5 cm								
R0	1,28	2,98	2,13	11,92	12,99	12,46 b	13,21	15,97	14,59 c
R1	1,82	3,16	2,49	12,15	13,85	13,00 b	13,97	17,01	15,49 b
R2	1,86	3,20	2,53	12,92	14,57	13,74 a	14,77	17,77	16,27 a
Média	1,65 B ³	3,11 A		12,33 B	13,80 A		13,99 B	16,92 A	
	5-10 cm								
R0	0,93	0,45	0,69	10,69	9,86	10,28 c	11,62	10,32	10,97 c
R1	1,17	0,55	0,86	11,13	11,01	11,07 b	12,30	11,56	11,93 b
R2	1,13	0,69	0,91	11,78	11,80	11,79 a	12,91	12,49	12,70 a
Média	1,07 A	0,56 B		11,20	10,89		12,28 A	11,46 B	
	10-20 cm								
R0	0,57	0,52	0,54	17,58	18,61	18,09 c	18,15	19,12	18,64 c
R1	0,73	0,58	0,65	18,81	19,41	19,11 b	19,54	19,98	19,76 b
R2	0,86	0,45	0,65	20,48	20,85	20,67 a	21,34	21,29	21,32 a
Média	0,72 A	0,51 B		18,96 A	19,62 B		19,68	20,13	

Continua...

Continuação da Tabela 3.3.

Rotação de culturas ¹	COP			COAM			COT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	20-30 cm								
R0	0,42 Aa	0,26 Bb	0,34	18,29	17,63	17,96	18,71	17,89	18,30
R1	0,28 Bb	0,42 Aa	0,35	18,07	18,93	18,50	18,35	19,35	18,85
R2	0,32 Aab	0,33 Aab	0,32	18,49	19,40	18,95	18,81	19,73	19,27
Média	0,34	0,34		18,28	18,65		18,62	18,99	
	0-20 cm								
R0	2,78	3,94	3,36	40,20	41,47	40,83 c	42,98	45,41	44,19 c
R1	3,72	4,29	4,01	42,09	44,27	43,18 b	45,81	48,56	47,18 b
R2	3,84	4,33	4,09	45,18	47,21	46,20 a	49,02	51,55	50,29 a
Média	3,45 B	4,19 A		42,49 B	44,32 A		45,94 B	48,50 A	
	0-30 cm								
R0	3,20	4,21	3,70	58,48	59,09	58,79 c	61,69	63,30	62,49 c
R1	4,00	4,71	4,36	60,16	63,20	61,68 b	64,16	67,91	66,03 b
R2	4,16	4,66	4,41	63,68	66,61	65,15 a	67,84	71,28	69,56 a
Média	3,79 B	4,53 A		60,77 B	62,97 A		64,56 B	67,49 A	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. As amostragens foram feitas após a cultura da soja (sublinhadas). ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, para sistemas de preparo, e minúsculas na coluna, para rotações, não diferem pelo teste DMS a 5% de significância.

Em relação aos sistemas, o autor encontrou maiores densidades no PC nas camadas superficiais e menores nas camadas subsuperficiais, em relação ao PD.

Os estoques de C orgânico foram menores no método da massa equivalente quando comparado ao método da camada equivalente, devido a maior densidade do solo sob sistemas de preparo em relação a campo nativo, usado como referência. Na camada de 0-30 cm, a redução no conteúdo de COT da massa equivalente para camada equivalente foi, em média, 5,89 e 8,87 Mg ha⁻¹, correspondendo a 7,8 e 11,2%, no PC e no PD, respectivamente. Observa-se na Figura 3.3, que o método da camada equivalente superestimou em 16% (coeficiente angular = 1,1561 ou 15,6%) os estoques de COT nas diferentes camadas em comparação ao método da massa equivalente. Verifica-se alto coeficiente de determinação da regressão ($R^2 = 0,90$).

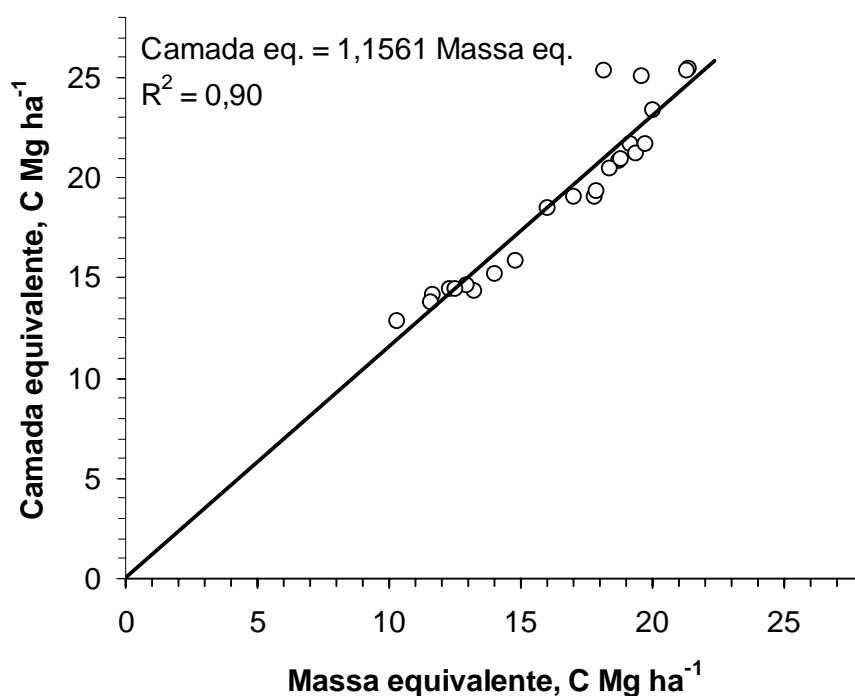


Figura 3.3. Relação entre o estoque de carbono orgânico total calculado pelos métodos da camada equivalente e massa equivalente, em sistemas de preparo do solo e de culturas, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30cm. Média de quatro repetições.

Para De Bona (2005), os métodos de cálculo não afetaram expressivamente os estoques de C, devido à pequena variação da densidade do solo entre os sistemas de preparo e estes em relação à referência campo nativo. Observa-se que as densidades de solo encontradas por De Bona (2005), em solo mais arenosos, nos sistemas de preparo, foram maiores (em média 1,64) que as encontradas neste trabalho (em 1,35), em solo mais argiloso, na camada de 0-20 cm. Entretanto, em ambos os trabalhos, os estoques de C no PD foram menores quando calculados pelo método da massa equivalente quando comparado ao método da camada equivalente, o que não ocorreu para De Bona (2005) no PC.

Estimativas de diferenças nos estoques de C orgânico no solo entre sistemas de manejo podem ser decorrentes do método de cálculo empregado (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Solos com maiores densidades apresentaram maior quantidade de solo num mesmo volume amostrado, podendo levar a um maior teor de elementos, como C e N, devido à amostragem e não ao efeito dos sistemas de manejo.

Jantalia (2005), também corrigindo as massas de solo, mas por metodologia que considera apenas a camada mais profunda avaliada (Neill et al., 1997; citado por Jantalia, 2005), obteve, neste experimento, estoques de COT mais semelhantes aos obtidos neste trabalho pelo método da camada equivalente (sem correção) do que pelo método da massa equivalente (com correção da massa de solo). Os valores obtidos por Jantalia (2005) foram 72,5, 76,6, 77,5 e 81,1 Mg ha⁻¹ para PD R0, PC R0, PC R2 e PD R2, respectivamente, na camada de 0-30 cm, muito próximos aos obtidos neste trabalho no método de cálculo camada equivalente (Tabela 3.2). Entretanto, a metodologia utilizada por Jantalia (2005), somente corrige a camada profunda, 80-100 cm, servindo para comparar tratamentos na mesma camada amostrada, no caso 0-100 cm, sem haver correção para as camadas superiores. Assim, esta metodologia equivale ao da camada equivalente, para a camada de 0-30 cm, utilizada neste trabalho.

Neste estudo, as discussões serão realizadas, em relação aos resultados obtidos pelos métodos da camada equivalente e da massa equivalente, devido a acreditar-se que este último método distingue melhor as

diferenças causadas pelos sistemas de preparo, daquelas oriundas das alterações físicas do solo provocadas pelas práticas de preparo do solo (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). No entanto, estas alterações físicas podem ser também consideradas como parte do sistema de preparo, justificando o uso do primeiro método e estas metodologias de cálculo não estão ainda totalmente definidas.

3.4.2.2 Sistemas de preparo e rotação de culturas

Para a camada de 0-5 cm, o carbono orgânico particulado (COP) não apresentou interação entre sistema de preparo de solo e rotações de culturas. Na média entre as rotações, o plantio direto apresentou diferença estatística em relação ao convencional, em média 91,5% a mais de estoque de C nesta fração, em ambos métodos de cálculo. Para o carbono associado aos minerais (COAM) também não houve interação entre sistemas de preparo e rotação de culturas. Neste compartimento, novamente o plantio direto foi superior ao preparo convencional na média das rotações, em 13,7%. Estas diferenças nas frações se refletiram no carbono orgânico total (COT), onde o plantio direto apresentou novamente superioridade ao preparo convencional em 22,9%, na média das rotações e métodos de calculas. As rotações de culturas não apresentaram diferenças de COP e COAM, mas sim em COT, onde a rotação R2 foi superior as demais, na média dos sistemas de preparo, com exceção da rotação R1, no cálculo por camada equivalente. Na comparação de tratamentos extremos, PC R0 e PD R2, ocorreu diferenças de 4,67 e 4,56 Mg ha⁻¹, com uma taxa de 49,16 e 48,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹ (camada equivalente e massa equivalente), pelo PD R2 (Tabelas 3.2 e 3.3). Na média das rotações (PC x PD) esta taxa foi de 39,58 e 30,84 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹, maior no PD em relação ao PC, respectivamente para camada equivalente e massa equivalente.

Na camada 5-10 cm, não houve interação entre sistemas de preparo e de culturas para C fracionado e total e, na média, o PC foi superior ao PD em 89,6 e 6,3%, em COP e COT, respectivamente. A rotação R2 foi superior às demais em COAM e COT, na média dos sistemas de preparo, com exceção da

rotação R1, no cálculo por camada equivalente. O PC, na média das rotações, foi superior ao PD, em 0,74 e 0,82 Mg ha⁻¹ em COT, alcançando taxa de 7,79 e 8,63 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹, para camada e massa equivalente, respectivamente. Este maior teor de carbono do preparo convencional, nesta camada de 5-10 cm, pode ser atribuído a profundidade de trabalho das gradagens, utilizadas neste trabalho para este preparo. Segundo Ruedell (1995), são utilizadas duas gradagens, uma operando de 12 a 15 cm de profundidade, com grade pesada (globe) e, outra de 8 a 10 cm, com grade niveladora.

Em maior profundidade do solo, camada 10-20 cm, o COP foi superior no convencional, mas com uma diferença menor (47,3%) em relação ao PD, em relação à camada anterior, na média dos métodos de cálculo. No COAM e COT, calculados pela camada equivalente, houve interação e a rotação R2 foi superior no PD em relação ao PC, bem como esta rotação foi superior às demais dentro do plantio direto. Para o preparo convencional não houve diferença entre as rotações. No cálculo por massa equivalente, não houve interação, obtendo-se maior estoque de COAM e COT na rotação R2, na média dos sistemas de preparo. Salienta-se o maior estoque de C na profundidade de 10-20 cm de solo obtida na rotação R2, podendo ser efeito da ação do sistema radicular das culturas utilizadas nesta rotação.

Na camada de 20-30 cm, não houve efeito do sistema de preparo. Também, praticamente não houve influência dos sistemas de culturas, com exceção à monocultura no PD, que apresentou menor valor de COT, no método de cálculo camada equivalente (Tabela 3.2).

Na análise do perfil de 0-20 cm e de todo o perfil amostrado, camada de 0-30 cm, o comportamento dos estoques de C nos tratamentos foi semelhante. Na camada de 0-30 cm, o PD foi, na média das rotações, superior ao PC em COP, no método da camada equivalente e, em COP, COAM e COT, no método da massa equivalente. O PD, na média das rotações, apresentou 1,58% mais COT na camada equivalente, sem ter diferença significativa, e mais 4,54% na massa equivalente do que o PC. Nesta camada, a rotação R2 apresentou 4,68% mais COT no PD do que no PC, com uma taxa relativa de 6,31 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹, no cálculo por camada equivalente. No PD, a sucessão R0 apresentou o menor teor de COAM e COT, em relação a R1 e R2, no cálculo

camada equivalente. Quando calculado por massa equivalente, não houve interação, e a rotação R2 foi superior em COAM e COT, apresentando 5,3 e 11,3% mais COT que R1 e R0, respectivamente. Apesar da superioridade da rotação R2, destaca-se o efeito positivo da aveia preta na rotação somente de inverno com trigo (R1), apresentando menor diferença em COT, na camada de 0-30 cm, que a rotação intensiva de inverno e verão.

O maior estoque de C nas camadas de 0-20 e 0-30 cm foi observado no PD com rotação de culturas em relação à monocultura, sendo que a monocultura em PD não diferiu da monocultura em PC. Esse resultado evidencia que o PD com baixa adição de resíduos não foi eficiente em recuperar o estoque de C do solo.

A diferença em COT da monocultura (R0) para a rotação de inverno e verão (R2), no método de cálculo camada equivalente, foi de 2,13 Mg ha⁻¹ no PC e de 8,13 Mg ha⁻¹ no PD, na camada de 0-30 cm, ou seja, no solo sob PC esta diferença foi 282% inferior do que no solo sob PD. Entretanto, no método de massa equivalente, esta diferença foi 6,15 Mg ha⁻¹ no PC e de 7,98 Mg ha⁻¹ no PD, ficando esta diferença no PC em apenas 30% em relação ao encontrado no PD.

O fato das rotações não apresentarem diferenças significativas de COT no PC, indica que, nestas condições, os sistemas de rotação de culturas podem ter importância maior no preparo PD do que no PC. A interação de sistemas de preparo conservacionistas, como o plantio direto, associado a sistema de rotação de culturas com maior aporte de resíduos orgânicos podem contribuir mais para o aumento do C no solo. Este fato pode ser explicado pela produção de massa vegetal e o manejo da cultura em cada sistema de rotação. Enquanto que na sucessão R0, o trigo e a soja são colhidos, na rotação R1, além da aveia produzir mais massa vegetal que o trigo (Capítulo I), esta é manejada no pleno florescimento, deixando toda a sua massa vegetal no solo. A rotação R2 apresenta as culturas de aveia consorciada com ervilhaca, aveia e nabo forrageiro, como coberturas do solo, além do milho, que mesmo colhido produz mais massa vegetal que a soja. Entretanto, este maior aporte de resíduos pode ser anulado ou minimizado pela ação dos implementos utilizados no PC.

A camada 0-5 cm representou, na média dos sistemas de culturas e métodos de cálculo, cerca de 41% no PC e 68% no PD, do estoque de C na fração particulada na camada de 0-30 cm (Figura 3.4). Para as camadas de 5-10 e 10-20 cm, esta representatividade se inverte para os sistemas de preparo, com 28 e 13% para o PC e 21 e 12% para o PD, nas respectivas camadas. Já para a camada 20-30 cm as diferenças diminuem. Entretanto, o maior estoque de COP na camada de 0-5 cm no plantio direto não foi compensado pelo maior estoque de COP na camada 5-20 cm do solo sob PC, de modo que na camada total de solo avaliada (0-30 cm), o PD foi significativamente superior ao PC (Tabelas 3.2 e 3.3). Na fração associada aos minerais (COAM) e no total (COT), esta representatividade do estoque de C em cada camada foi no geral equivalente entre os sistemas, variando de 16 a 35%.

De Bona (2005), trabalhando com Argissolo (186 g kg⁻¹ de argila de 0-20 cm), encontrou maior estoque de COT nas camadas superficiais (0-5 cm) no PD e em camadas subsuperficiais no PC (10-20 cm). No caso deste trabalho, o PC teve maior diferença de COT na camada de 5-10 cm (1,31 Mg ha⁻¹). Na camada de 10-20 cm embora o PC tenha 1,25 Mg ha⁻¹ mais COT não foi estatisticamente diferente. As diferenças entre os trabalhos podem estar relacionadas ao tipo de solo e aos implementos utilizados no PC. A interação dos compostos orgânicos com o maior conteúdo de argila, como no Latossolo utilizado neste trabalho (570 g kg⁻¹ de argila de 0-20 cm) dão maior estabilidade à fração orgânica associada aos minerais (COAM), o que se reflete no estoque total de C (COT), quando comparado a solos menos argilosos como o Argissolo. No trabalho de De Bona (2005) o PC foi conduzido através de aração e gradagens o que pode ter maior impacto sobre o estoque de C, quando comparado a gradagens (pesada e leve) utilizadas nos últimos anos e na maior parte de condução deste trabalho. Poderia também se supor que o trabalho mais superficial das gradagens que o arado, levaria as diferenças, entre os preparos, ocorrerem na camada de 5-10 cm e não de 10-20 cm como no caso do solo arado.

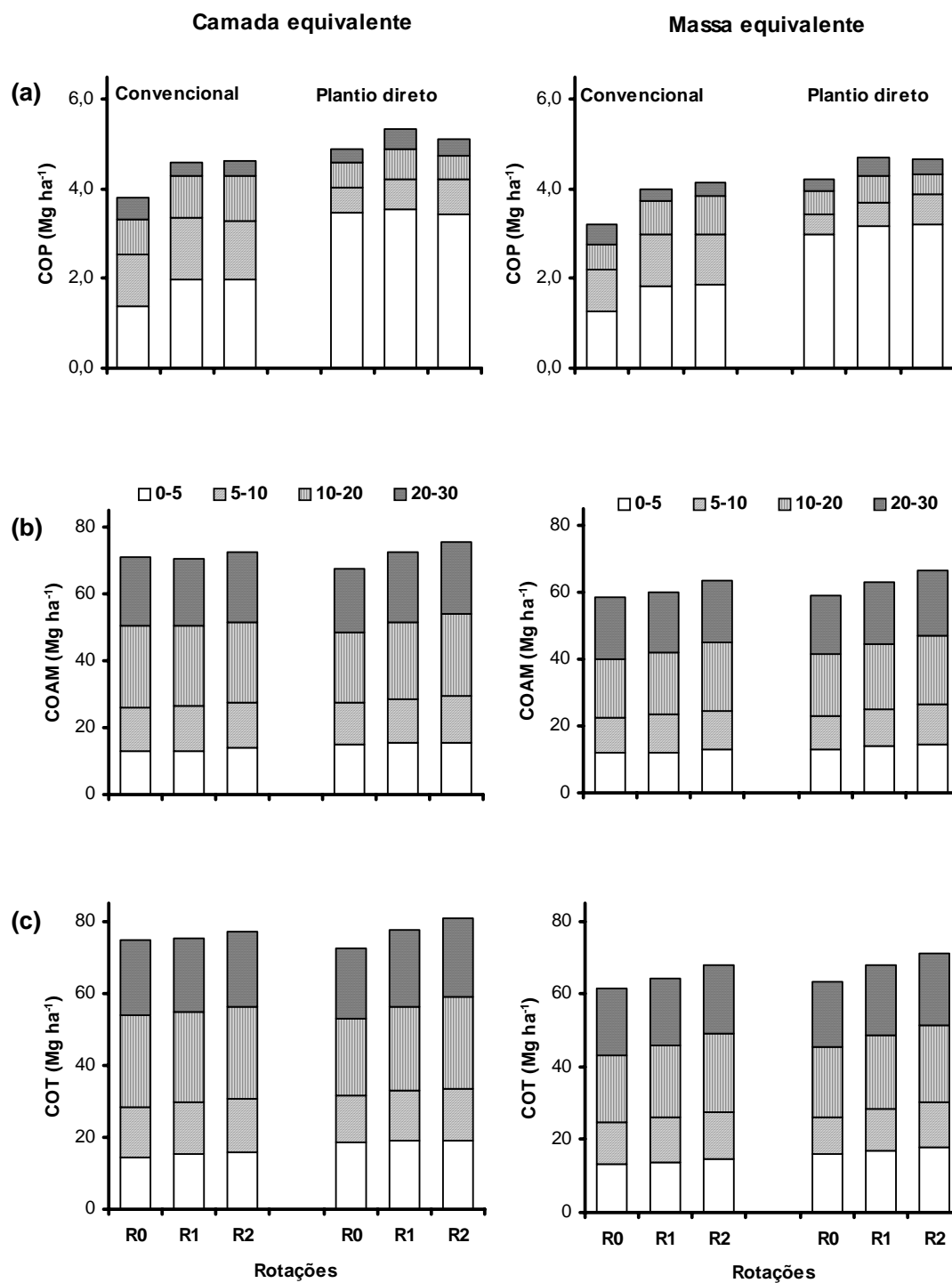


Figura 3.4. Estoques de carbono orgânico particulado (COP) (a), associado aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c) do solo cultivado nos preparos convencional e plantio direto sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/ nabo/trigo/soja (R2), na camada de 0-30 cm e contribuição das camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20 cm, calculados pela camada equivalente e massa equivalente.

Para Reicosky & Lindstron (1993), as gradagens resultam em menor fluxo de C-CO₂ quando comparadas à preparos convencionais que usam aração, devido ao menor distúrbio causado ao solo. Isto indica que preparos com gradagens, como neste trabalho, podem apresentar mais carbono orgânico que preparos com aração, pois apresentariam menores perdas pelo fluxo de C-CO₂. Destaca-se também, que a erosão do solo, outra fonte importante de perda de carbono, praticamente não ocorre no preparo convencional conduzido neste trabalho, devido a pequena declividade da área. Em trabalho realizado utilizando modelos de simulação em solos do RS, Debarba (2002), concluiu que a erosão do solo foi o principal processo de perda de carbono orgânico, a partir de 1981, período este anterior a instalação do experimento localizado na FUNDACEP (1985), utilizado neste trabalho.

O tratamento preparo convencional sem rotação (PC R0) pode ser considerado referência por ter mobilização do solo e ausência de rotação, portanto, maior taxa de mineralização e menor adição de resíduos. Sistemas de preparo que expõem o solo à altas temperaturas e ciclos rápidos de umedecimento e secagem, associados a menores adições de resíduos culturais, fazem com que ocorra degradação gradual e diminuição de matéria orgânica do solo (Conceição, 2002). Isto é constatado quando, comparando-se as rotações de culturas (R1 e R2) com a monocultura (R0), no PC, verifica-se que estas aumentaram o estoque de COT e fracionado em praticamente todas as camadas (Figuras 3.5 e 3.6), embora não estatisticamente (Tabelas 3.2 e 3.3). Neste preparo, a R0 apresentou diferenças em COT de 1,81 e 4,04 Mg em relação a R1 e R2, perdendo ou deixando de incorporar C a uma taxa de 4,76 e 10,62 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹, respectivamente, na camada de 0-20 cm, na média dos métodos de cálculo.

Verifica-se que na camada de 0-5 cm houve expressivo ganho de C no PD em relação ao PC. Em relação ao tratamento referencia (PC R0), a taxa do PD foi de 7,84 e 7,50% ao ano de ganho de COP e de 1,66 e 1,48% ao ano para COT, na média das rotações, para camada e massa equivalente, respectivamente. Seguindo estas taxas, supõe-se um período de 13 e 64 anos para dobrar o COP e o COT, respectivamente, na camada de 0-5 cm, com a utilização do PD, na média para camada e massa equivalente. Para o PD R2, este tempo diminuiria para 57 anos para o COT, mas continuando ainda alto.

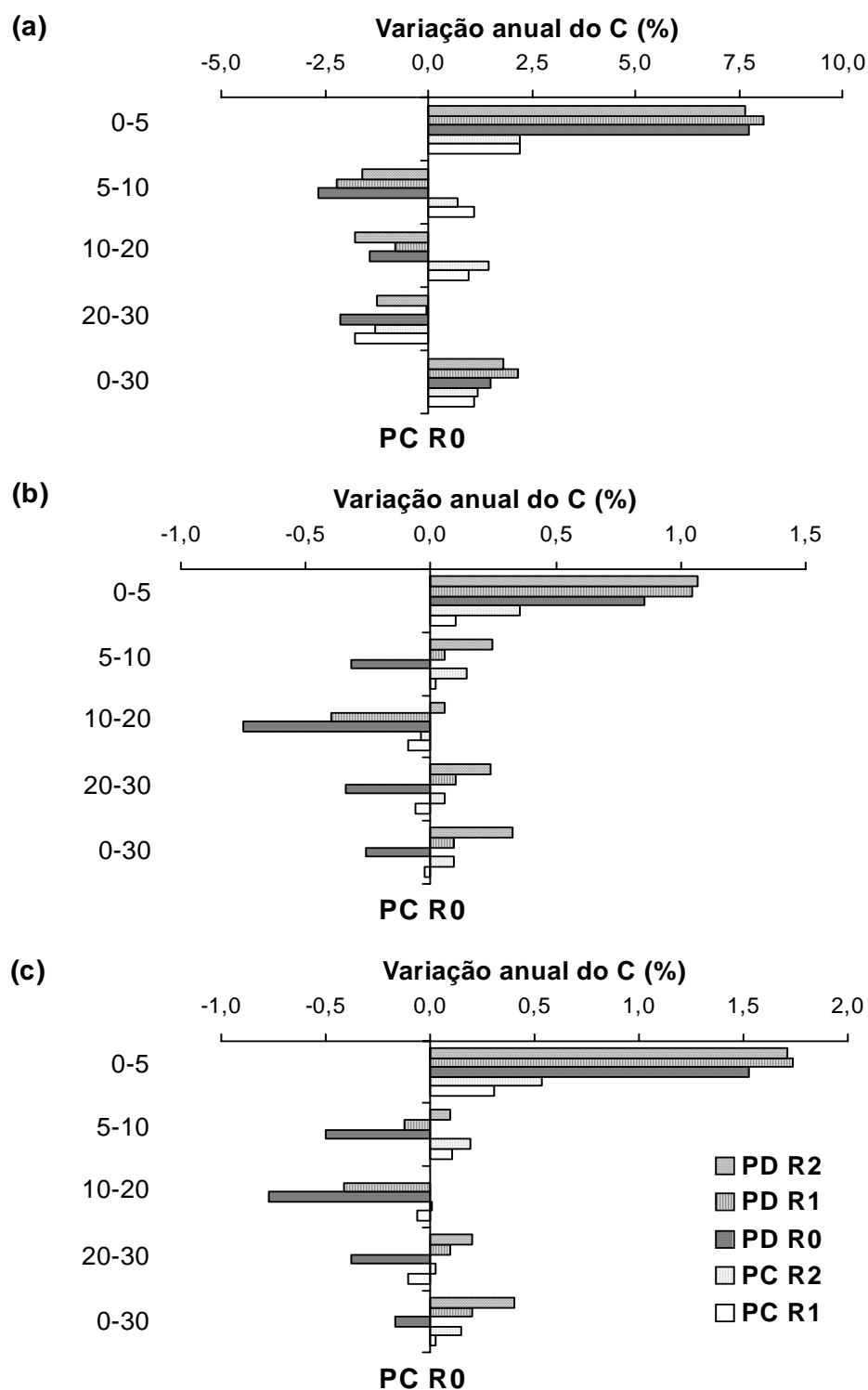


Figura 3.5. Taxas diferenciais anuais do C orgânico comparativamente ao preparo convencional sem rotação (PC R0), para quatro camadas e camada total de solo (cm), nas frações particulada (COP) (a), associada aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c), calculados pela camada equivalente, em experimento com 19 anos.

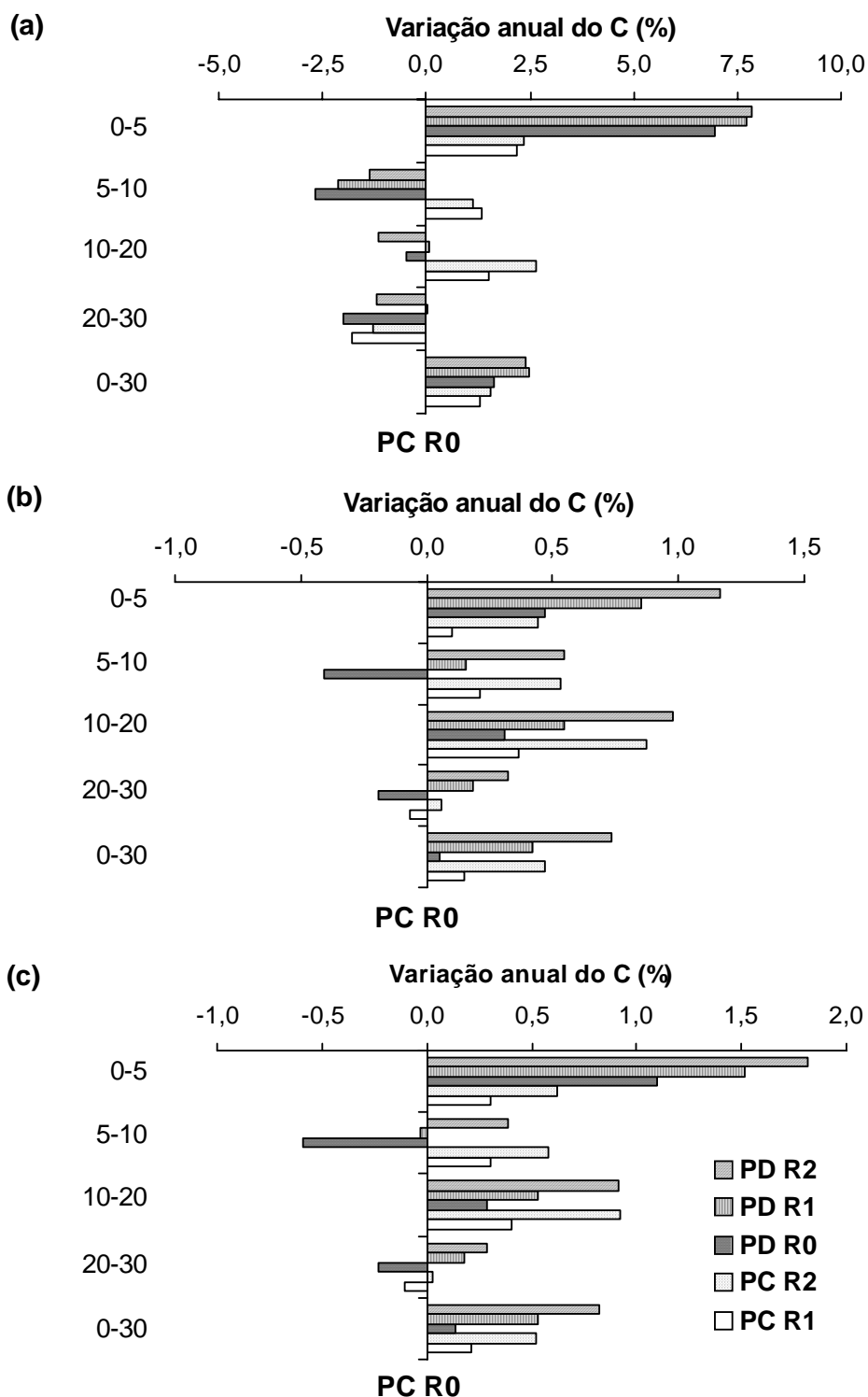


Figura 3.6. Taxas diferenciais anuais do C orgânico comparativamente ao preparo convencional sem rotação (PC R0), para quatro camadas e camada total de solo (cm), nas frações particulada (COP) (a), associada aos minerais (COAM) (b) e total (COT) (c), calculados pela massa equivalente, em experimento com 19 anos.

Para as camadas inferiores, os ganhos são favoráveis ao preparo convencional, provavelmente, pela ação dos implementos na deposição de resíduos. Analisando as monoculturas nos diferentes sistemas de preparo, verifica-se que o plantio direto (PD R0) apresentou ganhos anuais superiores ao preparo convencional (PC R0), na fração particulada, com aumento anual médio de 1,58%, em todo o perfil (0-30 cm), entretanto, apresentou menores taxas em COAM e COT, no método de cálculo camada equivalente (Figura 3.5), o que não ocorreu na massa equivalente (Figura 3.6), nesta camada. Todos os demais tratamentos superaram o PC R0 na taxa anual de C. Estes resultados demonstram a importância da rotação de culturas no aumento da matéria orgânica do solo e confirma que a soja em monocultura mesmo em PD não é eficiente em acumular C no solo (Garcia, 2003).

A substituição da floresta ou da pastagem (campo nativo) pela agricultura leva à diminuição do teor de carbono do solo até ser atingido um novo valor estável. A partir deste valor o conteúdo de carbono poderá ser aumentado, mantido ou diminuído, dependendo das práticas de manejo adotadas (Fries, 1997).

O conteúdo de matéria orgânica no início na instalação do experimento em 1985 era de 32 g kg^{-1} , na camada de 0-20 cm (Ruedell, 1995). Considerando uma densidade média do solo de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ no solo cultivado e de $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ no campo nativo (referência) (Jantalia, 2005), bem como 58% da matéria orgânica como C, o conteúdo de carbono orgânico total no solo (COT) no início na instalação do experimento era de $50,11$ e $44,02 \text{ Mg ha}^{-1}$, na camada de 0-20 cm, respectivamente calculados pela camada equivalente e massa equivalente. O campo nativo apresentava $56,36 \text{ Mg ha}^{-1}$, na mesma camada (Jantalia, 2005). Assim, verifica-se o decréscimo de 11 e 22% do estoque de COT do solo, respectivamente calculados por camada e massa equivalente, pelo uso do PC por cerca de 30 anos, principalmente com a cultura do trigo e posteriormente com a sucessão trigo/soja (Ruedell, 1995) (Figura 3.7a e b).

A recuperação parcial do COT, a partir da instalação do experimento em 1985, ocorreu principalmente na interação da rotação R2 (aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja) com o plantio direto (PD R2).

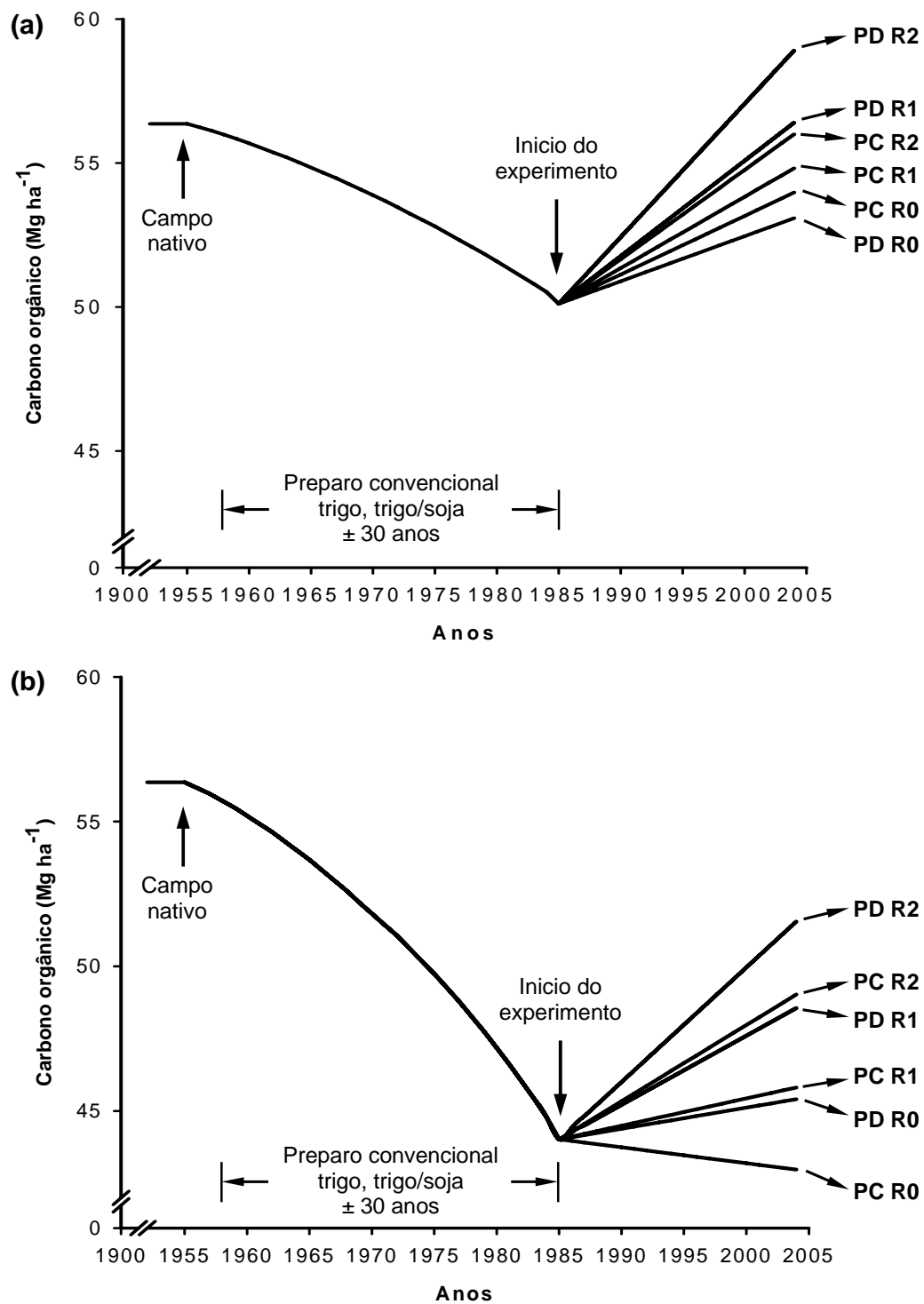


Figura 3.7. Variação do COT do solo cultivado a partir de campo nativo por cerca de 30 anos em preparo convencional e após a instalação do experimento com os preparos convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2), em 0-20 cm, calculado pela camada equivalente (a) e pela massa equivalente (b).

Nota-se que a seqüência de recuperação ocorreu de $R2 > R1 > R0$, independente do sistema de preparo do solo, calculado pela massa equivalente, mas quando calculado pela camada equivalente o PD aparece superior, com exceção do PD R0. Estes resultados colaboram na constatação da importância da rotação de culturas, com espécies de alto aporte de resíduos vegetais, principalmente, quando associados a sistemas conservacionistas como o plantio direto, na recuperação da matéria orgânica do solo (Bayer et al., 2000), mas principalmente de que o aporte de resíduos orgânicos pode ser mais importante que o sistema de preparo do solo nesta recuperação.

A taxa de perda de COT em 30 anos de PC foi de $-0,21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, no cálculo de camada equivalente, enquanto que a taxa de recuperação variou de $0,20$ (R0) a $0,31 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (R2) no PC e, $0,15$ (R0) a $0,46 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (R2) no PD, em 19 anos de cultivo, na camada de 0-20 cm (Figura 3.7a). Assim, o que foi perdido em 30 anos levaria 31 anos no PC R0, 20 anos no PC R2, 41 anos no PD R0 e 14 anos no PD R2. Em 19 anos de cultivo o PD R2 aumentou o teor de matéria orgânica de $32,0 \text{ g kg}^{-1}$ (3,2%) para $37,6 \text{ g kg}^{-1}$ (3,76%), na camada de 0-20 cm. Na camada de 0-5 cm este tratamento apresentou $47,7 \text{ g kg}^{-1}$ (4,77%) de matéria orgânica.

Calculado pela massa equivalente, estas relações se alteram, ficando a taxa de perda de COT em $-0,41 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em cerca de 30 anos de PC. A monocultura em PC (PC R0) continuou a apresentar taxa de perda em $-0,05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e em PD a taxa de recuperação foi de apenas $0,07 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Entretanto, a utilização da rotação de inverno e verão (R2) recuperou o COT a taxa de $0,26$ e $0,39 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente para PC e PD. A rotação somente de inverno (R1) apresentou taxas de ganhos em valores intermediários a R0 e R2. Estes resultados indicam a importância da rotação com culturas de maior aporte de C ao solo na recuperação do COT.

3.4.2.3 Fracionamento do C orgânico

As correlações entre COT e o carbono fracionado COP e COAM, calculadas pelos resíduos dos dados de cada repetição nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm, foram significativas. O coeficiente de correlação entre COT e

o CO da fração associada aos minerais foi 0,93 ($p < 0,0001$), enquanto que, a correlação com a fração particulada foi bem menor, ficando em 0,44 ($p < 0,0001$), similar para os métodos de cálculo camada equivalente e massa equivalente. Jansen et al. (1992) consideram coeficientes para COP acima de 0,44 como satisfatórios, devido aos altos coeficientes de variação para essa fração. Entretanto, os dados indicam que para este tipo de solo a correlação é maior para a fração associada aos minerais do que a fração particulada. Conceição (2002) trabalhando com Argissolos encontrou coeficiente de correlação acima de 0,80 para o COT e o COP.

Esta diferença pode estar relacionada à textura e mineralogia dos solos, já que os Argissolos apresentam um menor teor de argila na superfície do solo (57 g kg^{-1} de argila), bem como menor teor de óxidos de Fe, quando comparados ao Latossolo. A argila é responsável pela proteção do C orgânico no solo. Desta forma, solos mais argilosos devem apresentar maior teor de C associada aos minerais (Duxbury et al., 1989; Bayer, 1996).

Comparando-se os dados obtidos por Bayer (1996) com os deste trabalho (Tabela 3.4), ambos calculados pelo método da camada equivalente, verifica-se que, na camada de 0-5 cm, a fração particulada no Argissolo é maior (21%) que no Latossolo (15%), e conseqüentemente, invertendo-se para a fração associada aos minerais. Nesta camada, o plantio direto apresentou em ambos os solos maior conteúdo de COP. Este carbono concentrou-se no preparo convencional na camada inferior a 5 cm.

A análise do C orgânico da fração particulada (COP) não diferenciou os tratamentos referentes às rotações de culturas, apenas os sistemas de preparo, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 cm e na soma das camadas (0-20 e 0-30 cm) (Tabelas 3.2 e 3.3). A análise C da fração ligada aos minerais (COAM) teve diferenciação dos tratamentos semelhantes ao COT. Isto indica que para este trabalho, o uso do fracionamento físico do C orgânico não trouxe vantagens na discriminação dos tratamentos, podendo ter sido utilizado somente a análise do COT. Isto pode ter ocorrido devido a coleta de solo ser realizada após a cultura da soja, em todos os tratamentos, o que levaria a coleta de quantidades semelhantes de COP. Outro fato, é que a análise após a cultura do milho (rotação 1-2 da Figura 1.2) (dados não apresentados) indicou

menor concentração de COP, provavelmente, por ter sido realizada imediatamente após a colheita da cultura, não dando tempo suficiente da quebra da maior parte dos resíduos que iriam compor o COP.

Tabela 3.4. Comparação da relação do COT e as frações particulada (COP) e associada aos minerais (COAM), calculados pelo método da camada equivalente, em sistemas de preparo do solo e culturas, entre os solos Argissolo e Latossolo

Local	Solo/Teor de argila	Sistema		Profundidade	Relação ao COT	
		Preparo ¹	Culturas ²		COP	COAM
				cm	%	
UFRGS, Eldorado do Sul ³	Argissolo 220 g kg ⁻¹	PC	A+E/M+C	0-5	19,8	80,2
				5-12,5	14,0	86,0
				0-30	14,7	85,3
		PD	A+E/M+C	0-5	22,6	77,4
				5-12,5	11,3	88,7
				0-30	15,8	84,2
FUNDA CEP Cruz Alta	Latossolo 570 g kg ⁻¹	PC	R0	0-5	9,7	90,3
				5-10	8,0	92,0
				0-30	5,1	94,9
			R1	0-5	13,0	87,0
				5-10	9,5	90,5
				0-30	6,1	93,9
		PD	R2	0-5	12,6	87,4
				5-10	8,7	91,3
				0-30	6,0	94,0
			R0	0-5	18,6	81,4
				5-10	4,4	95,6
				0-30	6,7	93,3
R1	0-5	18,6	81,4			
	5-10	4,8	95,2			
	0-30	6,9	93,1			
R2	0-5	18,0	82,0			
	5-10	5,5	94,5			
	0-30	6,4	93,6			

¹ PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ² A = aveia; E = ervilhaca; M = milho; C = caupi; R0 = trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/ervilhaca+aveia/milho/nabo/trigo/soja. ³ Bayer, 1996.

Conceição (2002) obteve discriminação satisfatória dos tratamentos com a utilização do fracionamento do C do solo. Isto pode ter ocorrido devido a maior diferença entre o tipo de resíduo vegetal dos tratamentos utilizados neste trabalho (solo descoberto, pousio, azevém, mucuna e campo nativo) com coleta das amostras de solo após as culturas de verão (maio/junho).

Por ser lábil, a fração particulada ($>53 \mu\text{m}$) é mais sujeita a mudanças num menor espaço de tempo (Mielniczuk, 1999; Bayer et al., 2001; Conceição, 2002). Desta forma, entende-se que o uso do fracionamento dependerá da diferenciação dos resíduos vegetais nos tratamentos e da época de coleta das amostras de solo, devido à ação destes fatores no fornecimento de COP, de menor duração no solo quando comparado ao COAM.

3.4.2.4 Efeito dos sistemas de manejo no seqüestro de C no solo

Para Bayer et al. (2000), além da expressiva melhoria de qualidade do solo pelo aumento nos estoques de matéria orgânica, a adoção de sistemas de preparo sem revolvimento do solo e de alto aporte de resíduos resulta na retirada de CO_2 da atmosfera e sua retenção no solo.

O conteúdo de COT no início na instalação do experimento era de $50,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, na camada de 0-20 cm, calculado pelo método da camada equivalente. Considerando o fator de conversão de C para CO_2 de 3,67 (massa molar do CO_2 /massa molar do C) (Bayer et al., 2000), as rotações R0, R1 e R2 teriam fixado 14,2, 17,3 e 21,6 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, no PC e, 10,9, 23,1 e 32,3 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ no PD, nesta camada, em 19 anos do experimento, respectivamente. Nos tratamentos extremos, PD R2 e PD R0, a diferença chegaria a 21,4 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ou 1,13 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, neste período. No método da massa equivalente, os valores se alteram significativamente, com estoque inicial de $44,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, as rotações R0, R1 e R2 teriam perdido ou fixado -3,8, 6,7 e 18,4 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, no PC e, 5,2, 16,7 e 27,7 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ no PD, na mesma camada e período, respectivamente. Para os tratamentos extremos, novamente, PD R2 e agora, PC R0, a diferença chegaria a 31,5 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ou 1,66 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O cultivo levou a perda de C do solo e, conseqüentemente, maior saída de CO_2 , quando comparado à condição natural da região sob campo nativo,

que apresenta $56,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$, na camada de 0-20 cm, com exceção do PD R2, calculado pela camada equivalente, que apresentou ganho de $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C (Figura 3.7 a), correspondendo a $9,7 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$.

Bayer et al. (2000), considerando entrada de CO_2 no solo (influxo) e saída (efluxo), obtiveram uma diferença líquida de $3,87 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em favor do plantio direto combinado com aveia consorciada com ervilhaca e milho, em comparação com preparo convencional combinado com as culturas aveia e milho, na camada de 0-17,5 cm num Argissolo. Este valor é 2,3 vezes superior ao obtido neste trabalho, no cálculo da massa equivalente. A diferença obtida nos dois trabalhos deve estar relacionada ao tipo de solo e ao conteúdo inicial de C. Solos com conteúdo de C menores, como no Argissolo, podem apresentar ganhos iniciais maiores de C, quando comparados a solos com conteúdo já elevados, como no Latossolo.

As taxas de seqüestro de carbono são bastante variáveis, em decorrência do tipo de solo (textura e mineralogia), condições climáticas (temperatura e precipitação) e sistema de rotação de culturas adotado (aporte de resíduos) (Bayer, 2004), bem como do sistema de preparo do solo.

Quando se compara os estoques de C verifica-se que estes foram maiores no Latossolo deste trabalho quando comparado ao Argissolo utilizado por Bayer (2004) (Tabela 3.5). Porém, comparando-se as taxas anuais de seqüestro de C pelo plantio direto em relação ao convencional, estas foram bem menores no Latossolo.

O seqüestro de C foi menor no Argissolo, quando se compara a rotação de cultura A+E/M+C com a monocultura A/M ($0,37 \text{ Mg ha}^{-1}$ - Tabela 3.6), do que quando compara-se os sistemas de preparo plantio direto e convencional ($0,55 \text{ Mg ha}^{-1}$ - Tabela 3.5). Entretanto, no Latossolo, a rotação (R2) em comparação com a monocultura (R0), incorporou anualmente o dobro de C ($0,31 \text{ Mg ha}^{-1}$), do que quando comparado o plantio direto ao convencional ($0,15 \text{ Mg ha}^{-1}$). O menor efeito dos sistemas de preparo sobre o teor de COT no solo Latossolo, comparativamente ao efeito observado no Argissolo, pode ser devido a uma maior estabilização física da matéria orgânica neste solo, no interior de microagregados (estabilidade estrutural), mas principalmente a matéria orgânica ligada a superfície de minerais por ligações de coordenação

(estabilidade coloidal), a qual é menos afetada pelos sistemas de preparo (Duxbury et al., 1989; Bayer, 1996), mas, conforme indicado pelos dados deste trabalho, podem ser afetadas pelos sistemas de culturas de alto aporte de carbono, como a rotação R2.

Tabela 3.5. Comparação da taxa anual de seqüestro de carbono, em sistemas de preparo do solo dentro de cada rotação de culturas, entre os solos Argissolo e Latossolo, calculados pelo método da camada equivalente, na camada de 0-20 cm.

Local	Solo/Teor de argila	Sistema de culturas ¹	Estoque de COT		Tempo anos	Taxa Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
			PC ²	PD		
			—— Mg ha ⁻¹ ——			
UFRGS, Eld. do Sul	Argissolo 220 g kg ⁻¹	A/M ³ A+E/M+C ³	29,69 34,13	36,45 41,58	13	0,52 0,57
						Média ⁴ 0,55
FUNDA CEP Cruz Alta	Latossolo 570 g kg ⁻¹	R0 R1 R2	53,97 54,81 56,00	53,08 56,40 58,90	19	-0,05 0,08 0,15
						Média ⁴ 0,06

¹ A = aveia; E = ervilhaca; M = milho; C = caupi; R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Lovato et al., 2004, citado por Bayer, 2004. ⁴ Taxa média de seqüestro de carbono pelo plantio direto.

3.4.3 Distribuição do N total e fracionado do N total no perfil do solo

A distribuição no perfil dos teores de N total e fracionado do N total do solo cultivado sob os sistemas de preparo PC e PD com diferentes sistemas de culturas (R0, R1 e R2) está representada na Figura 3.8. Observa-se inicialmente, que os teores de N total no PD decresceram com o aumento da profundidade, principalmente na fração particulada (NTP), enquanto no PC eles mantiveram certa uniformidade em todo o perfil do solo, concordando com os resultados obtidos por outros autores (Bayer, 1992; Amado et al., 2000; De Bona, 2005). Verifica-se maior teor de NTP e NT no PC na profundidade de 5-10 cm, provavelmente, pela ação dos implementos, utilizados neste sistema de preparo, na incorporação dos resíduos orgânicos. Esses resultados são

similares aos verificados na distribuição em profundidade da concentração de C orgânico (Figura 3.1), o que demonstra a estreita relação entre C e N na matéria orgânica do solo (Bayer, 1992; De Bona, 2005). A monocultura no PD (PD R0) apresentou menor teor de NTAM e NT na superfície (0-5 cm) no PD e para todos os demais tratamentos nas camadas inferiores.

Tabela 3.6. Comparação da taxa anual de seqüestro de carbono, em sistemas de rotação de culturas dentro cada preparo do solo, entre os solos Argissolo e Latossolo, calculados pelo método da camada equivalente, na camada de 0-20 cm.

Local	Solo/Teor de argila	Sistema de preparo ¹	Estoque de COT Sistema de culturas ²		Tempo anos	Taxa Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
			— Mg ha ⁻¹ —			
UFRGS, Eldorado do Sul	Argissolo 220 g kg ⁻¹	PC PD	A/M ³	A+E/M+C ³	13	
			29,69	34,13		0,34
			36,45	41,58		0,39
Média ⁴						0,37
FUNDA CEP Cruz Alta	Latossolo 570 g kg ⁻¹	PC PD	R0	R1	19	
			53,97	54,81		0,04
		53,08	56,40	0,17		
		PC PD	R0	R2		
			53,97	56,00	0,11	
		53,08	58,90	0,31		
Média ⁴						0,16

¹ PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ² A = aveia; E = ervilhaca; M = milho; C = caupi; R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ³ Lovato et al., 2004, citado por Bayer, 2004. ⁴ Taxa média de seqüestro de carbono pelas rotações.

3.4.4 Estoque do N total e fracionado do N total no perfil do solo

As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam os resultados referentes aos estoques de N total do solo nos sistemas de preparo PC e PD com diferentes sistemas de culturas (R0, R1 e R2), respectivamente calculados pelos métodos da camada e massa equivalente (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Assim como para os estoques de C, houve redução do estoque de N total quando calculado pela massa equivalente em comparação à camada equivalente.

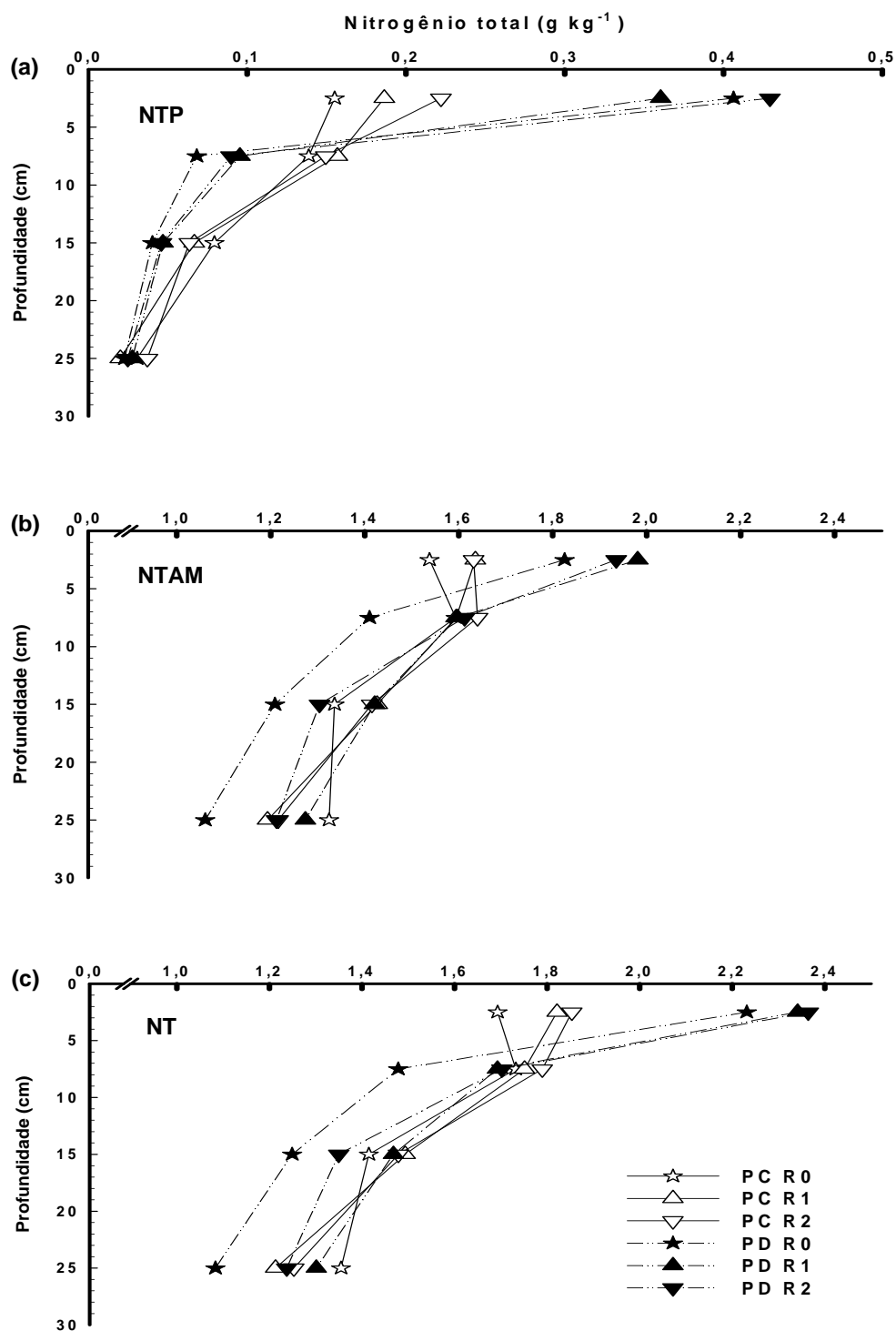


Figura 3.8. Distribuição dos teores de nitrogênio total particulado (NTP) (a), associado aos minerais (NTAM) (b) e total (NT) (c) nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD) sob rotações de culturas trigo/soja (R0), aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2).

Tabela 3.7. Estoque de nitrogênio total na fração particulada (NTP, >53 μm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 μm) e total (NT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da camada equivalente.

Rotação de culturas ¹	NTP			NTAM			NT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	0-5 cm								
R0	0,105	0,282	0,194	1,038	1,269	1,153	1,143	1,551	1,347
R1	0,149	0,294	0,222	1,101	1,326	1,213	1,251	1,620	1,435
R2	0,126	0,242	0,183	1,096	1,327	1,211	1,220	1,569	1,395
Média	0,126 B	0,273 A		1,078 B	1,307 A		1,205 B	1,580 A	
	5-10 cm								
R0	0,096	0,048	0,072	1,108	0,987	1,047	1,204	1,035	1,119
R1	0,101	0,062	0,082	1,123	1,113	1,118	1,226	1,175	1,200
R2	0,107	0,066	0,085	1,076	1,086	1,081	1,182	1,151	1,167
Média	0,102 A	0,058 B		1,102	1,062		1,204 A	1,120 B	
	10-20 cm								
R0	0,113	0,053	0,083	1,910 A	1,596 Bb	1,753	2,023 A	1,649 Bb	1,836
R1	0,088	0,062	0,075	1,967 A	1,747 Bab	1,857	2,055 A	1,809 Bab	1,932
R2	0,090	0,063	0,077	1,926 A	1,918 Aa	1,922	2,016 A	1,982 Aa	1,999
Média	0,097 A	0,059 B		1,934	1,754		2,032	1,813	

Continua...

Continuação da Tabela 3.7.

Rotação de culturas ¹	NTP			NTAM			NT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	20-30 cm								
R0	0,040	0,029	0,035	1,721 A	1,357 Bb	1,539	1,761 A	1,387 Bb	1,574
R1	0,048	0,032	0,040	1,580 A	1,564 Aab	1,572	1,629 A	1,596 Aab	1,612
R2	0,026	0,036	0,031	1,551 A	1,643 Aa	1,597	1,577 A	1,679 Aa	1,628
Média	0,038	0,032		1,618	1,521		1,656	1,554	
	0-20 cm								
R0	0,315	0,383	0,349	4,056	3,851 b	3,954	4,370	4,235	4,303 b
R1	0,341	0,418	0,379	4,192	4,185 a	4,188	4,532	4,603	4,568 a
R2	0,321	0,370	0,345	4,098	4,332 a	4,215	4,418	4,701	4,560 a
Média	0,325 B	0,390 A		4,115	4,123		4,440	4,512	
	0-30 cm								
R0	0,354	0,413	0,384	5,777 A	5,209 Bb	5,493	6,132 A	5,621 Bb	5,876
R1	0,389	0,450	0,419	5,772 A	5,749 Aa	5,761	6,161 A	6,199 Aa	6,180
R2	0,347	0,406	0,376	5,649 A	5,974 Aa	5,812	5,996 A	6,380 Aa	6,188
Média	0,363	0,423		5,733	5,644		6,096	6,066	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. As amostragens foram feitas após a cultura da soja (sublinhadas). ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, para sistemas de preparo, e minúsculas na coluna, para rotações, não diferem pelo teste DMS a 5% de significância.

Tabela 3.8. Estoque de nitrogênio total na fração particulada (NTP, >53 μm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 μm) e total (NT) em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelo método da massa equivalente.

Rotação de culturas ¹	NTP			NTAM			NT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	0-5 cm								
R0	0,096	0,243	0,170	0,954	1,092	1,023 b	1,050	1,335	1,193 b
R1	0,138	0,262	0,200	1,012	1,180	1,096 a	1,150	1,442	1,296 a
R2	0,116	0,225	0,171	1,022	1,238	1,130 a	1,139	1,464	1,301 a
Média	0,117 B ³	0,243 A		0,996 B	1,170 A		1,113 B	1,414 A	
	5-10 cm								
R0	0,079	0,038	0,059	0,907	0,794	0,851 b	0,987	0,832	0,909 b
R1	0,087	0,052	0,069	0,954	0,928	0,941 a	1,041	0,980	1,011 a
R2	0,093	0,056	0,075	0,946	0,938	0,942 a	1,039	0,995	1,017 a
Média	0,086 A	0,049 B		0,936	0,887		1,022 A	0,936 B	
	10-20 cm								
R0	0,081	0,042	0,062	1,364	1,404	1,384 b	1,445	1,453	1,449 b
R1	0,069	0,052	0,061	1,530	1,490	1,510 a	1,598	1,542	1,570 a
R2	0,075	0,053	0,064	1,614	1,608	1,611 a	1,689	1,661	1,675 a
Média	0,075 A	0,049 B		1,502	1,501		1,577	1,552	

Continua...

Continuação da Tabela 3.8.

Rotação de culturas ¹	NTP			NTAM			NT		
	PC ²	PD	Média	PC	PD	Média	PC	PD	Média
	Mg ha ⁻¹								
	20-30 cm								
R0	0,036	0,027	0,031	1,542 A	1,253 Bb	1,398	1,578 A	1,280 B	1,429
R1	0,043	0,029	0,036	1,416 A	1,423 Aab	1,419	1,459 A	1,452 A	1,456
R2	0,023	0,032	0,028	1,390 A	1,494 Aa	1,442	1,413 A	1,527 A	1,470
Média	0,034	0,030		1,449	1,390		1,484	1,420	
	0-20 cm								
R0	0,256	0,324	0,290	3,225	3,290	3,257 b	3,481	3,620	3,551 b
R1	0,293	0,366	0,330	3,496	3,598	3,547 a	3,789	3,964	3,877 a
R2	0,285	0,335	0,310	3,582	3,784	3,683 a	3,867	4,119	3,993 a
Média	0,278 B	0,342 A		3,434 B	3,558 A		3,712 B	3,902 A	
	0-30 cm								
R0	0,292	0,351	0,321	4,767	4,543	4,655 b	5,059	4,901	4,980 b
R1	0,337	0,395	0,366	4,912	5,021	4,966 a	5,248	5,416	5,332 a
R2	0,308	0,367	0,338	4,971	5,279	5,125 a	5,280	5,646	5,463 a
Média	0,312	0,371		4,884	4,948		5,196	5,321	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. As amostragens foram feitas após a cultura da soja (sublinhadas). ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto. ³ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, para sistemas de preparo, e minúsculas na coluna, para rotações, não diferem pelo teste DMS a 5% de significância.

O PD apresentou estatisticamente maior estoque de N total e N total fracionado na camada superficial do solo (0-5 cm) e menores estoques de NTP nas camadas subsuperficiais (5-10 e 10-20 cm), quando comparado ao PC. Na camada de 0-5 cm o PD, na média de três rotações, foi 31 e 27% superior ao PC em NT, com taxa de ganho de 3,95 e 3,17 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹, respectivamente para camada e massa equivalente. Na camada de 5-10 cm, esta relação foi favorável ao PC, sendo este 7,50 e 9,19% superior ao PD, com taxa de ganho de apenas 0,88 e 0,91 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹. Na camada inferior, 10-20 continuou a haver diferença entre os preparos, com o PC apresentando maior estoque de N, mas apenas para NTP.

Conforme discutido na análise dos estoques de C, esses resultados são atribuídos ao acúmulo de material vegetal na superfície do solo no PD e a incorporação destes resíduos pelo revolvimento ocasionado implementos utilizados no PC, o que ocasiona diferentes locais de enriquecimento de N total no solo (Bayer, 1992; Amado et al., 2000; De Bona, 2005).

Os sistemas de rotação de culturas (R1 e R2) apresentaram, em média, maior estoque de NT e NTAM, quando comparados a monocultura trigo/soja (R0), nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, refletindo-se também nas camadas de 0-20 e 0-30 cm, na média dos preparos de solo, no método massa equivalente (Tabela 3.8). Neste método, na camada de 0-30 cm, a R2 apresentou uma taxa de ganho de NT em 0,85 kg ha⁻¹ ano⁻¹ cm⁻¹, em relação a monocultura R0. Nestas relações a rotação intensiva (inverno e verão) (R2) não apresentou diferença em relação a rotação somente no inverno (R1).

O maior estoque de N, principalmente na rotação R2, pode ser atribuído à presença da ervilhaca, uma leguminosa que fixa N₂, e ao contrário da soja, deixa todo seus resíduos vegetais neste sistema adotado, pois não é realizada a colheita de sementes, ficando como adubação verde. Outro fato pode ser a maior produção de fitomassa nos sistemas R1 e R2 (Capítulo III). Entretanto, a soja em monocultura em R1, como única fonte biológica de N, apresentou valores de NT semelhantes ao R2, onde havia soja e ervilhaca. Assim, mesmo em monocultura a soja apresentou-se como fonte importante de N para o solo, com balanço positivo deste elemento. Quando comparadas as duas monoculturas de verão R0 e R1, verifica-se que estas apresentam diferença de NT no solo, bem como de COT, o que pode ser atribuído ao maior aporte de

resíduos culturais da aveia em R1 em relação ao monocultivo de trigo em R0, no inverno. O aumento de C no solo proporcionado pela fitomassa da aveia, poderia levar a uma interação com o N, protegendo-o e aumentando seu estoque no solo. Outra hipótese é que a aveia poderia estimular a ação de fixadores assimbióticos de N_2 , que também seriam fonte deste elemento para o solo. As adições de N pela fixação assimbiótica normalmente não são consideradas (Lovato et al., 2004), entretanto, esta adição, principalmente em associações entre gramíneas e bactérias diazotróficas, pode ser expressiva (Döbereiner, 1992).

3.4.5 Relação C/N do solo

A relação C/N dos estoques de COT e NT da MOS são apresentados na Tabela 3.9. Não houve diferença entre os métodos de cálculo, provavelmente, devido ao fato de que as diferenças entre as densidades de solo, que influenciam os resultados dos métodos, foram proporcionais no COT e NT, não alterando sua relação. As alterações desta relação não foram significativas variando de 11,8 a 14,0 nos diferentes tratamentos e camadas.

À medida que aumenta a participação de leguminosas nos sistemas de culturas, normalmente, ocorre diminuição da relação C/N (Lovato, 2001; Nicoloso, 2005). Neste trabalho, ocorre a presença da leguminosa soja em todos os sistemas de culturas. A participação da ervilhaca na rotação R2, não foi suficiente para diminuir a relação C/N da MOS.

Jantalia (2005), no mesmo experimento deste trabalho, também obteve relação C/N do solo constante independente da vegetação ou tratamento, bem como da profundidade de solo avaliada, com valor médio de 13,7. A autora cita que esta constância nos valores da relação C/N do solo é observada em diferentes localidades do mundo e em solos sob diferentes condições de manejo.

Tabela 3.9. Relação C/N dos estoques de COT e NT do solo em diferentes rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, calculado pelos métodos da camada equivalente e da massa equivalente.

Rotação de culturas ¹	Camada equivalente			Massa equivalente		
	PC	PD	Média	PC	PD	Média
0-5 cm						
R0	12,6	12,0	12,2	12,6	12,0	12,2
R1	12,2	11,8	12,0	12,2	11,8	12,0
R2	13,0	12,1	12,5	13,0	12,1	12,5
Média	12,6	12,0		12,6	12,0	
5-10 cm						
R0	11,8	12,4	12,1	11,8	12,4	12,1
R1	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8
R2	12,4	12,6	12,5	12,4	12,6	12,5
Média	12,0	12,2		12,0	12,2	
10-20 cm						
R0	12,6	13,2	12,8	12,6	13,2	12,9
R1	12,2	13,0	12,6	12,2	13,0	12,6
R2	12,6	12,8	12,7	12,6	12,8	12,7
Média	12,5	13,0		12,5	13,0	
20-30 cm						
R0	11,9	14,0	12,8	11,9	14,0	12,8
R1	12,6	13,3	12,9	12,6	13,3	13,0
R2	13,3	12,9	13,1	13,3	12,9	13,1
Média	12,6	13,4		12,6	13,4	
0-20 cm						
R0	12,3	12,5	12,4	12,3	12,5	12,4
R1	12,1	12,3	12,2	12,1	12,2	12,2
R2	12,7	12,5	12,6	12,7	12,5	12,6
Média	12,4	12,4		12,8	12,4	
0-30 cm						
R0	12,2	12,9	12,5	12,2	12,9	12,5
R1	12,2	12,5	12,4	12,2	12,5	12,4
R2	12,8	12,6	12,7	12,8	12,6	12,7
Média	12,4	12,7		12,4	12,7	

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ² PC = preparo convencional; PD = plantio direto.

3.5 CONCLUSÕES

O plantio direto aumentou o estoque de carbono orgânico e nitrogênio total do solo em Latossolo Vermelho distrófico típico, principalmente, quando associado à rotação de culturas de inverno e verão (aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja).

O plantio direto em monocultura (trigo/soja) não foi eficiente em recuperar o carbono orgânico e nitrogênio total do solo.

A recuperação da MOS, nas condições deste experimento, foi mais influenciada por sistemas de rotação de culturas, que incluíram espécies de alto aporte de resíduos orgânicos, do que pelos sistemas de preparo do solo.

Os estoques de C orgânico e de N total do solo apresentaram melhor correlação com os tratamentos quando calculados pelo método da massa equivalente, em comparação ao método da camada equivalente.

3.7 CONSIDERAÇÕES

O solo em PD apresentou maior quantidade de C e N do que o solo em PC. A concentração de C e N na superfície do solo (0-5 cm) sob PD pode resultar em melhor qualidade do solo, pela alocação destes elementos onde ocorrem os principais fenômenos de relação solo-ambiente, maior atividade biológica e deposição de sementes e insumos. A rotação intensa (inverno e verão) foi melhor que a monocultura, enquanto, a rotação de inverno, de maneira geral, também superou a monocultura, mas não atingiu a situação de melhor qualidade do solo, indicada pela rotação intensa.

**4 CAPÍTULO IV: RELAÇÕES ENTRE A ENTRADA, A SAÍDA E O ESTOQUE
DO CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL DO SOLO EM
SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E DE CULTURAS
EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO
- O BALANÇO -**

4.1 RESUMO

O estoque de C no solo é consequência do balanço entre a saída de C pela emissão de CO₂, devido principalmente à atividade de microrganismos heterotróficos e a entrada de C, principalmente pela adição de compostos orgânicos sintetizados no processo de fotossíntese vegetal. Visando avaliar sistemas de preparo do solo e de culturas quanto à entrada de C orgânico pelos resíduos e saída pela evolução de CO₂ e sua consequência no estoque de C orgânico no solo, foi desenvolvido trabalho em experimento de longa duração (19 anos) sob Latossolo Vermelho distrófico típico. Este experimento está situado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP), Cruz Alta, RS. Nele são conduzidos os preparos de solo convencional (PC) e plantio direto (PD). Foram selecionados três sistemas comerciais de rotação: sucessão (monocultura) trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (R0); rotação de inverno aveia (*Avena strigosa* Schreb)/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho (*Zea mays* L.)/nabo (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* Metzg.)/trigo/soja (R2), em cada sistema de preparo do solo. As coletas de solo foram realizadas em maio de 2004, após a colheita da cultura da soja. A área sob pastagem natural (campo nativo), utilizada como referência foi amostrada por Jantalia (2005). O fracionamento da matéria orgânica do solo, para separação da fração particulada da fração associada aos minerais, foi efetuado mediante separação física. O solo foi coletado nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm. A partir das amostras fracionadas e moídas foi realizada a análise dos teores de carbono orgânico (CO) e N total (NT) tendo sido calculados os estoques desses elementos pelos métodos de cálculo camada equivalente e massa equivalente de solo. As adições anuais de C pelos sistemas de culturas, no período de 1985 a 2004, foram estimadas pela

matéria seca produzida, índice de colheita das culturas produtoras de grãos e dados de outros autores no mesmo experimento ou área experimental. Considerou-se a contribuição média do sistema radicular em 30% do total de C e N contidos na parte aérea. A respiração do solo foi avaliada com a utilização de câmaras de captação de CO₂ a campo. O método de cálculo do estoque de COT, massa equivalente apresentou melhor relação entre o C adicionado e taxa de variação anual (dC/dt) do C do solo, quando comparado ao método de cálculo camada equivalente. O PD apresentou coeficiente de humificação (k_1) (14,1%) maior que no PC (6,5%), pelo método de camada equivalente, entretanto, pelo método da massa equivalente este valor foi menor para o PD (14,9%) do que para o PC (19,4%). A taxa anual de perda do COT (k_2) foi maior no PD (0,0082 ano⁻¹) do que no PC, que resultou em taxa de apenas 0,0008 ano⁻¹, calculadas pela camada equivalente, valor extremamente baixo. Mais coerente, no método da massa equivalente, taxa anual de perda do COT (k_2) foi menor no PD (0,0135 ano⁻¹) do que no PC (0,0176 ano⁻¹). O índice de manejo de carbono (IMC) apresentou valores superiores no PD em relação ao PC, bem como, nas rotações R1 e R2 em relação à monocultura R0, em ambos os sistemas de preparo, indicando que o PD e a rotação de culturas aumentaram a labilidade e conseqüentemente a qualidade da matéria orgânica estocada. O IMC mostrou-se efetivo em discriminar os sistemas de manejo. A taxa de perda de C (C-CO₂ evoluído/COT do solo), com base no cálculo do estoque de COT pela massa equivalente, foi ligeiramente superior no PC em relação ao PD. Calculando o estoque pela camada equivalente não houve diferença. As monoculturas apresentaram taxas de evolução maiores que as rotações de culturas dentro de cada sistema de preparo, em ambos os métodos de cálculo. A interação do PD com rotação de culturas de inverno e verão (PD R2) apresentou maior emissão acumulada de C-CO₂, porém, as maiores adições de C, que resultaram num balanço líquido positivo de C do solo, demonstrado pelo maior estoque de COT no solo. Não houve correlação entre a estimativa da adição anual de N pelos sistemas de culturas e o estoque de NT no solo. Este comportamento pode ter sido ocasionado por não ter sido considerado o N reciclado como adição ou outras fontes de N ao solo.

4.2 INTRODUÇÃO

Os vegetais são os principais responsáveis pela adição de compostos orgânicos sintetizados no processo de fotossíntese, utilizando energia solar, CO₂ do ar, água e nutrientes do solo (Lovato et al., 2004). Os organismos, principalmente microrganismos heterotróficos, obtêm energia para o seu desenvolvimento pela decomposição de resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo, liberando CO₂ para atmosfera, nutrientes, e compostos orgânicos deste metabolismo, que passam a compor a matéria orgânica do solo (Vezzani, 2001; Lovato et al., 2004).

A matéria orgânica interage com os minerais no solo, resultando na formação de partículas secundárias, chamadas agregados. Muitos trabalhos mostram a correlação entre o conteúdo de carbono orgânico no solo e a estabilidade dos agregados à ação dos agentes desagregadores, principalmente, a água (Tisdall & Oades, 1982). Ao mesmo tempo, as interações do C da matéria orgânica com os minerais e a formação de agregados diminuem a ação dos microrganismos decompositores, contribuindo para o acúmulo de compostos orgânicos no solo (Lovato et al., 2004).

As culturas adequadamente manejadas, especialmente em sistemas de rotação, são agentes importantes na agregação do solo. Segundo, Baver et al. (1973), o cultivo de gramíneas apresenta considerável efeito de agregação devido à extensão de seu sistema radicular.

O plantio direto se caracteriza pela implantação das culturas com mínima mobilização do solo, quando comparado ao preparo convencional. Esta menor mobilização cria um ambiente menos oxidativo, diminuindo as taxas de decomposição da matéria orgânica. Além disto, o aumento da matéria orgânica no solo, sob este sistema, favorece a maior resistência dos agregados aos agentes desagregadores e, conseqüentemente, maior resistência à erosão do solo (Campos et al., 1995). Esta maior agregação também favorece a uma maior infiltração e retenção de água no solo. A presença de resíduos culturais (palha) na superfície do solo neste sistema é o principal mecanismo de controle da erosão do solo. Além disto, estes resíduos diminuem a amplitude da temperatura e mantêm por mais tempo a umidade do solo, o que favorece a atividade microbiana, que, se por um lado, aumenta a taxa de decomposição,

por outro, libera nutrientes para o crescimento vegetal. Todos estes fatores levam a formação de um ambiente favorável ao crescimento vegetal, o que contribui para maior produção de fitomassa e, conseqüentemente, maior aporte de C ao solo no plantio direto. Com isto, o plantio direto se caracteriza por ser um sistema conservacionista que favorece a maior adição de resíduos culturais, que podem compensar o aumento das taxas de decomposição, contribuindo para o aumento de C no solo.

As taxas de seqüestro de carbono são bastante variáveis, em decorrência do tipo de solo (textura e mineralogia), condições climáticas (temperatura e precipitação) e sistema de rotação de culturas adotado (aporte de resíduos) (Bayer, 2004), bem como do sistema de preparo do solo.

Segundo Lovato et al. (2004), os estoques de matéria orgânica são determinados pela razão entre as quantidades de C adicionados (k_1A) e perdas (k_2C), sendo sua variação temporal (dC/dt) expressa pela equação $dC/dt = -k_2C + Ak_1$. Onde, A representa o C adicionado anualmente ao solo, C o estoque de COT no solo, k_1 a fração de A retido na matéria orgânica e k_2 a fração do COT perdida por decomposição, erosão e lixiviação (Dalal & Mayer, 1986; Lovato et al., 2004).

Vários índices têm sido utilizados como meio de melhor comparar o efeito dos sistemas de preparo do solo e de culturas sobre a matéria orgânica do solo, e conseqüentemente, sobre a qualidade do solo. Entre estes, Blair et al. (1995) propôs o índice de manejo do carbono (IMC), que relaciona o estoque de C do solo e a labilidade deste carbono, calculados com base num sistema de referência. Este sistema pode ser o solo em estado natural de mata ou pastagem natural ou uma área degradada. Inicialmente a labilidade foi avaliada por meios químicos, que apresentavam problemas, sendo que recentemente o uso das frações físicas tem sido utilizado preferencialmente na estimativa deste índice (De Bona, 2005).

4.2.1 Hipóteses

A monocultura, mesmo sob plantio direto, não é um sistema de manejo eficiente em promover o influxo de C atmosférico ao solo.

O índice de manejo de carbono (IMC) é eficiente para discriminar

sistemas de manejo.

4.2.2 Objetivos

Avaliar sistemas de preparo do solo e de culturas quanto à entrada de C orgânico pelos resíduos e saída pela evolução de CO₂ e sua consequência no estoque de C orgânico no solo.

Avaliar o índice de manejo do carbono (IMC) como discriminador de sistemas de manejo.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Condições experimentais

O estudo foi baseado em um experimento de longa duração (19 anos) conduzido, desde 1985, na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP), Cruz Alta, RS.

O experimento consistiu de dois métodos de preparo de solo, sistema de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), combinados com diferentes sistemas de rotação de culturas sendo: monocultura trigo/soja (R0); rotação de inverno aveia/soja/trigo/soja (R1) e, rotação de inverno e verão aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2). O solo ocorrente é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com predomínio de caulinita e óxidos de ferro (Streck et al., 2002). Entre os óxidos de ferro, a hematita está presente em maior proporção do que a goethita, conferindo cor avermelhada ao solo (Inda Jr. et al., 2004).

A descrição das condições experimentais encontram-se no Capítulo I, descritas no item 1.3.1.

4.3.2 Avaliações

4.3.2.1 Amostragem e fracionamento do C e N do solo

As coletas de solo foram realizadas em maio de 2004, após a colheita da

cultura da soja. Para as rotações R1 e R2, a soja foi cultivada após a cultura da aveia. Em maio de 2005, foram coletadas amostradas de solo em área sob campo nativo, que serviu de tratamento referência.

O fracionamento da matéria orgânica do solo para separação da fração particulada (fração leve) da associada aos minerais (fração pesada) foi efetuado mediante separação física (Roscoe & Machado, 2002; Conceição, 2002). O solo foi coletado nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm sendo seco ao ar, peneirado em malha 2 mm e armazenado. A partir das amostras fracionadas e moídas foi realizada a análise dos teores de C orgânico pela metodologia de Mebius modificado no bloco de digestão (Yeomans & Bremner, 1988; Nelson & Sommers, 1996) e N total por digestão ácida e destilação de arraste de vapor em semi-micro-Kjeldhal (Tedesco et al., 1995). Calcularam-se os estoques de C orgânico e N total do solo em função da camada equivalente e da massa equivalente de solo (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Maiores detalhes encontram-se no Capítulo I.

4.3.2.2 Estimativas das adições de C e N ao solo pelos sistemas de culturas

As adições anuais de C pelos sistemas de culturas, no período de 1985 a 2004, foram estimadas pela matéria seca produzida, índice de colheita das culturas produtoras de grãos e dados de outros autores no mesmo experimento ou área experimental. Para as culturas produtoras de grãos trigo, soja e milho, nos anos agrícolas 1998/99 (soja, milho e trigo) e 1999/00 (soja e trigo) o C foi determinado pela coleta de resíduos e análise da concentração de carbono total no tecido. Nos demais anos foi estimado pelo índice de colheita (IC), considerando-se em 40% a concentração de C no tecido. Para a aveia e o consórcio aveia + ervilhaca foram utilizados os dados obtidos por Ruedell (dados não publicados) de 1995 a 1997 e neste trabalho em 1998 e 2000 e a média das concentrações de C obtidas em 1998 e 2000 de 39,4% para aveia e 39,0% para aveia + ervilhaca. Para os demais anos extrapolou-se a média destes dados. Foram utilizadas as produções médias de resíduos de nabo forrageiro obtidas por Bianchi et al. (1997) e Fiorin et al. (1998) no mesmo período de cultivo e na mesma área experimental e a concentração de C na

matéria seca (34%) obtida por Bianchi et al. (1997)

Na estimativa da adição N considerou-se a entrada de N mineral através da adubação mineral e da fixação biológica da simbiose entre bactérias e plantas leguminosas. A adubação nitrogenada utilizada nas culturas de trigo e milho foi de 12,5 e 60 kg ha⁻¹ de N na semeadura e em cobertura, respectivamente (Ruedell, 1995). O balanço do N pela cultura da soja foi calculado com base na estimativa da fixação biológica de N₂ subtraindo-se a exportação de N pelo grão. Para a ervilhaca em consorciação com aveia preta, considerou-se as produções de matéria seca da parte aérea, composição de 50% para cada cultura e teor de N no tecido da ervilhaca em 3%.

Considerou-se a contribuição média do sistema radicular em 30% do total de C e N contidos na parte aérea (Bayer, 1996). Maiores detalhes encontram-se no Capítulo I.

4.3.2.3 Estimativas do coeficiente de humificação (k₁) e da taxa de perda de matéria orgânica (k₂)

As frações de C e N adicionados retidos na matéria orgânica do solo, denominado de coeficiente de humificação (k₁), foram estimadas a partir do coeficiente angular de regressão linear que relaciona as quantidades de C e N adicionadas anualmente (Capítulo I) com a taxa de variação anual (dC/dt; dN/dt) no estoque de COT e NT (Lovato et al., 2004), na camada de 0-20 cm do solo (Capítulo III). Assim, dC/dt foi estimada pela diferença do estoque de COT de cada tratamento do estoque de COT do solo na condição inicial (47,2 Mg ha⁻¹) dividida pelos anos de condução do experimento (19 anos).

A partir dos valores de adição anual de C pelos sistemas de culturas (A) e do coeficiente de humificação (k₁), obteve-se a adição efetiva de C ao solo (k₁A), que relacionada aos estoques de COT na camada de 0-20 cm, possibilitou a estimativa da taxa anual de perda de matéria orgânica do solo (k₂) em cada sistema de preparo do solo. Esta estimativa foi calculada através da equação:

$$dC/dt = k_1A - k_2C$$

onde:

dC/dt = variação do C do solo no tempo t ;

k_1 = coeficiente de humificação (%);

A = adição anual de C pelos sistemas de culturas ($Mg\ ha^{-1}$);

k_2 = taxa anual de perda de C;

C = estoque de COT ($Mg\ ha^{-1}$).

Este cálculo baseia-se na condição de $dC/dt = \text{zero}$ (Dalal & Mayer, 1986; Lovato et al., 2004). De acordo com Lovato et al. (2004), nesta condição, $k_1A = k_2C$ e $k_2 = k_1A/C_0$ em que C_0 representa o estoque de COT do solo na condição inicial e A representa a taxa de adição anual de C necessária para manter o estoque inicial de COT do solo inalterado ao longo do tempo, ou seja, $dC/dt = \text{zero}$.

O conteúdo de matéria orgânica no início da instalação do experimento era de $32\ g\ kg^{-1}$, na camada de 0-20 cm (Ruedell, 1995). Considerando uma densidade média do solo de $1,35\ Mg\ m^{-3}$ do solo cultivado e de $1,26\ Mg\ m^{-3}$ no campo nativo (referência) (Jantalia, 2005), bem como 58% da matéria orgânica como C, o conteúdo de carbono orgânico total no solo (COT) no início na instalação do experimento era de 50,11 e 44,02 $Mg\ ha^{-1}$, na camada de 0-20 cm, respectivamente calculados pela camada equivalente e massa equivalente. Considerando 5% da matéria orgânica como N, o conteúdo estimado de nitrogênio total no solo (NT) no início na instalação do experimento era de 3.456 $kg\ ha^{-1}$, calculado pela camada equivalente, e 3.036 $kg\ ha^{-1}$, calculado pela massa equivalente, na camada de 0-20 cm.

4.3.2.4 Cálculo do índice de manejo de carbono (IMC) do solo

O índice de manejo de carbono (IMC) do solo foi obtido a partir das concentrações de C das frações particulada (COP) e associada aos minerais (COAM) da matéria orgânica do solo. A estimativa do IMC foi realizada com base nos dados médios da camada de 0-20 cm e como condição natural o solo sob campo nativo, utilizado como referência (IMC = 100). Utilizou-se os dados da concentração de C obtidos por Jantalia (2005) para o campo nativo e, a proporção do fracionamento do C do solo obtido em campo nativo próximo ao experimento. Inicialmente foram estimados o índice de estoque de C (IEC), a

labilidade do C (LC) e o índice de labilidade do C (ILC) dos solos (De Bona, 2005):

$$IEC = ccCOT_{trat.} / ccCOT_{ref.}$$

$$LC = ccCOP / ccCOAM$$

$$ILC = LC_{trat.} / LC_{ref.}$$

onde:

- IEC = índice de estoque de C orgânico do solo;
 ccCOT_{trat.} = concentração de COT do solo do tratamento (g kg⁻¹ solo);
 ccCOT_{ref.} = concentração de COT do solo do sistema referência (g kg⁻¹ solo);
 LC = labilidade do C orgânico do solo;
 ccCOP = concentração de C da fração particulada da MOS (g kg⁻¹ solo);
 ccCOAM = concentração de C da fração associada aos minerais da MOS (g kg⁻¹ solo);
 ILC = índice de labilidade do C orgânico do solo;
 LC_{trat.} = labilidade do C orgânico do solo do tratamento;
 LC_{ref.} = labilidade do C orgânico do sistema referência.

A partir do IEC e ILC foi calculado o IMC, expresso em percentagem (De Bona, 2005):

$$IMC = IEC \times ILC \times 100$$

4.3.2.5 Taxa de perda do C orgânico do solo

A taxa de perda do C orgânico do solo foi estimada a partir da relação da evolução anual de CO₂ (respiração do solo) (Capítulo II) e o estoque de COT do solo (Capítulo III) dos sistemas de preparo do solo e de culturas. Nestes cálculos não foram consideradas as possíveis perdas de C por erosão.

A emissão de CO₂ do solo foi coletada com o aparato proposto por Anderson (1982), com algumas modificações segundo Kowalenko (1978) e Franzluebbbers et al. (1994), conforme descrito no item 2.3.2.1.

Os estoques de COT foram calculados em função da camada equivalente e da massa equivalente de solo (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005), conforme descrito no item 3.3.2.2.

A partir destes valores foi calculada a taxa de perda de C, através da evolução anual de CO₂, proporcional ao estoque de C no solo, expressa em

percentagem:

$$TP = CO_2 / COT \times 100$$

onde:

TP = taxa de perda de C orgânico do solo (%);
CO₂ = evolução de CO₂ do tratamento (Mg ha⁻¹);
COT = estoque de COT do tratamento (Mg ha⁻¹).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Alterações nos estoques de carbono orgânico total (COT) do solo

Na Figura 4.1. apresenta-se a relação entre a quantidade média de C adicionado (A) anualmente pelos sistemas de rotação de culturas e a taxa de variação anual (dC/dt) dos estoques de COT na camada de 0-20 cm em relação ao estoque inicial de COT em 1985 (50,1 e 44,0 Mg ha⁻¹, para camada e massa equivalente, respectivamente), nos sistemas de preparo convencional e plantio direto. Para comparação, os estoques de C foram calculados pelos métodos da camada equivalente e da massa equivalente. Verifica-se que os métodos de cálculo apresentaram comportamento diferente, sendo o da massa equivalente mais coerente com os tratamentos, pois o PD apresentou relação entre o C adicionado e taxa de variação anual (dC/dt) num patamar superior ao PC, enquanto que no cálculo pela camada equivalente ocorreu o contrário. Este comportamento é esperado pela maior adição anual de C no PD (Capítulo I - Tabela 1.9), o que estaria de acordo com o maior estoque de C no solo. Na metodologia de massa equivalente de solo, as espessuras das camadas são ajustadas de modo que as quantidades de solo nas camadas comparadas sejam equivalentes sob qualquer sistema de manejo. Neste cálculo é escolhido um sistema de referência para corrigir os demais tratamentos (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Este procedimento é adotado para corrigir o efeito da densidade do solo sobre o estoque de C, o que poderia mascarar o efeito do tratamento.

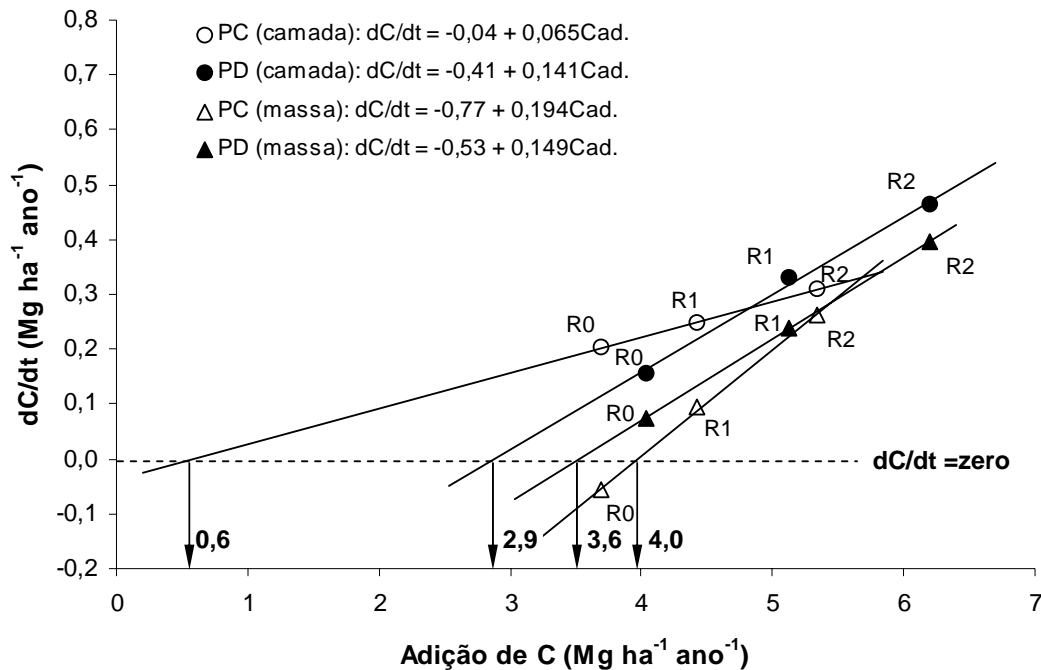


Figura 4.1. Relação entre a adição anual de C (A) com a variação dos estoques de C (dC/dt), calculados por camada equivalente e massa equivalente, na camada de 0-20 cm do solo submetido aos sistemas de preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD) e os sistemas de culturas trigo/soja (R0); aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2), em experimento conduzido há 19 anos.

O coeficiente angular das equações representa o coeficiente de humificação (k_1), ou seja, a fração do C adicionado que efetivamente permanece no solo (Lovato et al., 2004). No método da camada equivalente os valores de k_1 foram menores que na massa equivalente, nos tratamentos correspondentes. Observa-se que o k_1 foi maior no PD (14,1%) que no PC (6,5%), indicando a maior efetividade do PD em reter o C no solo. Entretanto, no método de massa equivalente, ocorreu o inverso, com o PD (14,9%) apresentando valores de k_1 que o PC (19,4%). Estes valores estão dentro da faixa de 7 a 23% relatada na literatura (Bolinder et al., 1999, citado por Lovato et al., 2004), com exceção do PC, na camada equivalente, que apresentou valor menor que esta faixa. Lovato et al. (2004), também obtiveram valores próximos e superiores no PD, de 12,9 e 11,5% para o PD e PC, respectivamente. Os autores, consideraram que estes valores obtidos por este procedimento podem estar subestimados devido ao fato de que a adição de C

pelas culturas podem compensar as maiores quantidades perdidas de COT anualmente (k_2C) nos tratamentos que apresentam maiores estoques de COT no solo, determinando menor coeficiente angular da equação que relaciona a adição anual de C com a variação de COT no solo (dC/dt). Ou seja, os tratamentos com maior adição de C através dos resíduos vegetais (A), no procedimento de cálculo manteriam ou teriam pouca alteração na relação dC/dt , levando a diminuição da inclinação da reta (coeficiente angular) e, conseqüentemente, na subestimação do k_1 .

A partir da obtenção do k_1 , pode-se obter a taxa anual de perda de matéria orgânica do solo (k_2), partindo-se da equação $dC/dt = k_1A - k_2C$, na condição de $dC/dt = \text{zero}$ (Dalal & Mayer, 1986; Bayer, 1996; Bayer et al., 2000; Lovato et al., 2004). Estimada pela Figura 4.1., a adição anual de C (A) para manter o estoque inicial de COT do solo (50,1 e 44,0 Mg ha⁻¹, para camada e massa equivalente, respectivamente) seria de 2,9 e 3,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o PD e de 0,6 e 4,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no PC, pela camada equivalente e massa equivalente, respectivamente. Os valores obtidos no cálculo da camada equivalente contrariam os obtidos por Lovato et al. (2004), que obtiveram valores bem menores no PD (4,2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) do que no PC (8,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). No cálculo por massa equivalente, as relações seguem a mesma tendência obtida por Lovato et al. (2004), com valores próximos para o PD, mas 2,2 vezes menor para o PC.

Considerando que, os resíduos vegetais, em média, apresentaram 40% de C (Capítulo I - Tabela 1.6), estes valores corresponderiam a 7,3 e 9,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o PD e de 1,5 e 10,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no PC, pela camada equivalente e massa equivalente, respectivamente, a necessidade de aporte de matéria seca de resíduos vegetais por ano para manter o estoque inicial. Entretanto, este estoque foi 11 e 22% inferior ao original, estimado no campo nativo (56,4 Mg ha⁻¹ – Tabela 3.1), para camada e massa equivalente, respectivamente. Assim, na busca da qualidade do solo e produtividade das culturas, acredita-se que a adição de C/resíduos vegetais deveria ser maior que o de apenas manter o estoque inicial.

A estimativa dos valores de k_1 e de A, levaram a uma taxa anual de perda do COT (k_2) ($k_2 = k_1A/C$) de 0,0008 ano⁻¹ ($0,065 \times 0,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} / 50,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 0,0176 ano⁻¹ ($0,194 \times 4,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} / 44,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) no PC e

0,0082 ano⁻¹ (0,141 x 2,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ / 50,1 Mg ha⁻¹) e 0,0135 ano⁻¹ (0,149 x 4,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ / 44,0 Mg ha⁻¹) no PD, pela camada equivalente e massa equivalente, respectivamente. Considerando a maior coerência da massa equivalente, as taxas anuais de perda de C (k_2) estariam bastante próximas entre os sistemas, com o PD apresentando taxas menores que o PC. Estes resultados concordam com os obtidos por Lovato et al. (2004), com valores de k_2 de 0,0314 ano⁻¹ e 0,0166 para PC e PD, respectivamente, mas novamente semelhantes para PD, mas bem menores para o PC.

Este comportamento diferenciado pode estar relacionado ao tipo de solo, pois Lovato et al. (2004) conduziram o trabalho num Argissolo Vermelho típico com menor teor de argila (240 g kg⁻¹), quando comparado ao Latossolo Vermelho distrófico típico deste trabalho (570 g kg⁻¹). As taxas de seqüestro de carbono são bastante variáveis, em decorrência do tipo de solo (textura e mineralogia), condições climáticas (temperatura e precipitação) e sistema de rotação de culturas adotado (aporte de resíduos) (Bayer, 2004). Solos mais argilosos são menos suscetíveis às variações de C devido a proteção física da argila sobre a matéria orgânica do solo (Duxbury et al.; 1989). Outra diferença entre os trabalhos é a forma de condução do PC, enquanto Lovato et al. (2004) utilizaram uma aração e duas gradagens leves por ano, neste trabalho nos últimos anos foi utilizado grade pesada (globe) seguido de grade leve, duas vezes por ano (Ruedell, 1995). Para Reicosky & Lindstron (1993), as gradagens apresentam menor perda de C pelo fluxo de C-CO₂ quando comparadas aos preparos convencionais que usam aração, devido ao menor distúrbio causado ao solo.

4.4.2 Índice de manejo de carbono (IMC) do solo

O índice de manejo do carbono (IMC) tem por finalidade avaliar a qualidade do sistema de manejo através da avaliação do seu efeito no estoque e labilidade do C orgânico do solo (Blair et al., 1995; De Bona, 2005). Inicialmente utilizou-se o fracionamento químico, através da oxidação do C lábil da MOS com permanganato de K (KMnO₄) para determinação das frações lábeis (Blair et al., 1995) e recentemente o fracionamento físico (De Bona, 2005). Neste trabalho, utilizou-se o fracionamento físico, separando-se a fração

particulada (COP) da associada aos minerais (COAM) (Roscoe & Machado, 2002; Conceição, 2002).

Na Tabela 4.1. são apresentados o índice de estoque de C (IEC), a labilidade do C (LC), o índice de labilidade do C (ILC) e o índice de manejo do C (IMC) do solo sob sistemas de rotação nos preparos do solo PC e PD.

Tabela 4.1. Índice de estoque de C (IEC), labilidade do C (LC), índice de labilidade do C (ILC) e índice de manejo do C (IMC) do solo sob sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional (PC) e plantio direto (PD), e sob campo nativo, na camada de 0-20 cm.

Tratamento	IEC	LC	ILC	IMC
PC R0 ¹	0,86	0,08	0,56	48
PC R1	0,89	0,10	0,73	65
PC R2	0,93	0,10	0,70	65
PD R0	0,89	0,11	0,82	72
PD R1	0,94	0,11	0,82	77
PD R2	0,99	0,11	0,78	78
Campo nativo	1,00	0,14	1,00	100

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/ soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja.

O índice de estoque de C (IEC) foi crescente nas rotações R0, R1 e R2, dentro de cada preparo, mas com pequena amplitude (0,86 a 0,99) correspondendo a seqüência das concentrações médias de C nos tratamentos (Apêndice 3.2). A LC e o ILC foram inferiores no PC, quando comparado ao PD, sendo que os menores valores foram encontrados na monocultura em preparo convencional (PC R0). Na média das rotações o solo sob PD apresentou um valor de ILC aproximadamente 22% superior ao solo sob PC.

Esses resultados demonstram a maior sensibilidade do ILC, comparativamente ao IEC, em detectar alterações na MOS (De Bona, 2005). O IMC seguiu a tendência dos índices anteriores, IEC e ILC, com o PD apresentando valores superiores ao PC. Destaca-se, que as rotações R1 e R2 apresentaram valores próximos e superiores a monocultura R0, em ambos os sistemas de preparo. De acordo com a finalidade do IMC (Blair et al., 1995), as reduções observadas no PC e nas monoculturas sugerem que essas práticas

diminuem a qualidade do sistema de manejo, enquanto que o PD associado às rotações (PD R1 e PD R2) melhoram a qualidade do solo.

De Bona (2005), trabalhando com PC e PD com e sem irrigação em Argissolo Vermelho distrófico típico, encontrou valores do IMC variando de 61 a 95. Os valores do IEC foram próximos, com valores médios de 0,98 para De Bona (2005) e 0,92 neste trabalho.

Não foi verificado na literatura classificação para o IMC em relação ao aceitável para a qualidade do solo, sendo os valores apenas comparativos entre os tratamentos.

4.4.3 Taxa de perda de C orgânico do solo

As emissões de CO₂ são dependentes da atividade biológica, que por sua vez são dependentes da disponibilidade de resíduos vegetais (fontes de alimento e energia), além de outros fatores. A atividade biológica mais expressiva, medida pela respiração do solo, pode ser interpretada como positiva ou negativa por envolver dois processos básicos: perda de C e ciclagem de nutrientes (Parkin et al., 1996; Conceição, 2002).

A evolução de C-CO₂ foi relacionada ao estoque de C no solo (Tabela 4.2). Esta taxa de perda de C na forma de CO₂, com base no cálculo do estoque de COAM pela camada equivalente, foi superior no PC em relação ao PD e, para COAM e COT esta taxa foi semelhante entre os sistemas de preparo. Calculando o estoque pela massa equivalente estas relações se mantêm. Para COP, o PD apresentou menor taxa de perda em ambos os métodos de cálculo, provavelmente, devido ao maior estoque de C nesta fração, relação ao PC. Neste cálculo a taxa de perda de COT ficou, em média, 0,163 e 0,196 ano⁻¹ para o PC e, 0,163 e 0,189 ano⁻¹ para o PD. As monoculturas, em geral, apresentaram taxas de perdas maiores que as rotações de culturas dentro de cada sistema de preparo, em ambos os métodos de cálculo.

As altas taxas de perdas através da evolução de C-CO₂ encontradas no COP, na média acima de 200%, podem indicar a alta labilidade desta fração, necessitando de uma reposição constante através dos resíduos vegetais. Mas, principalmente, que a principal fonte de C para atividade microbiana são

resíduos vegetais maiores que 2,0 mm, os quais ainda não fazem parte do COP. E, apesar da proteção física exercida pelos minerais do solo (estabilidade física) (Duxbury et al., 1989; Bayer, 1996), o COAM também é fonte importante para esta atividade. Saliencia-se que esta medição da evolução de C-CO₂ do solo abrange também a respiração das raízes e da microbiota, o que pode superestimar as taxas de perda de C, principalmente, pela ação das raízes.

Sob o ponto de vista de emissão do principal gás de efeito estufa, o CO₂, o tratamento PD R2 apresentou maior emissão acumulada anual, média de cerca de dois anos (728 dias). Porém, a maior emissão está associada, às maiores adições de resíduos (Capítulo I) e conseqüentemente C (Figura 4.1), resultando num balanço líquido positivo de C do solo, demonstrado pelo maior estoque de COT no solo (59,32 e 53,52 Mg ha⁻¹). Essa afirmativa é confirmada pelos resultados obtidos por Lovato (2001), que encontrou no sistema PD aveia +ervilhaca/milho+caupi, alto aporte anual de C (7,83 Mg ha⁻¹) e alto seqüestro de CO₂ (26 Mg ha⁻¹), em relação aos demais tratamentos utilizados. Neste mesmo sentido, Conceição (2002) obteve nos sistemas mucuna/milho e guandu/milho as maiores emissões de CO₂, mas compensadas pelas maiores adições de resíduos.

Sob o ponto de vista de ciclagem dos nutrientes, sistemas com atividade biológica mais intensa permitem uma disponibilização mais rápida dos nutrientes à cultura subsequente (Conceição, 2002). O autor faz inferências que, em contrapartida, na ausência de plantas para absorverem esses nutrientes, essa rápida liberação pode potencializar as perdas de elementos mais móveis por lixiviação. Novamente, o sistema PD R2, apresenta maior ciclagem de nutrientes, pela maior atividade biológica e, por apresentar o cultivo permanente do solo, permite maior aproveitamento dos nutrientes ciclados.

A agregação do solo favorece a proteção física estrutural da matéria orgânica à ação das enzimas dos microrganismos (Duxbury et al., 1989). O maior conteúdo de COT encontrado no tratamento que associa manejo conservacionista, PD, com rotação de culturas, de inverno e verão, e utilização de plantas de cobertura (adubação verde), R2, pode ser explicado também pela maior agregação do solo.

Tabela 4.2. Taxa de perda anual de C relacionando a evolução acumulada de CO₂ anual e o estoque de COP, COAM e COT, na camada de 0-20 cm, calculado pela camada equivalente e pela massa equivalente, no solo sob sistemas de rotação inseridos nos preparos convencional (PC) e plantio direto (PD).

Tratamento	Evolução de CO ₂	Estoque de C		Taxa de perda ²	
		Camada	Massa	Camada	Massa
		Mg ha ⁻¹		%	
		COP			
PC R0 ¹	8,95	3,33	2,78	269,0	321,8
PC R1	9,07	4,30	3,72	211,0	243,7
PC R2	8,90	4,29	3,84	207,3	231,8
Média	8,97	3,97	3,45	229,10	265,80
PD R0	8,94	4,60	3,94	194,2	226,7
PD R1	9,03	4,89	4,29	184,8	210,5
PD R2	9,48	4,76	4,33	199,2	218,7
Média	9,15	4,75	4,19	192,72	218,64
		COAM			
PC R0	8,95	50,65	40,20	17,7	22,3
PC R1	9,07	50,52	42,09	18,0	21,5
PC R2	8,90	51,70	45,18	17,2	19,7
Média	8,97	50,95	42,49	17,61	21,17
PD R0	8,94	48,48	41,47	18,4	21,6
PD R1	9,03	51,51	44,27	17,5	20,4
PD R2	9,48	54,15	47,21	17,5	20,1
Média	9,15	51,38	44,32	17,83	20,68
		COT			
PC R0	8,95	53,97	42,98	16,6	20,8
PC R1	9,07	54,81	45,81	16,5	19,8
PC R2	8,90	56,00	49,02	15,9	18,2
Média	8,97	54,93	45,94	16,34	19,59
PD R0	8,94	53,08	45,41	16,8	19,7
PD R1	9,03	56,40	48,56	16,0	18,6
PD R2	9,48	58,90	51,55	16,1	18,4
Média	9,15	56,13	48,50	16,32	18,89

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja. ² Taxa de perda = evolução de CO₂ / estoque de COT.

Campos et al. (1995), trabalhando neste mesmo experimento, verificaram que o PD apresentou estabilidade dos agregados do solo cerca de duas vezes maior que o PC, bem como efeito benéfico da rotação de culturas no aumento desta estabilidade, quando comparada à sucessão trigo/soja (R0). Esta estabilidade teve correlação direta com o conteúdo de COT do solo.

Na Tabela 4.3, é apresentada outra forma de cálculo da taxa de perda anual de C (k_2) através da estimativa do C-CO₂ proveniente da decomposição dos resíduos, considerando o coeficiente de humificação (k_1) de 6,5% para o PC e de 14,1% para o PD, obtido no cálculo da camada equivalente e de 19,4 e 14,9% para PC e PD, respectivamente, no cálculo por massa equivalente (Figura 4.1). Este valor foi descontado do total anual do C-CO₂ evoluído e a diferença considerada como C-CO₂ proveniente do solo, que foi dividido pelo estoque de COT do solo, obtendo-se a nova taxa de perda (k_2).

Verifica-se que os valores de k_2 estimados por esta relação foram superiores ao estimado pela equação (dC/dt), que foram de 0,001 ano⁻¹ e 0,018 ano⁻¹ no PC e 0,008 ano⁻¹ e 0,014 ano⁻¹ no PD, pela camada equivalente e massa equivalente, respectivamente. Isso pode estar relacionado ao fato que esta medição da evolução de C-CO₂ do solo abrange também a respiração das raízes e da microbiota.

Entretanto, considerando o método de cálculo massa equivalente, os resultados obtidos nesta nova forma de cálculo apresentaram tendência similar aos obtidos pela dC/dt , pois o PD (0,118 ano⁻¹) apresenta taxa de perda menor que o PC (0,100 ano⁻¹) que correlacionam-se melhor com o estoque de COT no solo e concordam com Lovato et al. (2004) que também obtiveram taxa menor no PD do que no PC.

Em média, o solo foi a principal fonte de C-CO₂ para a atmosfera, em comparação à decomposição dos resíduos vegetais (Tabela 4.3).

4.4.4 Alterações nos estoques de nitrogênio total (NT) do solo

O conteúdo de matéria orgânica no início na instalação do experimento era de 32 g kg⁻¹, na camada de 0-20 cm (Ruedell, 1995). Considerando uma densidade média do solo de 1,35 Mg m⁻³ no solo cultivado e de 1,26 Mg m⁻³ no campo nativo (referência) (Jantalia, 2005), bem como 4% da matéria orgânica

como N, o conteúdo de nitrogênio orgânico no solo no início na instalação do experimento era de 3,46 e 3,04 Mg ha⁻¹, na camada de 0-20 cm, calculados pela camada equivalente e massa equivalente.

Tabela 4.3. Taxa de perda anual de C do solo (k_2) calculada pela adição anual de C pelos resíduos vegetais, coeficiente de humificação, C-CO₂ evoluído por ano e estoque de COT na camada de 0-20 cm.

Tratamento	C-CO ₂ evoluído	Adição de C pelos resíduos	C-CO ₂ dos resíduos	C-CO ₂ do solo	Estoque de COT	Taxa de perda ² (k_2)
Camada equivalente						
PC R0 ¹	8,95	3,70	3,46	5,49	53,97	0,102
PC R1	9,07	4,43	4,14	4,93	54,81	0,090
PC R2	8,90	5,34	4,99	3,91	56,00	0,070
Média	8,97	4,49	4,20	4,78	54,93	0,087
PD R0	8,94	4,03	3,46	5,48	53,08	0,103
PD R1	9,03	5,12	4,40	4,63	56,40	0,082
PD R2	9,48	6,20	5,33	4,15	58,90	0,071
Média	9,15	5,12	4,40	4,75	56,13	0,085
Massa equivalente						
PC R0 ¹	8,95	3,70	2,98	5,97	42,98	0,139
PC R1	9,07	4,43	3,57	5,50	45,81	0,120
PC R2	8,90	5,34	4,30	4,60	49,02	0,094
Média	8,97	4,49	3,62	5,35	45,94	0,118
PD R0	8,94	4,03	3,43	5,51	45,41	0,121
PD R1	9,03	5,12	4,36	4,67	48,56	0,096
PD R2	9,48	6,20	5,28	4,20	51,55	0,082
Média	9,15	5,12	4,35	4,80	48,50	0,100

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja.

² Taxa de perda = C-CO₂ do solo / estoque de COT.

Na maioria dos solos, apenas em torno de 5% do nitrogênio total está na forma mineral absorvida pelas plantas, como nitrato (NO₃) e amônio (NH₄⁺). A maior parte da reserva de N no solo é de natureza orgânica (95%), estando sujeita às transformações que determinam as relações de equilíbrio entre N

orgânico e mineral (Aita et al., 2003). Desta forma, os valores obtidos para nitrogênio orgânico serão considerados como nitrogênio total (NT) do solo no início da instalação do experimento.

Não houve correlação entre a estimativa da adição anual de N pelos sistemas de culturas e o estoque de NT no solo (Figura 4.3). Pelo método da cálculo massa equivalente, as curvas apresentaram comportamento inverso ao esperado, pois as maiores adições anuais de N (A) resultaram em menores estoques de N (dN/dt) no solo. Neste método, a estimativa do coeficiente de humificação (k_1) ficou em 87% para o PC e de 102% para o PD, valores muito altos e não relacionados como o possível comportamento do N no solo. Estes resultados indicam que as estimativas do N adicionado não foram coerentes.

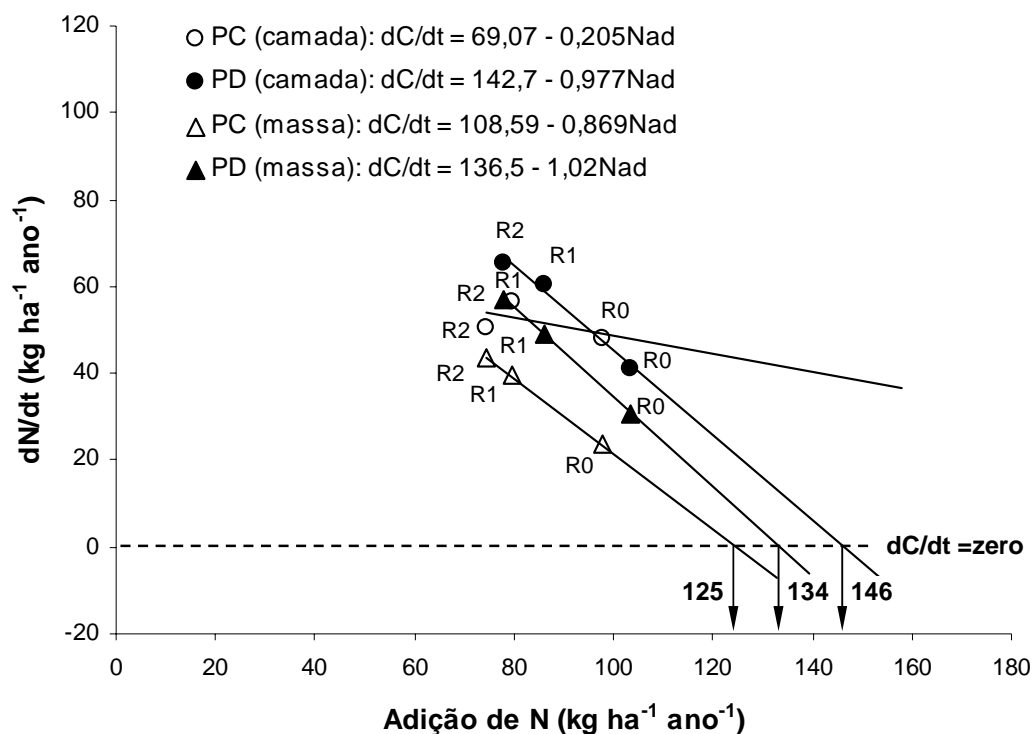


Figura 4.3. Relação entre a adição anual de N (A) com a variação dos estoques de N (dN/dt), calculados por camada equivalente e massa equivalente, na camada de 0-20 cm do solo submetido aos sistemas de preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD) e os sistemas de culturas trigo/soja (R0); aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2), em experimento conduzido há 19 anos.

Conforme já discutido no Capítulo I, a avaliação das quantidades de N adicionadas ao solo pelos sistemas de culturas apresenta dificuldades maiores que as relativas às adições de C (Lovato et al., 2004). Segundo os autores, enquanto todo o C adicionado pela fitomassa vem do ar via fotossíntese, o N na fitomassa vem do solo, da fixação simbiótica e da adubação nitrogenada, dificultando a separação do N reciclado, daquele normalmente adicionado ao sistema.

As adições de N pela chuva e fixação assimbiótica normalmente não são consideradas (Lovato et al., 2004). A adição pela chuva é semelhante entre os tratamentos, devido às pequenas distâncias entre os mesmos. Entretanto, a adição via assimbiótica, principalmente em associações entre gramíneas e bactérias diazotróficas, pode ser expressivas (Döbereiner, 1992). Assim, a adição de N nos sistemas que possuem a gramínea aveia preta, R1 e R2, pode ser subestimada pois não foi considerada a fixação assimbiótica. Salienta-se que as condições de cultivo da aveia são mais favoráveis a esta adição de N, do que as outras gramíneas trigo e milho, devido ao não uso de adubação nitrogenada, pois a fixação de N é inibida em presença de N mineral (Ruschel & Pontes, 1992). É necessário buscar formas mais adequadas de estimar a entrada de outras fontes de N nos sistemas de cultivo.

O balanço do N no solo apresenta várias dúvidas: os sistemas estariam perdendo N? A adição de N mineralizaria o N do solo (efeito “priming”)? A exportação pelo grão decresceria o estoque de N do solo? Os sistemas não apresentam grandes aportes de N para o solo e poderiam levar ao balanço negativo e estarem esgotando as reservas do solo? Ou realmente, as outras formas de adição de N, como por exemplo a fixação assimbiótica, não estariam sendo consideradas e a estimativa da adição estaria errada?

4.5 CONCLUSÕES

A interação do PD com rotação de culturas de inverno e verão (aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja) apresentou maior emissão acumulada de CO₂, porém, as maiores adições de C, que resultaram num balanço líquido positivo de C do solo, demonstrado pelo maior estoque de COT no solo.

O PD apresentou coeficiente de humificação (k_1) maior que no PC, indicando a maior efetividade do PD em reter o C aportado ao solo. Entretanto, a taxa anual de perda do COT (k_2) foi maior no PD do que no PC, devido provavelmente ao maior estoque de C no solo.

O método de cálculo do estoque de COT, massa equivalente apresentou melhor relação entre o C adicionado e taxa de variação anual (dC/dt) do C do solo, quando comparado ao método de cálculo camada equivalente.

O índice de manejo de carbono (IMC), foi eficiente em discriminar os tratamentos, apresentado valores superiores no PD em relação ao PC, bem como, nas rotações aveia/soja/trigo/soja (R1) e aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja (R2) em relação à monocultura trigo/soja R0, em ambos os sistemas de preparo, indicando que sistemas sob PD e rotação de culturas apresentam matéria orgânica do solo de melhor qualidade.

Não houve correlação entre a estimativa da adição anual de N pelos sistemas de culturas e o estoque de NT no solo.

5. AVALIAÇÃO DA CONJUNTURA E RECOMENDAÇÕES

O plantio direto está consolidado no Planalto do Rio Grande do Sul. Facilitar o trabalho, diminuir os custos de produção, principalmente, o do combustível, e controlar a erosão, foram os fatores preponderantes para sua consolidação.

No verão, o plantio direto é conduzido basicamente sob monocultura de soja e, no inverno, com aveia preta e trigo. A aveia preta é usada para pastoreio, produção de sementes e, em alguns casos, como planta de cobertura do solo.

Fica evidente neste trabalho as vantagens do plantio direto quando associado à rotação de culturas, no aumento do carbono do solo e, conseqüente melhoria da qualidade do solo e aumento da produtividade das culturas. Vários outros trabalhos também demonstram as expressivas vantagens da rotação de culturas (Derpsch, 1986; Sá, 1994; Santos et al., 1993; Ruedell, 1995; Campos et al., 1995; Fiorin & Campos, 1998). Nota-se que não existe conflito de opinião sobre as vantagens técnicas da rotação de culturas, tanto entre os pesquisadores, quanto entre a maioria dos extensionistas.

Um dos entraves à rotação de culturas no verão, a qual tem como base as culturas de soja e milho, é a limitação da produtividade de milho ocasionada pelas estiagens freqüentes que ocorrem no verão gaúcho. Embora o risco seja alto, na safra 2004/2005, na qual ocorreu estiagem histórica no RS, o milho semeado nos meses de agosto e setembro obteve produtividade satisfatória na região de Cruz Alta (em torno de 6000 kg ha⁻¹). O milho, semeado mais tarde, e a cultura da soja, tiveram suas produtividades seriamente afetadas nesta safra. Ao contrário da soja, o milho apresenta a grande vantagem da amplitude de épocas de semeadura, podendo ser semeado desde julho até fevereiro, em várias regiões do Planalto.

Acredita-se que os grandes entraves da rotação de culturas ocorram “fora da porteira”. Entre os quais, podem ser citados a dificuldade de comercialização (liquidez) do milho e do trigo em relação à soja. Além disso, o milho ocupa grande volume no armazenamento e envolve menor montante

financeiro. Desta forma, muitas empresas que comercializam grãos, entre as quais as cooperativas, não recebem milho em seus armazéns, dificultando mais ainda a comercialização deste cereal. No caso do trigo, existem acordos comerciais com a Argentina que dão vantagens ao produto oriundo do país vizinho, em troca de vantagens aos produtos originados da indústria brasileira.

Há vários anos a economia brasileira segue as regras do livre mercado, no qual o preço dos produtos é determinado pelas leis de oferta e demanda. Atualmente, os produtos agrícolas, na sua maioria, possuem preços baixos. A soja, em particular, tem seu preço baixo devido ao câmbio, fato que, de certa forma, influencia o preço dos demais produtos agrícolas. Assim, o setor primário tem suas margens de lucro reduzidas.

Neste panorama, restam ao produtor, basicamente, duas alternativas: esperar que o governo intervenha no mercado e melhore os preços dos produtos, o que é pouco provável; ou agir visando reduzir os custos de produção, para manter ou até mesmo, aumentar a lucratividade da empresa agrícola. Entende-se que a rotação de culturas, aliada as práticas de manejo, como o monitoramento da aplicação de produtos fitossanitários, racionalização da adubação, diversificação de cultivares e épocas de semeadura, entre outras práticas, possa contribuir para atingir a sustentabilidade da propriedade agrícola. Para isto é necessário que o agricultor adote a “semeadura direta” associada à rotação de culturas. Assim, os benefícios do **sistema plantio direto** poderão ser verificados sobre a rentabilidade da sua propriedade e, no sentido mais amplo, sobre a comunidade regional na qual está inserido, tanto no enfoque sócio-econômico como ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C. **Couplage des cycles du carbone et de l'azote dans les sols cultivés: Étude, au champ, des processus de décomposition après apport de matière organique fraîche.** 1996, 209f. Tese (Doutorado) - Université Paris 6, Sciences de la Terre, Paris, 1996.

AITA, C.; HÜBNER, A.P.; ANTONIOLLI, Z.I. & FRIES, M.R. **Microbiologia agrícola: aulas teóricas.** Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 121p. (apostila didática)

ALLISON, F.E. Soil organic matter and its role in crop production. **Developments in Soil Science**, 3, 1973.

ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; F.M. FERNANDES; HECKLER, J.C.; MACEDO, R.A.T.; BODDEY, R.M., JANTALIA, C.P. & URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41: 449-456, 2006.

AMADO, T.J.C. Participação no “Third USDA Symposium on Greenhouse Gases & Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry” – Baltimore, Maryland (EUA) e Visita Técnica a Kansas State University e ao “Consortium for Agricultural Soils Mitigation of Greenhouse Gases” – Manhattan, Kansas (EUA). Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 10p. (Relatório técnico).

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & FERNANDES, S.B.V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:179-189, 2000.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. & BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:679-686, 1999.

AMADO, T.J.C.; SANTI, A. & ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. II – Influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:1085-1096, 2003.

ANDERSON, J.M. & INGRAM, J.S.I. eds. Tropical Soil Biology. **A Handbook of Methods**. Londres, CAB International, 1993. p.41-43.

ANDERSON, J.P.E. Soil respiration. In: PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy. v. 2, 1982. p.831-871.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. Soil structure: classification and genesis. In: BAVAR, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. **Soil physics**. New York, John Wiley, 1973. p.130-177.

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

BAYER, C. **Características químicas do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por métodos de preparo do solo e sistemas de culturas** 1992. 172f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996, 240f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C. Seqüestro de carbono em solos sob plantio direto. **Boletim Informativo**. SCBS, 29:26-28, 2004.

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**, 65:1473-1478, 2001.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:599-607, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. **Ciência Rural**, 28:23-28, 1998.

BIANCHI, M.A.; FIORIN, J.E.; CANAL, I.N.; PETRERE, C. & CAMPOS, B.C. Resposta do trigo a culturas semeadas após o milho no sistema plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Resumos...**, Rio de Janeiro, SBCS, 1997. (CD-ROM).

BLAIR, J.B.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**: 46:1459-1466, 1995.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedade dos solos**. São Paulo, McGraw-Hill, 1984.

BUYANOVSKY, G. A.; WAGNER, G.H. & GANTZER, C.J. Soil respiration in a winter wheat ecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, 50:338-344, 1986.

CAMBARDELLA, C.C. & ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of American Journal**, 56: 777-783, 1992.

CAMPBELL, C. A., BIERDENBECK, V. O.; ZENTNER, R.P. & LAFOND, G.P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Canadian Journal of Soil Science**, 71:363-376, 1991.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:121-126, 1995.

CARTER, M. R. Microbial biomass as an index of tillage-induced changes in soil biological properties. **Soil Tillage Research**, 7:29-42, 1986.

CARTER, M.R. & D.A. RENNIE. Changes in soil quality under no-tillage farming systems: Distribution of microbial biomass and mineralizable C and N potential. **Canadian Journal of Soil Science**, 62:587-597, 1982.

CERRI, C.C.; ANDREUX, F. & EDUARDO, B.P. O ciclo do carbono no solo. In.: CARDOSO, E.J.B.N., TSAI, S.M. & NEVES, M.C.P., eds. **Microbiologia do solo**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.73-90.

CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; DAVIDSON, E.A.; BERNOUX, M. & FELLER, C. A ciência do solo e o seqüestro de carbono. **Boletim Informativo**. SCBS, 29:29-34, 2004.

CHIAPINOTTO, I.C. **Decomposição de palha de aveia presta e dejetos de suínos em solo sob plantio direto**. 2003, 62f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

CONCEIÇÃO, P.C. **Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de manejo do solo**. 2002, 125f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, 24:281-292, 1986.

DA ROS, C.O. **Dinâmica do carbono e do nitrogênio com o uso de uréia, na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto**. 2004, 129f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

DE BONA, F. D. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional**. 2005, 130f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DEBARBA, L. **Simulação pelo modelo Century do impacto da agricultura sobre o estoque de carbono orgânico em solos do Planalto Rio-Grandense**. 2002, 172f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DEBARBA, L. & AMADO, T.J.C. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:473-480, 1997.

DERPSCH, R. **Rotação de culturas, plantio direto e convencional**. São Paulo, Ciba Geigy, 1986. 10p.

DICK, W.A. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity . **Soil Science Society of America Journal**. Madison, 47:102-107, 1983.

DÖBEREINER, J. Fixação de nitrogênio em associação com gramíneas. In.: CARDOSO, E.J.B.N., TSAI, S.M., NEVES, M.C.P. **Microbiologia do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1992. p. 173-180.

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

ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, 75:529-538, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro : EMBRAPA-Solos, 1999. 412p. (EMBRAPA-Solos. Documentos, 15)

ESWARAN, H.; van den BERG, E. REICH, P. Organic carbon in soils of the world. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, 57:192-194, 1993.

FIORIN, J.E.; BIANCHI, M.A.; CANAL, I.N. PETRERE, C. & CAMPOS, B.C. Resposta do trigo a adubação verde de verão e uso de nitrogênio no sistema plantio direto. In: FERTIBIO 98, Caxambu, 1998. **Resumos...**, Lavras, UFLA/SBCS/SBM, 1998. p.329.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M. & ZUBERER, D. A. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, 58:1639-1645, 1994.

FRIES, M.R. Microbiologia e matéria orgânica: recuperação pelo sistema plantio direto. In: FRIES, M.R. & DALMOLIN, R.S.D., coord., **Curso de Atualização em Recomendação de Adubação e Calagem**: ênfase em plantio direto, 3., Santa Maria, 1997. Santa Maria, Pallotti, 1997. p.47-75.

GARCÍA, F.O. Agricultura Sustentable y Materia Orgánica del Suelo: Siembra Directa, Rotaciones y Fertilidad. In: **CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO**, 3., Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2003. 9 p. (CD-ROM)

HOUGHTON, R.A.; HOBBIE, J.E.; MELILLO, B.M.; MORE, B. PETERSON, B.J.; SHAVER, G.R. & WOODWELL, G.M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860-1980L A net release of CO₂ to the atmosphere. **Ecological Monographs**, 53:235-262, 1983.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em 27 jun. 2006.

INDA JR., A.V.; KLAMT, E. & NASCIMENTO, P.C. Composição da fase sólida mineral do solo. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**, 2. ed. Porto Alegre, Genesis, 2004. p.35-71.

JANTALIA, C.P. Estudo de sistemas de uso do solo e rotações de culturas em sistemas agrícolas brasileiros: dinâmica de nitrogênio e carbono no sistema solo – planta – atmosfera. 2005, 137f. Tese (Doutor em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; BRANDT, S.A. et al. Light-fraction organic matter in soils from long term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, 56:1799-1806, 1992.

KERN, J.S. & JOHNSON, M.G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. **Soil Science Society of America Journal**, 57:200-210, 1993.

KOWALENKO, C.G.; IVARSON, K.C. & CAMERON, D.R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 10:417-423, 1978.

LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. 1995. **Soils and global change**. Advances in Soil Science. Florida, 267p.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

MACHADO, P.L.O.; BODDEY, R.; MADARI, B.; RODRIGUES, J.R. & URQUIAGA, S. Os solos brasileiros e o seqüestro de carbono. **Boletim Informativo**. SCBS, 29: 21-25, 2004.

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

MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, UFLA, 2002. 626p.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Secção de Geografia, 1961. 38p.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A. & LOEPPERT, R.H. (eds.) **Methods of soil analysis: chemical methods**. Part 3. Madison, American Society of America, 1996. p.961-1010.

NEVES, H.J.C. Disponível em <<http://www.dq.fct.unt.pt/qof/chem6.html>>. Acesso em: 26 nov. 2004.

NICOLOSO, R.S. Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto. 2005, 149f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

PARKIN, T.B.; DORAN, J.W.; FRANCO-VIZCAÍNO, E. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.231-246. (Special Publication Number 49).

REICOSKY, D.C. & LINDSTRON, N.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, 85:1237-1245, 1993.

REICOSKY, D.C. Soil manegement and CO₂ sequestration. Encontro Brasileiro sobre Substâncias Húmicas, 3., Santa Maria, 1999. **Anais**. Santa Maria, Grupo Brasileiro da Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas, 1999. P. 135-144.

RHEINHEIMER; D.S.; CAMPOS, B.C.; GIACOMINI, S; CONCEIÇÃO, P.C. E BORTOLUZZI, E.C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Ciência Rural** (no prelo)

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. **Macrozoneamento agroecológico e econômico**. Porto Alegre: SAA/EMBRAPA-CNPT, 1994. v.2. 57p.

ROSCOE, R. & MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, Embrapa Solos, 2002. 86p.

RUEDELL, J. **Plantio direto na região de Cruz Alta**. Cruz Alta, FUNDACEP, 1995. 134p.

RUSCHEL, A.P. & PONTES, M.C.F. Fixação biológica de nitrogênio por microrganismos assimbióticos. In.: CARDOSO, E.J.B.N., TSAI, S.M. & NEVES, M.C.P., eds. **Microbiologia do Solo**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.173-200.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema de plantio direto. In: CNPT-EMBRAPA, FUNDACEP-FECOTRIGO, FUNDAÇÃO ABC. **Plantio Direto no Brasil**. Passo Fundo, Aldeia Norte, 1994. p.37-60.

SALTON, J.C. & MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um solo podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:313-319, 1995.

SANTOS, H.P.; REIS, E.M. & DERPSCH, R. Rotação de culturas. In: CNPT-EMBRAPA, FUNDACEP-FECOTRIGO, FUNDAÇÃO ABC. **Plantio Direto no Brasil**. Passo Fundo, Aldeia Norte, 1993. p.85-103.

SAS INSTITUTE INCORPORATION. **The SAS System for Windows release 6.12** (software). Cary, 1996.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – SBCS. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400p.

SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A.O. & CERETTA, C.A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**, 2. ed. Porto Alegre, Genesis, 2004. p.73-99.

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

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York, J. Wiley, 1994. 496p.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C.A. eds. **Methods of soil analysis**. Part 2. Madison, American Society of Agronomy, 1956. p.1550-1572.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. & SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, EMATER/RS; UFRGS, 2002. 126p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

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

VALVERDE, S.R.; MATTOS, A.D.M.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L. & NEIVA, S.A. Oportunidades do mercado de CO₂. **Boletim Informativo**. SCBS, 29:34-37, 2004.

VARGAS, M.A.T. & HUNGRIA, M. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. In: VARGAS, M.A.T. & HUNGRIA, M., ed. **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1997. p.296-360.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VICTORIA, R.L., PICCOLO, M.C., VARGAS, A.T. O ciclo do nitrogênio. In.: CARDOSO, E.J.B.N., TSAI, S.M. & NEVES, M.C.P., eds. **Microbiologia do solo**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 105-119.

WHITMORE, A.P. Describing the mineralization of carbon added to soil in crop residues using second-order kinetics. **Soil Biology Biochemistry**, 28:1435-1442, 1996.

WIEDER, R. K & LANG, G. E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. **Ecology**, 63:1636-1642, 1982.

WOOD, C.W.; WESTFALL, D.G. & PETERSON, G.A.. Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, 55:470-476, 1991.

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

Apêndice 1.1. Precipitação ocorrida durante o período de 1974 a 2003. Dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, RS.

Mês/ Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
	mm											
1974	93,0	145,0	66,8	42,6	119,3	206,0	51,7	136,1	32,5	55,4	124,6	263,2
1975	181,2	156,2	225,1	85,4	66,0	181,7	50,1	230,6	177,6	134,2	152,6	93,4
1976	242,4	92,1	136,1	67,0	111,7	73,4	90,2	143,1	162,3	71,9	185,3	123,0
1977	160,2	132,7	103,0	68,6	71,0	154,8	208,0	110,7	108,7	103,8	125,5	90,6
1978	58,5	68,6	63,8	21,4	41,1	154,0	262,0	104,5	54,1	72,5	152,9	73,7
1979	25,2	160,7	62,4	230,1	119,3	52,1	134,1	127,1	229,6	364,7	84,0	269,2
1980	63,1	26,2	144,8	84,6	196,0	60,1	121,8	128,3	97,1	237,6	246,3	176,8
1981	116,6	236,0	88,0	63,6	19,8	105,8	25,2	46,1	201,2	43,3	178,0	138,8
1982	22,1	162,6	43,5	36,7	105,5	229,4	160,8	236,1	197,1	196,8	448,4	88,6
1983	148,2	261,5	187,9	386,4	336,5	126,0	392,7	179,0	118,8	174,1	70,4	61,9
1984	399,4	88,0	83,4	187,4	300,0	215,3	177,0	171,2	218,8	183,0	89,7	60,0
1985	27,2	253,6	218,0	188,1	213,8	196,6	148,0	274,5	218,7	44,5	4,9	30,8
1986	116,6	173,7	180,8	249,7	205,5	236,8	29,6	179,2	156,6	171,5	431,7	49,2
1987	294,4	164,4	45,6	385,1	149,5	112,2	296,1	92,3	198,2	183,9	136,6	42,6
1988	166,1	41,7	96,6	169,5	38,0	88,8	32,1	21,9	363,3	151,2	127,4	61,0
1989	197,2	54,1	200,7	103,3	34,5	129,2	113,6	246,0	394,3	131,2	88,0	233,6
1990	162,1	130,0	151,3	279,5	202,0	194,6	71,1	40,3	238,0	228,2	186,8	88,2
1991	61,1	21,4	37,2	116,4	19,4	297,5	90,1	77,3	56,8	74,3	46,1	197,6
1992	175,0	222,0	165,6	127,0	341,7	130,7	128,8	120,1	186,9	186,5	120,4	116,4
1993	202,3	34,8	169,2	80,4	205,8	94,6	211,3	11,3	86,6	127,3	294,2	305,7
1994	69,2	275,3	102,5	262,4	167,0	190,0	266,4	85,4	157,4	261,0	188,8	167,4
1995	170,6	83,9	125,9	31,9	32,4	113,3	131,9	40,5	106,6	163,3	33,5	45,2
1996	320,6	207,3	101,2	125,4	70,1	118,8	98,8	175,3	49,7	196,9	77,1	142,0
1997	201,1	103,4	55,7	66,0	113,5	164,9	66,2	131,9	123,3	510,2	349,3	275,1
1998	226,5	380,7	115,2	300,4	106,0	125,5	123,6	182,0	161,5	153,7	25,3	137,1
1999	73,5	98,0	75,2	155,8	137,0	140,6	213,4	26,8	211,0	179,9	85,1	74,6
2000	115,8	68,1	224,3	103,8	95,6	197,3	90,1	97,8	117,5	257,6	139,9	141,9
2001	284,0	147,3	108,9	152,4	150,3	79,9	93,3	69,8	253,5	139,8	119,6	59,1
2002	129,8	60,1	139,7	172,9	256,0	178,9	268,2	218,3	296,2	417,9	191,5	328,7
2003	169,8	144,5	270,8	151,4	11,3	75,3	167,2	53,0	91,0	261,4	184,7	365,7
Média	155,8	139,8	126,3	149,8	134,5	147,5	143,8	125,2	168,8	182,6	156,3	143,4

Apêndice 1.2. Probabilidade do teste F para matéria seca e carbono produzido em diferentes sistemas de rotação de culturas, nos sistemas de preparo convencional e plantio direto.

Causa de variação	Matéria seca	Carbono
Ano agrícola 1999		
Preparo	0,0190 *	0,0457 *
Rotação	0,0018 *	0,0009 *
Preparo x rotação	0,1776 ns	0,8441 ns
C.V. (%)	22,61	25,57
Ano agrícola 1999/2000		
Preparo	0,0025 *	0,0027 *
Rotação	0,0722 ns	0,1003 ns
Preparo x rotação	0,8247 ns	0,8560 ns
C.V. (%)	28,84	28,64
Ano agrícola 2000		
Preparo	0,0001 *	0,0001 *
Rotação	0,0041 *	0,0059 *
Preparo x rotação	0,0012 **	0,0007 **
C.V. (%)	7,67	7,67
Ano agrícola 2000/2001		
Preparo	0,0235 *	0,0250 *
Rotação	0,0001 *	0,0001 *
Preparo x rotação	0,0390 **	0,0407 **
C.V. (%)	11,57	11,58
Ano agrícola 2000/2001		
Preparo	0,0013 *	0,0006 *
Rotação	0,0002 *	0,0001 *
Preparo x rotação	0,6587 ns	0,6417 ns
C.V. (%)	32,46	32,34

* significativo a 5%. ** interação significativa a 10%. ns = não significativo. Em negrito a significância de maior grau utilizada na análise dos resultados.

Apêndice 1.3. Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 1985/86 a 1990/91.

Preparo/ Rotação	1985/86		1986/87		1987/88		1988/89		1989/90		1990/91	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno ³	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja
PC R0	pnc1	pnc	1642	3155	1254	1291	2167	3120	2085	3828	946	1105
PD R0	pnc	pnc	1496	3482	2012	1440	2552	3180	1994	3724	980	1136
	aveia	soja	aveia+erv.	milho	trigo	soja	aveia	soja	aveia+erv.	milho	trigo	soja
PC R1	pnc	pnc	MS ²	5860	2094	1242	MS	3175	MS	4787	1788	1373
PD R1	pnc	pnc	MS	6146	2493	1838	MS	3234	MS	5966	1810	1883
	aveia	soja	aveia	soja	trigo	soja	aveia	soja	trigo	soja	aveia	soja
PD R2	pnc	pnc	MS	3135	2317	1189	MS	2880	2467	3411	MS	1019
PD R2	pnc	pnc	MS	3066	2525	1303	MS	3060	2567	3516	MS	1004

¹ pnc = Produtividades não consideradas, por ser início do trabalho e por apresentarem alta variação. ² MS = massa seca de plantas de cobertura.

³ A partir do 4º ano ou segundo ciclo da rotação (1988) passou-se a utilizar na rotação R2 um ano com aveia e no seguinte com trigo.

Apêndice 1.4. Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 1991/92 a 1996/97.

Preparo/ Rotação	1991/92		1992/93		1993/94		1994/95		1995/96		1996/97	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja
PC R0	2090	3978	2017	3662	1500	2222	dnc ⁴	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc
PD R0	1967	3663	2188	3565	1546	2378	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc
	aveia	soja	aveia+erv.	milho	trigo	soja	aveia	soja	aveia+erv.	milho	trigo	soja
PC R1	MS	4134	MS	9030	2413	2525	MS	dnc	MS	dnc	dnc	dnc
PD R1	MS	4340	MS	10320	2475	2746	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc
	trigo	soja	aveia	soja	trigo	soja	aveia	soja	trigo	soja	aveia	soja
PD R2	2655	3889	MS	2619	1917	2174	MS	dnc	dnc	dnc	MS	dnc
PD R2	2428	3616	MS	3285	2063	2331	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc	dnc

⁴ dnc = dados não coletados.

Apêndice 1.5. Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 1997/98 a 2001/02.

Preparo/ Rotação	1997/98		1998/99 ⁵		1999/00			2000/01		2001/02	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Outono	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
PC R0	trigo	soja	trigo	soja	-	trigo	soja	trigo	soja	trigo	soja
PD R0	dnc	dnc	1106	1239	-	1121	1957	1659	2509	1993	1952
PC R1	dnc	dnc	1229	1946	-	1248	2569	689	3583	2431	2277
PD R1	aveia	soja	aveia+erv.	milho	nabo	trigo	soja	aveia	soja	aveia+erv.	milho
PC R2	MS	dnc	MS	3807	MS	1480	2211	MS	3366	MS	2810
PD R2	dnc	dnc	MS	4064	MS	1706	2995	MS	3498	MS	5631
PC R3	trigo	soja	aveia	soja	-	trigo	soja	aveia	soja	trigo	soja
PD R3	dnc	dnc	MS	1229	-	1366	1701	MS	3123	1994	2046
PD R4	dnc	dnc	MS	1647	-	1636	3185	MS	3358	3665	2754

⁵ A partir de 1998 passou-se a utilizar na rotação R1 nabo forrageiro, como cultura intercalar após o milho e antes do trigo.

Apêndice 1.6. Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de trigo, soja e milho. FUNDACEP, Cruz Alta, RS. Anos agrícolas de 2002/03 a 2003/04.

Preparo/ Rotação	2002/03			2003/04	
	Outono	Inverno	Verão	Inverno	Verão
PC R0	-	trigo	soja	trigo	soja
PD R0	-	966	3395	2194	1469
PC R1	-	759	3716	2296	1883
PD R1	nabo	trigo	soja	aveia	soja
PC R2	MS	1309	3432	MS	1503
PD R2	MS	1552	3815	MS	1929
PC R3	-	aveia	soja	trigo	soja
PD R3	-	MS	3337	3458	1574
PD R4	-	MS	3827	3052	1977

Obs.: Dados de produtividade das culturas cedidos pelos pesquisadores José Ruedell e Ciro Petrere (FUNDACEP).

Apêndice 2.1. Dados gerais de C-CO₂ (kg ha⁻¹ h⁻¹) obtidos nas câmaras de captação I de 15 cm (Anderson, 1982) e II de 30 cm (Aita, 1996).

Sistema	Rotação	Câmara	Repetição	Tempo				
				4	16	28	52	76
PC	0	I	1	2,73	1,65	1,20	0,98	*
PC	0	I	2	2,38	1,49	1,11	0,85	1,29
PC	0	I	3	2,63	1,44	0,93	0,95	1,16
PC	1-1	I	1	3,99	2,09	1,07	1,28	*
PC	1-1	I	2	2,13	0,76	0,56	0,63	1,01
PC	1-1	I	3	2,20	0,83	0,60	0,67	1,02
PC	1-3	I	1	2,31	0,68	0,69	0,91	0,72
PC	1-3	I	2	2,25	1,36	1,21	1,07	1,76
PC	1-3	I	3	2,25	0,96	0,90	*	2,04
PC	2	I	1	1,68	0,67	0,62	0,61	0,92
PC	2	I	2	2,54	1,25	0,88	0,75	1,94
PC	2	I	3	2,28	0,82	0,69	0,54	0,78
PD	0	I	1	1,12	0,68	0,88	0,87	1,22
PD	0	I	2	1,27	0,60	0,70	0,79	1,42
PD	0	I	3	1,29	0,64	0,82	0,80	0,93
PD	1-1	I	1	1,51	0,71	0,77	0,69	0,88
PD	1-1	I	2	1,23	0,51	0,65	0,62	1,02
PD	1-1	I	3	1,11	0,50	0,63	0,64	0,95
PD	1-3	I	1	1,81	1,12	1,35	1,28	1,48
PD	1-3	I	2	1,32	0,70	0,87	0,85	0,96
PD	1-3	I	3	1,64	0,88	1,03	1,08	1,33
PD	2	I	1	1,44	0,62	0,60	0,69	1,05
PD	2	I	2	1,40	0,72	0,98	0,90	1,14
PD	2	I	3	1,59	0,61	0,65	0,61	0,90
PC	0	II	1	2,83	1,50	1,04	0,88	1,62
PC	0	II	2	2,87	1,96	1,03	0,75	2,41
PC	0	II	3	3,34	1,98	1,11	1,02	1,54
PC	1-1	II	1	2,68	1,09	0,72	0,68	1,46
PC	1-1	II	2	2,11	1,11	0,87	0,80	1,07
PC	1-1	II	3	2,87	1,13	0,74	0,70	*
PC	1-3	II	1	2,46	1,28	0,59	0,75	1,81
PC	1-3	II	2	2,58	1,11	0,85	0,79	1,68
PC	1-3	II	3	1,93	0,92	0,72	0,64	1,16
PC	2	II	1	2,10	0,90	0,62	0,61	1,02
PC	2	II	2	2,58	1,15	0,81	0,76	1,62
PC	2	II	3	2,32	1,22	0,40	0,78	1,72
PD	0	II	1	1,09	0,87	0,76	0,76	1,45
PD	0	II	2	0,75	0,56	0,66	0,66	0,82
PD	0	II	3	1,26	0,85	0,99	0,91	0,92
PD	1-1	II	1	1,43	0,87	1,14	1,09	1,05
PD	1-1	II	2	1,31	0,90	0,96	0,86	2,32
PD	1-1	II	3	1,21	0,87	1,04	0,94	0,75
PD	1-3	II	1	0,96	1,00	1,07	0,98	1,42
PD	1-3	II	2	1,17	1,01	0,94	0,90	1,10
PD	1-3	II	3	1,62	0,99	1,03	1,01	1,26
PD	2	II	1	0,89	0,78	0,80	0,71	0,90
PD	2	II	2	0,82	0,60	0,54	0,63	0,94
PD	2	II	3	1,11	0,69	0,67	0,63	0,85

* Dados perdidos. PC = preparo convencional; PD = plantio direto.



Apêndice 2.2. Comparação das câmaras para medição da evolução de CO₂ a campo de 15 cm (I) e 30 cm (II) nos sistemas de preparo do solo convencional (A) e plantio direto (B). Cruz Alta, RS.

Apêndice 3.1. Densidade do solo nas diferentes profundidades em rotações de culturas nos sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto¹ e em área de campo nativo.

Sistema de manejo	Camadas (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	Mg m ⁻³			
	Preparo convencional			
R0 ²	1,35	1,39	1,43	1,30
R1	1,35	1,37	1,39	1,30
R2	1,34	1,35	1,35	1,30
	Plantio direto			
R0	1,39	1,40	1,32	1,28
R1	1,37	1,38	1,34	1,29
R2	1,34	1,36	1,35	1,29

¹ Os dados de R0 e R2 foram obtidos de Jantalia (2005) e a média destas rotações para R1.

² R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/ soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho /nabo/trigo/soja.

Apêndice 3.2. Concentração e estoque de carbono orgânico na fração particulada (COP, >53 μm), na fração associada aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, em diferentes rotações de culturas (R0, R1 e R2)¹ nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD).

Preparo	Rotação	Camada	Rep.	Concentração			Estoque					
				COP	CAM	COT	Camada equivalente			Massa equivalente		
							COP	COAM	COT	COP	COAM	COT
		cm	g kg ⁻¹			Mg ha ⁻¹						
PC	R0	0-5	A	2,07	19,84	21,91	1,40	13,39	14,79	1,28	12,31	13,59
PC	R0	5-10	A	1,63	19,28	20,91	1,13	13,40	14,54	0,93	10,98	11,91
PC	R0	10-20	A	0,57	17,05	17,63	0,82	24,38	25,21	0,59	17,41	18,00
PC	R0	20-30	A	0,40	15,85	16,25	0,52	20,60	21,12	0,46	18,46	18,92
PC	R0	0-20	A				3,35	51,18	54,53	2,80	40,70	43,50
PC	R0	0-30	A				3,87	71,78	75,65	3,26	59,16	62,42
PC	R0	0-5	B	2,50	19,22	21,72	1,69	12,97	14,66	1,55	11,92	13,47
PC	R0	5-10	B	1,83	18,78	20,61	1,27	13,05	14,32	1,04	10,69	11,74
PC	R0	10-20	B	0,41	17,34	17,75	0,59	24,80	25,39	0,42	17,71	18,13
PC	R0	20-30	B	0,38	16,56	16,94	0,50	21,53	22,03	0,45	19,29	19,74
PC	R0	0-20	B				3,55	50,83	54,37	3,01	40,32	43,34
PC	R0	0-30	B				4,04	72,36	76,40	3,46	59,61	63,07
PC	R0	0-5	C	2,34	20,14	22,48	1,58	13,60	15,17	1,45	12,50	13,95
PC	R0	5-10	C	1,58	19,08	20,67	1,10	13,26	14,36	0,90	10,87	11,77
PC	R0	10-20	C	0,35	17,06	17,41	0,50	24,39	24,89	0,36	17,41	17,77
PC	R0	20-30	C	0,31	15,12	15,43	0,40	19,66	20,06	0,36	17,61	17,97
PC	R0	0-20	C				3,18	51,25	54,43	2,71	40,78	43,48
PC	R0	0-30	C				3,58	70,91	74,49	3,07	58,39	61,46
PC	R0	0-5	D	1,37	17,68	19,06	0,93	11,94	12,86	0,85	10,97	11,82
PC	R0	5-10	D	1,48	17,98	19,46	1,03	12,50	13,52	0,84	10,24	11,08
PC	R0	10-20	D	0,89	17,41	18,31	1,28	24,90	26,18	0,91	17,78	18,69
PC	R0	20-30	D	0,36	15,27	15,64	0,47	19,86	20,33	3,03	56,78	59,81
PC	R0	0-20	D				3,23	49,33	52,56	1,36	12,13	13,49

Apêndice 3.2. Continuação...

PC	R0	0-30	D				3,70	69,19	72,89	0,84	11,26	12,11
PC	R1	0-5	A	2,20	19,55	21,75	1,48	13,20	14,68	0,97	18,51	19,48
PC	R1	5-10	A	1,45	19,36	20,81	0,99	13,26	14,25	0,34	18,09	18,43
PC	R1	10-20	A	0,90	17,12	18,02	1,25	23,80	25,05	3,18	41,90	45,08
PC	R1	20-30	A	0,29	15,53	15,82	0,38	20,19	20,57	3,52	59,99	63,51
PC	R1	0-20	A				3,73	50,26	53,99	1,87	13,10	14,97
PC	R1	0-30	A				4,11	70,45	74,56	1,10	11,42	12,52
PC	R1	0-5	B	3,01	21,13	24,13	2,03	14,26	16,29	0,72	19,66	20,37
PC	R1	5-10	B	1,90	19,62	21,52	1,30	13,44	14,74	0,28	19,32	19,60
PC	R1	10-20	B	0,66	18,19	18,85	0,92	25,28	26,20	3,69	44,18	47,87
PC	R1	20-30	B	0,24	16,58	16,82	0,31	21,56	21,87	3,97	63,49	67,46
PC	R1	0-20	B				4,25	52,98	57,23	2,66	12,15	14,81
PC	R1	0-30	B				4,57	74,54	79,11	1,53	11,37	12,89
PC	R1	0-5	C	4,29	19,59	23,88	2,89	13,22	16,12	0,78	19,24	20,02
PC	R1	5-10	C	2,62	19,54	22,16	1,80	13,38	15,18	0,29	18,89	19,18
PC	R1	10-20	C	0,72	17,80	18,52	1,01	24,74	25,75	4,97	42,76	47,73
PC	R1	20-30	C	0,25	16,22	16,46	0,32	21,08	21,40	5,26	61,65	66,91
PC	R1	0-20	C				5,70	51,35	57,05	1,39	11,23	12,62
PC	R1	0-30	C				6,02	72,43	78,45	1,19	10,47	11,67
PC	R1	0-5	D	2,24	18,10	20,34	1,52	12,22	13,73	0,46	17,83	18,29
PC	R1	5-10	D	2,05	18,00	20,05	1,41	12,33	13,74	0,21	15,97	16,18
PC	R1	10-20	D	0,43	16,49	16,92	0,60	22,93	23,52	3,05	39,52	42,57
PC	R1	20-30	D	0,18	13,71	13,89	0,23	17,83	18,06	3,26	55,50	58,76
PC	R1	0-20	D				3,52	47,47	50,99	2,49	12,86	15,35
PC	R1	0-30	D				3,75	65,30	69,05	1,45	11,67	13,12
PC	R2	0-5	A	3,98	20,57	24,56	2,67	13,79	16,45	1,07	19,26	20,33
PC	R2	5-10	A	2,44	19,68	22,12	1,65	13,28	14,93	0,27	19,03	19,29
PC	R2	10-20	A	0,94	17,02	17,97	1,28	22,98	24,26	3,03	56,78	59,81
PC	R2	20-30	A	0,23	16,33	16,56	0,30	21,23	21,53	1,36	12,13	13,49
PC	R2	0-20	A				5,59	50,05	55,64	5,01	43,79	48,80
PC	R2	0-30	A				5,89	71,28	77,18	5,27	62,82	68,09

Apêndice 3.2. Continuação...

PC	R2	0-5	B	1,93	20,00	21,93	1,29	13,40	14,69	1,21	12,50	13,71
PC	R2	5-10	B	1,26	19,88	21,14	0,85	13,42	14,27	0,75	11,79	12,54
PC	R2	10-20	B	0,97	19,08	20,05	1,30	25,76	27,07	1,09	21,59	22,68
PC	R2	20-30	B	0,35	17,33	17,68	0,45	22,53	22,98	0,40	20,19	20,59
PC	R2	0-20	B				3,45	52,59	56,04	3,05	45,88	48,93
PC	R2	0-30	B				3,90	75,12	79,02	3,45	66,08	69,53
PC	R2	0-5	C	2,87	21,43	24,30	1,92	14,36	16,28	1,80	13,39	15,19
PC	R2	5-10	C	2,28	20,45	22,73	1,54	13,81	15,34	1,35	12,13	13,48
PC	R2	10-20	C	0,63	18,22	18,85	0,84	24,60	25,44	0,71	20,61	21,32
PC	R2	20-30	C	0,39	14,28	14,67	0,51	18,56	19,07	0,46	16,63	17,09
PC	R2	0-20	C				4,31	52,76	57,07	3,86	46,14	49,99
PC	R2	0-30	C				4,82	71,32	76,14	4,31	62,77	67,08
PC	R2	0-5	D	3,09	20,66	23,75	2,07	13,84	15,91	1,93	12,91	14,85
PC	R2	5-10	D	1,62	19,46	21,08	1,09	13,13	14,23	0,96	11,54	12,50
PC	R2	10-20	D	0,49	18,10	18,59	0,66	24,44	25,09	0,55	20,48	21,03
PC	R2	20-30	D	0,13	15,56	15,69	0,17	20,23	20,40	0,15	18,13	18,28
PC	R2	0-20	D				3,82	51,41	55,23	3,44	44,93	48,37
PC	R2	0-30	D				3,99	71,64	75,63	3,59	63,06	66,65
PD	R0	0-5	A	4,53	22,91	27,44	3,15	15,92	19,07	2,71	13,71	16,42
PD	R0	5-10	A	0,91	16,70	17,61	0,64	11,69	12,33	0,51	9,40	9,91
PD	R0	10-20	A	0,38	15,29	15,67	0,50	20,18	20,69	0,44	17,78	18,23
PD	R0	20-30	A	0,23	14,71	14,95	0,30	18,83	19,13	0,27	17,39	17,66
PD	R0	0-20	A				4,29	47,80	52,09	3,67	40,89	44,56
PD	R0	0-30	A				4,59	66,63	71,22	3,94	58,28	62,22
PD	R0	0-5	B	4,55	21,53	26,08	3,16	14,96	18,13	2,72	12,88	15,61
PD	R0	5-10	B	0,55	18,14	18,69	0,39	12,70	13,08	0,31	10,21	10,52
PD	R0	10-20	B	0,39	16,02	16,41	0,52	21,14	21,66	0,46	18,63	19,09
PD	R0	20-30	B	0,16	15,03	15,19	0,20	19,24	19,45	0,19	17,77	17,95
PD	R0	0-20	B				4,07	48,80	52,87	3,49	41,72	45,21
PD	R0	0-30	B				4,27	68,05	72,32	3,68	59,49	63,16
PD	R0	0-5	C	5,46	21,21	26,66	3,79	14,74	18,53	3,26	12,69	15,96

Apêndice 3.2. Continuação...

PD	R0	5-10	C	0,67	17,74	18,41	0,47	12,41	12,88	0,38	9,98	10,36
PD	R0	10-20	C	0,48	16,27	16,75	0,64	21,48	22,12	0,56	18,93	19,49
PD	R0	20-30	C	0,23	15,43	15,66	0,30	19,74	20,04	0,27	18,23	18,50
PD	R0	0-20	C				4,90	48,63	53,53	4,20	41,60	45,80
PD	R0	0-30	C				5,19	68,38	73,57	4,48	59,83	64,30
PD	R0	0-5	D	5,36	21,19	26,55	3,72	14,73	18,45	3,21	12,68	15,89
PD	R0	5-10	D	1,08	17,54	18,62	0,76	12,28	13,04	0,61	9,87	10,48
PD	R0	10-20	D	0,52	16,42	16,93	0,68	21,67	22,35	0,60	19,10	19,69
PD	R0	20-30	D	0,26	14,49	14,75	0,34	18,54	18,88	0,31	17,12	17,43
PD	R0	0-20	D				5,16	48,67	53,84	4,42	41,65	46,06
PD	R0	0-30	D				5,50	67,22	72,72	4,73	58,77	63,49
PD	R1	0-5	A	5,90	22,21	28,12	4,04	15,22	19,26	3,60	13,55	17,15
PD	R1	5-10	A	0,99	18,35	19,34	0,68	12,66	13,34	0,57	10,57	11,13
PD	R1	10-20	A	0,64	17,30	17,93	0,85	23,18	24,03	0,73	19,76	20,49
PD	R1	20-30	A	0,32	16,85	17,17	0,41	21,74	22,14	0,37	19,77	20,14
PD	R1	0-20	A				5,58	51,05	56,63	4,89	43,87	48,77
PD	R1	0-30	A				5,98	72,79	78,77	5,26	63,65	68,91
PD	R1	0-5	B	5,25	22,55	27,81	3,60	15,45	19,05	3,20	13,76	16,96
PD	R1	5-10	B	0,82	19,85	20,67	0,56	13,70	14,26	0,47	11,43	11,90
PD	R1	10-20	B	0,43	17,55	17,98	0,57	23,52	24,09	0,49	20,05	20,54
PD	R1	20-30	B	0,39	17,14	17,53	0,50	22,11	22,61	0,45	20,11	20,57
PD	R1	0-20	B				4,73	52,67	57,40	4,16	45,24	49,40
PD	R1	0-30	B				5,23	74,78	80,01	4,62	65,35	69,97
PD	R1	0-5	C	4,84	24,25	29,09	3,31	16,61	19,93	2,95	14,79	17,74
PD	R1	5-10	C	1,22	19,65	20,87	0,84	13,56	14,40	0,70	11,32	12,02
PD	R1	10-20	C	0,52	16,80	17,33	0,70	22,52	23,22	0,60	19,20	19,80
PD	R1	20-30	C	0,39	14,96	15,35	0,50	19,30	19,80	0,46	17,55	18,01
PD	R1	0-20	C				4,85	52,69	57,55	4,25	45,31	49,56
PD	R1	0-30	C				5,36	71,99	77,34	4,70	62,86	67,56
PD	R1	0-5	D	4,75	21,79	26,54	3,25	14,93	18,18	2,89	13,29	16,18
PD	R1	5-10	D	0,81	18,65	19,46	0,56	12,87	13,42	0,46	10,74	11,20

Apêndice 3.2. Continuação...

PD	R1	10-20	D	0,43	16,30	16,73	0,58	21,84	22,42	0,49	18,62	19,12
PD	R1	20-30	D	0,36	15,57	15,93	0,46	20,09	20,55	0,42	18,27	18,69
PD	R1	0-20	D				4,39	49,64	54,02	3,85	42,65	46,50
PD	R1	0-30	D				4,84	69,72	74,57	4,27	60,92	65,19
PD	R2	0-5	A	5,90	23,13	29,03	3,95	15,50	19,45	3,69	14,46	18,15
PD	R2	5-10	A	1,62	21,20	22,82	1,10	14,42	15,52	0,95	12,46	13,41
PD	R2	10-20	A	0,28	18,86	19,14	0,37	25,47	25,84	0,31	21,34	21,65
PD	R2	20-30	A	0,34	16,51	16,85	0,44	21,29	21,73	0,40	19,37	19,77
PD	R2	0-20	A				5,42	55,38	60,81	4,95	48,26	53,21
PD	R2	0-30	A				5,86	76,67	82,54	5,35	67,63	72,98
PD	R2	0-5	B	5,32	24,22	29,54	3,56	16,23	19,79	3,33	15,14	18,46
PD	R2	5-10	B	1,27	21,57	22,84	0,87	14,67	15,53	0,75	12,67	13,42
PD	R2	10-20	B	0,40	19,32	19,72	0,54	26,08	26,62	0,45	21,85	22,31
PD	R2	20-30	B	0,32	17,20	17,53	0,42	22,19	22,61	0,38	20,19	20,57
PD	R2	0-20	B				4,97	56,97	61,94	4,53	49,67	54,19
PD	R2	0-30	B				5,39	79,16	84,55	4,91	69,85	74,76
PD	R2	0-5	C	4,65	22,84	27,49	3,11	15,31	18,42	2,90	14,28	17,18
PD	R2	5-10	C	0,87	18,96	19,83	0,59	12,89	13,48	0,51	11,14	11,65
PD	R2	10-20	C	0,61	17,94	18,54	0,82	24,21	25,03	0,69	20,29	20,98
PD	R2	20-30	C	0,21	17,44	17,65	0,27	22,50	22,77	0,25	20,47	20,71
PD	R2	0-20	C				4,52	52,41	56,93	4,10	45,71	49,81
PD	R2	0-30	C				4,79	74,91	79,70	4,35	66,18	70,52
PD	R2	0-5	D	4,63	23,02	27,65	3,10	15,42	18,52	2,89	14,39	17,28
PD	R2	5-10	D	0,91	18,60	19,51	0,62	12,65	13,27	0,54	10,93	11,47
PD	R2	10-20	D	0,29	17,59	17,88	0,39	23,75	24,14	0,33	19,90	20,23
PD	R2	20-30	D	0,24	14,98	15,22	0,31	19,33	19,63	0,28	17,58	17,86
PD	R2	0-20	D				4,12	51,82	55,94	3,76	45,22	48,98
PD	R2	0-30	D				4,42	71,15	75,57	4,04	62,80	66,84

¹ R0 = sucessão trigo/soja; R1 = aveia/ soja/trigo/soja e R2 = aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja.

Apêndice 3.3. Causas de variação e coeficiente de variação do estoque de carbono orgânico na fração particulada (COP, >53 μm), na fração associada aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 0-20 e 0-30 cm.

Causa de variação	Camada equivalente			Massa equivalente		
	COP	COAM	COT	COP	COAM	COT
0-5 cm						
Preparo	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *
Rotação	0,3343 ns	0,0810 ns	0,0492 *	0,1577 ns	0,0007 *	0,0007 *
Preparo x rotação	0,4116 ns	0,6242 ns	0,4300 ns	0,6535 ns	0,4205 ns	0,9124 ns
C.V. (%)	17,88	3,98	4,36	18,13	3,98	4,42
5-10 cm						
Preparo	0,0083 *	0,4806 ns	0,0121 *	0,0001 *	0,0932 ns	0,0021 *
Rotação	0,6546 ns	0,0109 *	0,0143 *	0,1409 ns	0,0001 *	0,0001 *
Preparo x rotação	0,54,72 ns	0,1151 ns	0,2384 ns	0,6969 ns	0,1315 ns	0,2845 ns
C.V. (%)	34,45	3,79	4,51	26,31	3,82	4,57
10-20 cm						
Preparo	0,0148 *	0,0002 *	0,0001 *	0,0259 *	0,0213 *	0,1295 ns
Rotação	0,5673 ns	0,0009 *	0,0020 *	0,4803 ns	0,0001 *	0,0001 *
Preparo x rotação	0,4340 ns	0,0005 **	0,0026 **	0,2350 ns	0,5710 ns	0,3680 ns
C.V. (%)	22,78	3,21	3,51	33,26	3,28	3,52
20-30 cm						
Preparo	0,7964 ns	0,9937 ns	0,9872 ns	0,9161 ns	0,3430 ns	0,3386 ns
Rotação	0,7780 ns	0,0827 ns	0,0824 ns	0,7532 ns	0,1324 ns	0,1319 ns
Preparo x rotação	0,0040 **	0,1119 ns	0,0616 **	0,0040 **	0,1883 ns	0,1072 ns
C.V. (%)	22,77	5,00	4,83	22,50	4,99	4,81

Continuação do Apêndice 3.3.

Causa de variação	Camada equivalente			Massa equivalente		
	COP	COAM	COT	COP	COAM	COT
	0-20 cm					
Preparo	0,0108 *	0,4307 ns	0,0841 ns	0,0074 *	0,0010 *	0,0004 *
Rotação	0,1438 ns	0,0004 *	0,0007 *	0,0508 ns	0,0001 *	0,0001 *
Preparo x rotação	0,4288 ns	0,0078 **	0,0837 **	0,4745 ns	0,6842 ns	0,9730 **
C.V. (%)	15,00	2,50	2,87	14,34	2,54	2,92
	0-30 cm					
Preparo	0,0128 *	0,5211 ns	0,1649 ns	0,0080 *	0,0015 *	0,0009 *
Rotação	0,1507 ns	0,0002 *	0,0005 *	0,0570 ns	0,0001 *	0,0001 *
Preparo x rotação	0,6488 ns	0,0022 **	0,0214 **	0,7088 ns	0,1730 ns	0,4315 **
C.V. (%)	14,02	2,23	2,62	14,26	2,23	2,63

* significativo a 5%. ** interação significativa a 10%. ns = não significativo. Em negrito a significância de maior grau utilizada na análise dos resultados.

Apêndice 3.4. Concentração e estoque de nitrogênio na fração particulada (NTP, >53 μm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 μm) e total (NT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, em diferentes rotações de culturas (R0, R1 e R2)¹ nos sistemas de preparo de solo convencional (PC) e plantio direto (PD).

Preparo	Rotação	Camada	Rep.	Concentração			Estoque					
				NTP	NTAM	NT	Camada equivalente			Massa equivalente		
							NTP	NTAM	NT	NTP	NTAM	NT
		cm			g kg ⁻¹		Mg ha ⁻¹					
PC	R0	0-5	A	0,155	1,526	1,680	0,104	1,030	1,134	0,096	0,946	1,042
PC	R0	5-10	A	0,180	1,646	1,826	0,125	1,144	1,269	0,103	0,937	1,040
PC	R0	10-20	A	0,095	1,454	1,550	0,136	2,080	2,216	0,097	1,485	1,582
PC	R0	20-30	A	0,046	1,698	1,745	0,060	2,208	2,268	0,054	1,978	2,032
PC	R0	0-20	A				0,366	4,253	4,619	0,296	3,368	3,664
PC	R0	0-30	A				0,426	6,461	6,887	0,350	5,346	5,696
PC	R0	0-5	B	0,178	1,642	1,820	0,120	1,108	1,228	0,111	1,018	1,129
PC	R0	5-10	B	0,130	1,831	1,961	0,091	1,272	1,363	0,074	1,042	1,117
PC	R0	10-20	B	0,081	1,328	1,408	0,115	1,899	2,014	0,082	1,356	1,438
PC	R0	20-30	B	0,013	1,448	1,462	0,018	1,883	1,900	0,016	1,687	1,703
PC	R0	0-20	B				0,326	4,279	4,605	0,267	3,416	3,684
PC	R0	0-30	B				0,344	6,162	6,506	0,283	5,103	5,386
PC	R0	0-5	C	0,166	1,541	1,707	0,112	1,040	1,152	0,103	0,956	1,059
PC	R0	5-10	C	0,133	1,606	1,738	0,092	1,116	1,208	0,076	0,914	0,990
PC	R0	10-20	C	0,042	1,179	1,221	0,060	1,686	1,746	0,043	1,204	1,247
PC	R0	20-30	C	0,025	1,160	1,185	0,033	1,508	1,541	0,030	1,351	1,380
PC	R0	0-20	C				0,265	3,842	4,106	0,222	3,074	3,295
PC	R0	0-30	C				0,298	5,349	5,647	0,251	4,424	4,676
PC	R0	0-5	D	0,121	1,444	1,565	0,082	0,974	1,056	0,075	0,896	0,971
PC	R0	5-10	D	0,112	1,293	1,405	0,078	0,899	0,976	0,064	0,736	0,800
PC	R0	10-20	D	0,099	1,382	1,481	0,142	1,976	2,118	0,102	1,411	1,512
PC	R0	20-30	D	0,038	0,990	1,028	0,049	1,287	1,336	0,044	1,153	1,197
PC	R0	0-20	D				0,302	3,849	4,151	0,240	3,043	3,283

Apêndice 3.4. Continuação...

PC	R0	0-30	D				0,350	5,136	5,487	0,284	4,196	4,480
PC	R1	0-5	A	0,116	1,655	1,771	0,078	1,117	1,195	0,072	1,026	1,098
PC	R1	5-10	A	0,114	1,542	1,656	0,078	1,056	1,134	0,066	0,897	0,963
PC	R1	10-20	A	0,071	1,466	1,537	0,099	2,038	2,136	0,077	1,585	1,661
PC	R1	20-30	A	0,042	1,331	1,373	0,055	1,731	1,785	0,049	1,551	1,600
PC	R1	0-20	A				0,255	4,211	4,466	0,215	3,508	3,723
PC	R1	0-30	A				0,310	5,942	6,251	0,264	5,059	5,323
PC	R1	0-5	B	0,242	1,641	1,883	0,163	1,108	1,271	0,150	1,018	1,168
PC	R1	5-10	B	0,147	1,666	1,813	0,101	1,141	1,242	0,085	0,969	1,055
PC	R1	10-20	B	0,045	1,345	1,390	0,063	1,869	1,932	0,049	1,454	1,502
PC	R1	20-30	B	0,018	1,274	1,292	0,023	1,657	1,680	0,021	1,484	1,505
PC	R1	0-20	B				0,327	4,118	4,445	0,284	3,441	3,725
PC	R1	0-30	B				0,350	5,775	6,125	0,305	4,925	5,231
PC	R1	0-5	C	0,343	1,730	2,074	0,232	1,168	1,400	0,213	1,073	1,286
PC	R1	5-10	C	0,196	1,772	1,967	0,134	1,214	1,348	0,114	1,031	1,145
PC	R1	10-20	C	0,093	1,528	1,621	0,130	2,123	2,253	0,101	1,651	1,752
PC	R1	20-30	C	0,064	1,236	1,300	0,084	1,606	1,690	0,075	1,439	1,514
PC	R1	0-20	C				0,496	4,505	5,001	0,428	3,755	4,183
PC	R1	0-30	C				0,579	6,111	6,691	0,503	5,195	5,697
PC	R1	0-5	D	0,186	1,500	1,687	0,126	1,013	1,138	0,116	0,931	1,046
PC	R1	5-10	D	0,141	1,580	1,722	0,097	1,082	1,179	0,082	0,919	1,002
PC	R1	10-20	D	0,045	1,322	1,367	0,062	1,838	1,900	0,048	1,429	1,477
PC	R1	20-30	D	0,024	1,021	1,046	0,032	1,328	1,359	0,028	1,190	1,218
PC	R1	0-20	D				0,285	3,933	4,218	0,246	3,279	3,525
PC	R1	0-30	D				0,317	5,260	5,577	0,275	4,468	4,743
PC	R2	0-5	A	0,218	1,690	1,907	0,146	1,132	1,278	0,136	1,056	1,192
PC	R2	5-10	A	0,198	1,774	1,973	0,134	1,198	1,332	0,118	1,052	1,170
PC	R2	10-20	A	0,047	1,371	1,418	0,064	1,850	1,914	0,053	1,551	1,604
PC	R2	20-30	A	0,009	1,124	1,133	0,012	1,462	1,473	0,011	1,310	1,320
PC	R2	0-20	A				0,344	4,180	4,524	0,307	3,659	3,966
PC	R2	0-30	A				0,355	5,642	5,997	0,318	4,969	5,286

Apêndice 3.4. Continuação...

PC	R2	0-5	B	0,091	1,479	1,571	0,061	0,991	1,053	0,057	0,925	0,982
PC	R2	5-10	B	0,128	1,518	1,646	0,087	1,024	1,111	0,076	0,900	0,976
PC	R2	10-20	B	0,060	1,509	1,570	0,081	2,038	2,119	0,068	1,707	1,776
PC	R2	20-30	B	0,023	1,303	1,325	0,029	1,694	1,723	0,026	1,518	1,544
PC	R2	0-20	B				0,229	4,053	4,283	0,202	3,532	3,734
PC	R2	0-30	B				0,259	5,747	6,006	0,228	5,050	5,278
PC	R2	0-5	C	0,189	1,771	1,961	0,127	1,187	1,314	0,118	1,107	1,226
PC	R2	5-10	C	0,190	1,602	1,792	0,128	1,081	1,209	0,112	0,950	1,062
PC	R2	10-20	C	0,101	1,499	1,600	0,136	2,024	2,160	0,114	1,696	1,810
PC	R2	20-30	C	0,018	1,225	1,243	0,023	1,593	1,616	0,020	1,427	1,448
PC	R2	0-20	C				0,391	4,292	4,683	0,345	3,753	4,098
PC	R2	0-30	C				0,414	5,885	6,299	0,366	5,180	5,546
PC	R2	0-5	D	0,247	1,601	1,847	0,165	1,072	1,238	0,154	1,001	1,155
PC	R2	5-10	D	0,111	1,484	1,595	0,075	1,002	1,076	0,066	0,880	0,946
PC	R2	10-20	D	0,058	1,327	1,385	0,078	1,792	1,870	0,066	1,502	1,567
PC	R2	20-30	D	0,032	1,120	1,152	0,041	1,457	1,498	0,037	1,305	1,342
PC	R2	0-20	D				0,318	3,866	4,184	0,286	3,382	3,668
PC	R2	0-30	D				0,359	5,322	5,682	0,322	4,687	5,009
PD	R0	0-5	A	0,349	1,950	2,299	0,242	1,355	1,598	0,209	1,167	1,376
PD	R0	5-10	A	0,044	1,317	1,362	0,031	0,922	0,953	0,025	0,741	0,766
PD	R0	10-20	A	0,015	1,248	1,263	0,020	1,648	1,668	0,017	1,452	1,469
PD	R0	20-30	A	0,007	0,998	1,005	0,009	1,278	1,286	0,008	1,180	1,187
PD	R0	0-20	A				0,293	3,926	4,218	0,251	3,361	3,611
PD	R0	0-30	A				0,301	5,203	5,505	0,259	4,540	4,799
PD	R0	0-5	B	0,356	1,722	2,078	0,247	1,196	1,444	0,213	1,030	1,243
PD	R0	5-10	B	0,049	1,428	1,477	0,035	0,999	1,034	0,028	0,803	0,831
PD	R0	10-20	B	0,035	1,215	1,251	0,047	1,604	1,651	0,041	1,404	1,455
PD	R0	20-30	B	0,020	1,016	1,036	0,025	1,301	1,326	0,023	1,201	1,224
PD	R0	0-20	B				0,329	3,800	4,129	0,282	3,237	3,529
PD	R0	0-30	B				0,354	5,100	5,454	0,305	4,438	4,753
PD	R0	0-5	C	0,436	1,904	2,340	0,303	1,323	1,626	0,261	1,139	1,400

Apêndice 3.4. Continuação...

PD	R0	5-10	C	0,068	1,559	1,627	0,048	1,091	1,139	0,038	0,877	0,916
PD	R0	10-20	C	0,059	1,238	1,296	0,078	1,634	1,711	0,068	1,440	1,508
PD	R0	20-30	C	0,021	1,140	1,161	0,027	1,459	1,487	0,025	1,347	1,373
PD	R0	0-20	C				0,428	4,048	4,477	0,368	3,456	3,824
PD	R0	0-30	C				0,456	5,508	5,963	0,393	4,804	5,197
PD	R0	0-5	D	0,485	1,725	2,210	0,337	1,199	1,536	0,290	1,032	1,322
PD	R0	5-10	D	0,111	1,337	1,448	0,078	0,936	1,013	0,063	0,752	0,815
PD	R0	10-20	D	0,052	1,134	1,186	0,069	1,497	1,566	0,042	1,319	1,380
PD	R0	20-30	D	0,044	1,088	1,131	0,056	1,392	1,448	0,052	1,285	1,337
PD	R0	0-20	D				0,483	3,632	4,115	0,395	3,104	3,517
PD	R0	0-30	D				0,539	5,024	5,563	0,447	4,389	4,854
PD	R1	0-5	A	0,469	2,111	2,580	0,321	1,446	1,767	0,286	1,287	1,574
PD	R1	5-10	A	0,059	1,713	1,772	0,041	1,182	1,223	0,034	0,986	1,020
PD	R1	10-20	A	0,062	1,459	1,521	0,083	1,955	2,038	0,070	1,667	1,738
PD	R1	20-30	A	0,009	1,339	1,348	0,012	1,727	1,739	0,011	1,571	1,582
PD	R1	0-20	A				0,445	4,583	5,028	0,391	3,941	4,332
PD	R1	0-30	A				0,457	6,311	6,767	0,401	5,512	5,913
PD	R1	0-5	B	0,358	1,914	2,272	0,245	1,311	1,556	0,218	1,167	1,386
PD	R1	5-10	B	0,102	1,696	1,799	0,071	1,171	1,241	0,059	0,977	1,036
PD	R1	10-20	B	0,052	1,304	1,356	0,070	1,748	1,817	0,059	1,490	1,550
PD	R1	20-30	B	0,037	1,252	1,289	0,048	1,615	1,663	0,044	1,469	1,513
PD	R1	0-20	B				0,385	4,229	4,615	0,336	3,634	3,971
PD	R1	0-30	B				0,433	5,845	6,278	0,380	5,104	5,484
PD	R1	0-5	C	0,384	1,939	2,324	0,263	1,328	1,592	0,234	1,183	1,417
PD	R1	5-10	C	0,097	1,628	1,725	0,067	1,123	1,190	0,056	0,937	0,993
PD	R1	10-20	C	0,035	1,271	1,306	0,047	1,703	1,750	0,040	1,452	1,492
PD	R1	20-30	C	0,025	1,144	1,170	0,033	1,476	1,509	0,030	1,343	1,373
PD	R1	0-20	C				0,377	4,155	4,532	0,330	3,572	3,902
PD	R1	0-30	C				0,410	5,631	6,040	0,360	4,915	5,275
PD	R1	0-5	D	0,505	1,776	2,282	0,346	1,217	1,563	0,308	1,083	1,392
PD	R1	5-10	D	0,101	1,412	1,514	0,070	0,974	1,044	0,058	0,813	0,871

Apêndice 3.4. Continuação...

PD	R1	10-20	D	0,035	1,181	1,216	0,047	1,582	1,629	0,040	1,349	1,389
PD	R1	20-30	D	0,028	1,114	1,142	0,036	1,437	1,473	0,033	1,307	1,340
PD	R1	0-20	D				0,463	3,773	4,237	0,407	3,245	3,652
PD	R1	0-30	D				0,499	5,210	5,709	0,439	4,553	4,992
PD	R2	0-5	A	0,417	2,111	2,528	0,280	1,414	1,694	0,261	1,319	1,580
PD	R2	5-10	A	0,129	1,713	1,842	0,087	1,165	1,252	0,076	1,006	1,082
PD	R2	10-20	A	0,032	1,459	1,491	0,043	1,970	2,013	0,036	1,651	1,687
PD	R2	20-30	A	0,032	1,339	1,371	0,041	1,727	1,768	0,037	1,571	1,609
PD	R2	0-20	A				0,410	4,549	4,959	0,373	3,977	4,349
PD	R2	0-30	A				0,451	6,276	6,728	0,410	5,548	5,958
PD	R2	0-5	B	0,349	1,974	2,323	0,234	1,323	1,556	0,218	1,234	1,452
PD	R2	5-10	B	0,081	1,632	1,714	0,055	1,110	1,165	0,048	0,959	1,007
PD	R2	10-20	B	0,077	1,441	1,518	0,104	1,945	2,049	0,087	1,630	1,717
PD	R2	20-30	B	0,025	1,251	1,276	0,032	1,613	1,646	0,029	1,468	1,497
PD	R2	0-20	B				0,393	4,378	4,771	0,353	3,823	4,176
PD	R2	0-30	B				0,426	5,991	6,417	0,383	5,291	5,674
PD	R2	0-5	C	0,327	1,951	2,278	0,219	1,307	1,527	0,205	1,220	1,424
PD	R2	5-10	C	0,097	1,577	1,674	0,066	1,072	1,138	0,057	0,926	0,983
PD	R2	10-20	C	0,038	1,453	1,490	0,051	1,961	2,012	0,043	1,644	1,686
PD	R2	20-30	C	0,022	1,335	1,357	0,028	1,722	1,750	0,025	1,567	1,592
PD	R2	0-20	C				0,336	4,341	4,677	0,304	3,790	4,094
PD	R2	0-30	C				0,364	6,063	6,427	0,330	5,356	5,686
PD	R2	0-5	D	0,348	1,888	2,236	0,233	1,265	1,498	0,218	1,180	1,398
PD	R2	5-10	D	0,075	1,467	1,542	0,051	0,998	1,049	0,044	0,862	0,906
PD	R2	10-20	D	0,041	1,331	1,372	0,056	1,796	1,852	0,047	1,505	1,552
PD	R2	20-30	D	0,032	1,169	1,201	0,042	1,508	1,550	0,038	1,372	1,410
PD	R2	0-20	D				0,340	4,059	4,399	0,308	3,547	3,856
PD	R2	0-30	D				0,381	5,567	5,949	0,346	4,920	5,266

¹ (R0) sucessão trigo/soja; (R1) aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja e (R2) aveia/ soja/trigo/soja.

Apêndice 3.5. Causas de variação e coeficiente de variação do estoque de nitrogênio na fração particulada (NTP, >53 µm), na fração associada aos minerais (NTAM, <53 µm) e total (NT) calculados pela camada equivalente e massa equivalente, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 0-20 e 0-30 cm.

Causa de variação	Camada equivalente			Massa equivalente		
	NTP	NTAM	NT	NTP	NTAM	NT
0-5 cm						
Preparo	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0001 *
Rotação	0,2343 ns	0,0729 ns	0,1539 ns	0,2783 ns	0,0019 *	0,0243 *
Preparo x rotação	0,4148 ns	0,9888 ns	0,7772 ns	0,6515 ns	0,3119 ns	0,8679 ns
C.V. (%)	22,43	4,59	6,17	22,52	4,58	6,24
5-10 cm						
Preparo	0,0002 *	0,2176 ns	0,0363 *	0,0002 *	0,0810 ns	0,0126 *
Rotação	0,4724 ns	0,2208 ns	0,2251 ns	0,2590 ns	0,0172 *	0,0197 *
Preparo x rotação	0,9194 ns	0,2229 ns	0,2776 ns	0,9512 ns	0,2381 ns	0,3112 ns
C.V. (%)	27,38	7,12	7,69	27,54	7,04	7,66
10-20 cm						
Preparo	0,0114 *	0,0015 *	0,0018 *	0,0225 *	0,9498 ns	0,5793 ns
Rotação	0,8606 ns	0,0304 *	0,1010 ns	0,9526 ns	0,0005 *	0,0034 *
Preparo x rotação	0,5012 ns	0,0472 **	0,0818 **	0,6493 ns	0,6743 ns	0,8444 ns
C.V. (%)	40,73	6,20	7,33	40,08	5,95	7,02
20-30 cm						
Preparo	0,4442 ns	0,1969 ns	0,1930 ns	0,4990 ns	0,3703 ns	0,3581 ns
Rotação	0,5932 ns	0,8076 ns	0,8341 ns	0,5966 ns	0,8536 ns	0,8810 ns
Preparo x rotação	0,3544 ns	0,0499 **	0,0536 **	0,3798 ns	0,0610 **	0,0656 **
C.V. (%)	51,46	11,16	11,42	51,69	11,08	11,36

Continuação do Apêndice 3.5.

Causa de variação	Camada equivalente			Massa equivalente		
	NTP	NTAM	NT	NTP	NTAM	NT
	0-20 cm					
Preparo	0,0444 *	0,9061 ns	0,4125 ns	0,0230 ns	0,0346 *	0,0193 *
Rotação	0,5997 ns	0,0081 *	0,0383 *	0,4547 ns	0,0001 *	0,0004 *
Preparo x rotação	0,9271 ns	0,0424 **	0,1747 ns	0,9237 ns	0,5572 ns	0,8085 ns
C.V. (%)	20,23	3,80	4,72	19,78	3,71	4,64
	0-30 cm					
Preparo	0,0968 ns	0,4413 ns	0,8309 ns	0,0562 ns	0,5139 ns	0,2985 ns
Rotação	0,5413 ns	0,0738 ns	0,1378 ns	0,4530 ns	0,0037 *	0,0111 *
Preparo x rotação	0,9994 ns	0,0172 **	0,0507 **	0,9999 ns	0,1051 ns	0,2093 ns
C.V. (%)	20,82	4,82	5,48	20,32	3,34	5,41

* significativo a 5%. ** interação significativa a 10%. ns = não significativo. Em negrito a significância de maior grau utilizada na análise dos resultados.