

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ROTAÇÕES DE CULTURAS SOB
SISTEMA SEMEADURA DIRETA**

JUAN PIERO ANTONIO RAPHAEL

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU – SP

Abril – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ROTAÇÕES DE CULTURAS SOB
SISTEMA SEMEADURA DIRETA**

JUAN PIERO ANTONIO RAPHAEL

Orientador: Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU – SP

Abril – 2014

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO- BOTUCATU (SP)

R217m Raphael, Juan Piero Antonio, 1985-
Matéria orgânica do solo em rotações de culturas sob sistema semeadura direta / Juan Piero Antonio Raphael.- Botucatu : [s.n.], 2014
xiv, 101 f., il., color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Juliano Carlos Calonego
Inclui bibliografia

1. Rotação de cultivos. 2. Solos - Manejo. 3. Nitrogênio na agricultura. 4. Compostos de Carbono. 5. Solos - Teor do carbono. I. Calonego, Juliano Carlos. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ROTAÇÕES DE CULTURAS
SOB SISTEMA SEMEADURA DIRETA"

ALUNO: JUAN PIERO ANTONIO RAPHAEL

ORIENTADOR: PROF. DR. JULIANO CARLOS CALONEGO

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JULIANO CARLOS CALONEGO



PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM



PROF. DR. RODRIGO ARROYO GARCIA

Data da Realização: 24 de abril de 2.014.

DEDICATÓRIA

Dedico

*aos meus pais Waldomiro e Marisa, à minha irmã Vivian,
pelo amor e pelo incentivo, agora e sempre,
e aos meus queridos avós e padrinhos.*

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP – pela oportunidade e suporte na realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao orientador, Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego, pela amizade, ensinamentos e apoio na condução deste experimento.

Ao Prof. Dr. Ciro Rosolem, pelos ensinamentos, apoio e sugestões durante a realização do experimento.

Aos pesquisadores da Embrapa Instrumentação Agropecuária Débora Milori, Paulino Villas Boas e Ladislau Martin-Neto, pela parceria e apoio nas análises de grau humificação.

Aos colegas Gustavo Castoldi, Laércio Augusto Pivetta, João Paulo Gonsiorkiewicz Rigon e Leontino de Oliveira Neto, pela amizade, companheirismo e apoio na condução em conjunto das áreas experimentais e no desenvolvimento do projeto.

Ao amigo e técnico responsável pelo Laboratório de Relações Solo-Planta, Dorival Pires de Arruda, pela amizade e auxílio nas análises laboratoriais.

Aos colegas de pós-graduação do Departamento de Produção Vegetal, pelo companheirismo e amizade, que indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Produção Vegetal.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIV
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1. Caracterização da matéria orgânica do solo.....	8
4.2. Determinação dos compartimentos da matéria orgânica do solo.....	11
4.3. Estratégias de manejo do solo para aumentar o teor de matéria orgânica	16
4.3.1. Sistema Semeadura Direta.....	17
4.3.2. Quantidade e qualidade de fitomassa em rotações de culturas.....	18
5. MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1. Caracterização e localização das áreas experimentais	22
5.2. Experimento I	23
5.2.1. Histórico das rotações de culturas	23
5.2.2. Condução do experimento	24
5.2.2.1. Cultura da soja na safra 2011/2012	24
5.2.2.2. Culturas de outono/inverno de 2012	25
5.2.2.3. Culturas de primavera de 2012.....	25
5.2.2.4. Cultura da soja na safra 2012/2013	26
5.3. Experimento II	26
5.3.1. Histórico da área e rotações de culturas	26
5.3.2. Condução do experimento	27
5.3.2.1. Cultura da soja na safra 2011/2012	27
5.3.2.2. Culturas de outono/inverno de 2012	28
5.3.2.3. Culturas de primavera de 2012.....	28
5.3.2.4. Cultura da soja na safra 2012/2013	28
5.4. Massa de matéria seca de palha das culturas em rotação.....	29
5.5. Caracterização química das espécies vegetais	30

5.6.	Coletas e análises de amostras de solos	31
5.6.1.	Coletas e armazenamento de amostras de solo deformadas	32
5.6.2.	Análises de caracterização química, granulométrica e mineralógica	33
5.6.3.	Análises de carbono orgânico total e nitrogênio total do solo.....	36
5.6.4.	Grau de humificação da matéria orgânica do solo	37
5.6.5.	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	39
5.6.6.	Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo.....	40
5.6.7.	Carbono solúvel em água e em água quente.....	44
5.6.7.1.	Carbono solúvel em água	44
5.6.7.2.	Carbono solúvel em água quente	45
5.6.8.	Coleta e análise de agregados do solo	46
5.6.	Análises estatísticas	47
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1.	Experimento I	48
6.1.1.	Carbono orgânico e nitrogênio totais do solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo	48
6.1.2.	Grau de humificação da matéria orgânica do solo	55
6.1.3.	Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo.....	57
6.1.4.	Carbono solúvel em água e em água quente.....	59
6.1.5.	Análises de solo da mata nativa.....	60
6.1.6.	Análises de correlação	61
6.1.7.	Análises de agregados do solo.....	63
6.1.8.	Produtividade de grãos de soja	65
6.2.	Experimento II.....	67
6.2.1.	Carbono orgânico e nitrogênio totais do solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo	67
6.2.2.	Grau de humificação da matéria orgânica do solo	74
6.2.3.	Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo.....	76
6.2.4.	Carbono solúvel em água e em água quente.....	78
6.2.5.	Análises de correlação	80
6.2.6.	Análises de agregados do solo.....	82
6.2.7.	Produtividade de grãos de soja	85
7.	CONCLUSÕES.....	87

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitação e temperaturas mínima e máxima diárias entre dezembro de 2011 e abril de 2013, na fazenda experimental Lageado (FCA/UNESP). Botucatu, SP. 23
- Figura 2.** Identificação, no solo do experimento I (Latosolo), de minerais (filossilicatos e óxidos) na fração argila por difratometria de Raios X, com fração argila saturada com magnésio e atmosfera de etileno-glicol. A, B, C e D correspondem às camadas de 0-0,10 m (A); 0,10-0,20 m (B); 0,20-0,40 m (C) e 0,40-0,60 m (D), respectivamente. 34
- Figura 3.** Identificação, no solo do experimento II (Nitossolo), de minerais (filossilicatos e óxidos) na fração argila por difratometria de Raios X, com fração argila saturada com magnésio e atmosfera de etileno-glicol. A, B, C e D correspondem às camadas de 0-0,10 m (A); 0,10-0,20 m (B); 0,20-0,40 m (C) e 0,40-0,60 m (D), respectivamente. 35
- Figura 4.** Analisador Elementar Modelo TruSpec™ CHNS - LECO® 37
- Figura 5.** Determinação do grau de humificação por fluorescência induzida a laser: pastilha de solo após o processo de prensagem (A); emissão de laser no comprimento de 465 nm pelo equipamento (B); medição das intensidades de emissão de fluorescência das pastilhas de solo (C); curva de emissão fluorescência de uma pastilha de solo (D). 38

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Massa de matéria seca de palha das espécies vegetais no experimento I (Latossolo) no ano de 2012. Botucatu, SP..... 29
- Tabela 2.** Massa de matéria seca de palha das espécies vegetais no experimento II (Nitossolo) no ano de 2012. Botucatu, SP..... 30
- Tabela 3.** Caracterização química das espécies nos sistemas de rotação de culturas. Botucatu, 2012..... 31
- Tabela 4.** Quantidade de nitrogênio das espécies vegetais em rotação calculada a partir da massa de matéria seca de palha nas áreas experimentais de Latossolo e Nitossolo. Botucatu, 2012..... 31
- Tabela 5.** Caracterização química e granulométrica do solo no experimento I (Latossolo). Botucatu, 2012..... 33
- Tabela 6.** Caracterização química e granulométrica do solo no experimento II (Nitossolo). Botucatu, 2012..... 33
- Tabela 7.** Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) dos teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), relação C/N do solo e relação COP/COT nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m na área de Latossolo. Botucatu, 2013. 51
- Tabela 8.** Teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (COM) no solo, em g kg^{-1} , nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu 2013. 52
- Tabela 9.** Relação C/N do solo e relação carbono orgânico particulado/carbono orgânico total (COP/COT) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013. 53

Tabela 10. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2012. 56

Tabela 11. Grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2012. 56

Tabela 12. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}), do nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}) e de suas relações com seus respectivos teores totais (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013. 58

Tabela 13. Teores de carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) e nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}), e relações com seus respectivos teores totais (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013. 58

Tabela 14. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) do solo nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20. Área de Latossolo, Botucatu, 2013. 59

Tabela 15. Teores de carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) do solo, em $mg\ kg^{-1}$, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013. 59

Tabela 16. Caracterização da área de mata próxima ao experimento em Latossolo quanto aos teores no solo de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação C/N, carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), relação COP/COT, grau de humificação (H_{FIL}), carbono da biomassa microbiana (C_{BMS}), nitrogênio da biomassa microbiana (N_{BMS}), relação C_{BMS}/COT e relação N_{BMS}/NT . Botucatu, 2013. 61

Tabela 17. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os valores determinados nas análises de solo na camada de 0-0,10 m. COT (carbono orgânico total do solo), NT (nitrogênio total do solo), COP (carbono orgânico particulado), COM (carbono orgânico associado a minerais), H_{FIL} (grau de humificação) CSA (carbono solúvel em água) e CSA_q (carbono solúvel em água quente). Área de Latossolo, Botucatu, SP. 62

Tabela 18. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2012..... 63

Tabela 19. Valores médios das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m na área de Latossolo, Botucatu, 2012. 64

Tabela 20. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) da produtividade de grãos de soja nas safras 2011/12 e 2012/13. Área de Latossolo, Botucatu, SP. 66

Tabela 21. Produtividade de grãos de soja nas safras 2011/12 e 2012/13. Área de Latossolo, Botucatu, SP. 66

Tabela 22. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) dos teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), relação C/N do solo e relação COP/COT nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 68

Tabela 23. Teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (COM) no solo, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 69

Tabela 24. Relação C/N do solo e relação carbono orgânico particulado/carbono orgânico total (COP/COT) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013..... 72

Tabela 25. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2012. 75

Tabela 26. Grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2012. 75

Tabela 27. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}), do nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}) e de suas relações com seus respectivos teores totais no solo (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 77

Tabela 28. Teores de carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) e nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}), e relações com seus respectivos teores totais (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m na área de Nitossolo, Botucatu, 2013. ... 77

Tabela 29. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) de carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 79

Tabela 30. Teores de carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) no solo, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 79

Tabela 31. Coeficientes de correlação de Perason (r) entre os valores determinados nas análises de solo na camada de 0-0,10 m. COT (carbono orgânico total do solo), NT (nitrogênio total do solo), COP (carbono orgânico particulado), COM (carbono orgânico associado a minerais), CSA (carbono solúvel em água) e CSA_q (carbono solúvel em água quente). Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 81

Tabela 32. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013. 83

Tabela 33. Valores médios das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2012. 84

Tabela 34. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) da produtividade de grãos de soja nas safras 2011/12 e 2012/13. Área de Nitossolo, Botucatu, SP. 86

Tabela 35. Produtividade de grãos de soja na safra 2011/12. Área de Nitossolo, Botucatu, SP. 86

Tabela 36. Produtividade de grãos de soja na safra 2012/13. Área de Nitossolo, Botucatu, SP. 86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS	biomassa microbiana do solo
C	carbono
¹³C	carbono 13
¹⁴C	carbono 14
C_{BMS}	carbono da biomassa microbiana do solo
C/N	relação carbono/nitrogênio
CO₂	dióxido de carbono
COM	carbono orgânico associado a minerais
COP	carbono orgânico particulado do solo
COP/COT	relação carbono orgânico total/carbono orgânico particulado
COT	carbono orgânico total do solo
CSA	carbono solúvel em água
CSA_q	carbono solúvel em água quente
DMG	diâmetro médio geométrico
DMP	diâmetro médio ponderado
E₄/E₆	relação absorvância a 465 nm/absorvância a 665 nm
EPR	ressonância paramagnética eletrônica
FIL	fluorescência induzida a laser
H_{FIL}	grau de humificação por fluorescência induzida a laser
IEA	índice de estabilidade de agregados
MOM	matéria orgânica associada a minerais
MOP	matéria orgânica particulada
MOS	matéria orgânica do solo
N	nitrogênio
N₂O	óxido nitroso
N_{BMS}	nitrogênio da biomassa microbiana do solo
NT	nitrogênio total do solo
O₂	gás oxigênio
RMN	ressonância magnética nuclear
SSD	Sistema Semeadura Direta
UV-VIS	ultravioleta-visível

1. RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) apresenta um amplo conjunto de funções e tem sua quantidade e sua qualidade alteradas pelas diferentes possibilidades de rotações de culturas e manejo do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os teores e a qualidade da matéria orgânica do solo em função de culturas em rotação sob Sistema Semeadura Direta (SSD). A pesquisa foi realizada em duas áreas conduzidas em SSD por no mínimo oito anos, com diferentes rotações de culturas, na Fazenda Experimental Lageado, Botucatu, SP. No experimento I, em um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa, as culturas em rotação foram sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis* (R. Germ. & C. M. Evrard) Crins), e o consórcio de ambas no outono/inverno; milheto (*Pennisetum glaucum* L.), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), na primavera, como subparcelas, antecedendo a cultura da soja no verão. O segundo experimento foi conduzido em Nitossolo Vermelho distroférico de textura muito argilosa. As parcelas foram constituídas pelas culturas de outono/inverno triticales (X *Triticosecale Wittmack*) e girassol (*Helianthus annuus* L.); e as subparcelas pelas culturas de primavera

milheto, sorgo forrageiro e crotalaria júncea, além de um pousio com escarificações, realizadas em 2003 e 2009. Na safra de verão foi cultivada a soja, em todas as subparcelas. Em amostras de solo coletadas em abril de 2012, foi determinado o grau de humificação da matéria orgânica pelo método de fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Em amostras coletadas em novembro de 2012, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, foram realizadas análises de estabilidade de agregados do solo. Em amostras coletadas em abril de 2013, foram determinados os teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (COM), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m; os teores de C e N da biomassa microbiana do solo na camada de 0-0,10 m; e as frações de carbono orgânico solúveis em água (CSA) e em água quente (CSA_q) nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. A qualidade da matéria orgânica do solo foi influenciada em suas frações mais e menos recalcitrantes pelas culturas em rotação em Sistema Semeadura Direta, principalmente pelas de primavera, nos dois experimentos. Os teores de carbono orgânico total do solo foram influenciados pelas culturas em rotação de modo que aumentaram em rotações de culturas que promoveram maior aporte de nitrogênio no solo, principalmente quando envolveram a cultura da crotalaria na primavera, ocorrendo maiores efeitos na área de Nitossolo e nas duas camadas superficiais. Maiores teores de carbono orgânico no solo não resultaram em maiores índices de agregação, mas os solos apresentaram condições satisfatórias de estruturação. As rotações de culturas afetaram a produtividade da soja que, no entanto, não esteve relacionada às elevações dos teores de carbono orgânico e nitrogênio do solo. O carbono orgânico do solo foi pouco afetado pelas características peculiares de cada um dos dois ambientes de estudo, representados pelos dois experimentos, com diferentes históricos e teores de argila no solo, sendo muito mais influenciado pela presença de nitrogênio no solo. Conclui-se que em Sistema Semeadura Direta o aumento no teor de matéria orgânica do solo é limitado pela disponibilidade de nitrogênio, o que aumenta sua importância nas estratégias de conservação do solo e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Palavras-chave: manejo do solo; culturas de cobertura; carbono orgânico; nitrogênio.

SOIL ORGANIC MATTER IN CROP ROTATIONS UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Universidade Estadual Paulista.

Author: JUAN PIERO ANTONIO RAPHAEL

Adviser: JULIANO CARLOS CALONEGO

2. SUMMARY

Soil organic matter (SOM) plays major functions in agricultural soils, and its contents and quality can be altered by crop rotations and soil management. The aim of this study was to evaluate changes in soil organic matter as affected by crop rotations under no-tillage system. The study was carried out at two no-till managed field sites for at least eight years, in Botucatu, SP, Brazil. In the first experiment, the soil was a Rhodic Ferralsol, in which grain-sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and ruzigrass (*Urochloa ruziziensis* (R. Germ. and C. M. Evrard) Crins), single or intercropped in the fall/winter period, were the plots. Pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.), forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) were cropped in the spring, as subplots, before the summer crop (soybean). In the second experiment, the soil

was a Typic Rhodudalf under no-till since 2003 and the crop rotations studied were: triticale (*X Triticosecale* Wittmack) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) as autumn-winter crops (plots); pearl millet, forage sorghum, sunn hemp and chiseling (performed in 2003 and 2009) in spring as subplots, before the summer crop (soybean). Organic matter humification degree (H_{LIF}) was determined by laser-induced fluorescence spectroscopy (LIF) in soil samples collected from 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m depths in April 2012. Soil aggregates stability was assessed from soil samples collected from 0-0,10 and 0,10-0,20 m depths in November 2012. The remaining soil organic matter assessments were carried out from samples collected in April 2013. Total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), particulate organic carbon (POC), and mineral associated organic carbon (MOC) contents were determined from soil samples collected from 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m depths; soil microbial biomass C and N were determined from soil samples collected from 0-0,10 m; water-soluble C (WSC) and hot water-extractable C (HWC) were determined from soil samples collected from 0-0,10 and 0,10-0,20 m. Labile and recalcitrant soil organic matter fractions were affected by the crop rotations under no-tillage system, mainly by spring crops. Soil total organic carbon contents were affected by the crop rotations so that they were increased by crops which promoted greater nitrogen inputs in soil. Soil aggregation was not improved by crops which increased soil organic carbon content, but the results indicated satisfactory soil structure in the two experiments. Soybean yield was affected by the crop rotations, but it was not related to carbon and nitrogen inputs to soil. Soil organic carbon was little influenced by differences between the two experimental sites, with different land-use history and clay contents. However, soil nitrogen contents had a greater effect on soil organic carbon content in the two experiments. It can be concluded from the present study that nitrogen availability is a limiting factor to the increase of soil organic matter content in no-tillage system, which intensifies its importance to soil conservation strategies and sustainability of agricultural systems.

Keywords: soil management; cover crops; organic carbon; nitrogen.

3. INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos atributos utilizados na mensuração da qualidade dos solos (LARSON; PIERCE, 1994), exercendo um papel chave em sua qualidade agronômica e ambiental (MIELNICZUK, 2008; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). É considerada um componente crítico, influenciando processos biológicos, químicos e físicos e, através do efeito sobre estes processos, apresenta um amplo conjunto de funções (CRASWELL; LEFROY, 2001). À MOS têm sido atribuídos benefícios como a reserva de nutrientes requeridos por plantas e microorganismos (TIESSEN et al., 1992), a contribuição efetiva na capacidade de troca de cátions e, conseqüentemente, na fertilidade do solo (KAISER et al., 2008; RAIJ, 1969), a complexação de íons metálicos tóxicos (BEZERRA et al., 2009; WENG et al., 2002), a agregação e a estabilização da estrutura do solo (BRONICK; LAL, 2005), a infiltração de água (FRANZLUEBBERS, 2002; MENDONÇA et al., 2009) e a retenção de água (MACHADO et al., 2008; SMAGIN et al., 2004). Outro papel importante da matéria orgânica do solo, mais recentemente estudado, está no balanço global de carbono, inserindo-se na discussão sobre mudanças climáticas (CRASWELL; LEFROY, 2001). Os solos agrícolas atuam como fonte ou dreno de C atmosférico, dependendo das práticas de

manejo utilizadas, da quantidade de C adicionado via resíduos vegetais e da qualidade desses resíduos. Portanto, é importante identificar sistemas de produção que mais contribuam na redução de suas emissões, promovendo o acúmulo de C em matéria orgânica estável no solo (CERRI et al., 2007). Assim, para evitar danos ao solo, são recomendáveis estratégias de manejo conservacionistas, de modo que minimizem perdas ou possibilitem ganhos de matéria orgânica, como o Sistema Semeadura Direta, já consolidado em algumas regiões do mundo e muito importante no Brasil.

No entanto, embora estudos comparativos entre o sistema de preparo convencional do solo, envolvendo revolvimento com grades ou arados e o SSD indiquem a grande vantagem do SSD na dinâmica de MOS, há uma necessidade de se aprofundarem os conhecimentos sobre rotações de culturas dentro do sistema. As espécies envolvidas podem afetar a quantidade e a qualidade da matéria orgânica do solo através do aporte de fitomassa de raízes e de parte aérea, que poderão posteriormente ser transformados mediante os processos de mineralização e humificação; das características intrínsecas dos resíduos culturais, que influenciam a sua velocidade de decomposição; das características de desenvolvimento do sistema radicular, modificando propriedades físicas do solo de modo a favorecer o acúmulo de MOS; e da influência sobre a fauna microbiana, componente fundamental na formação da MOS. O nitrogênio envolvido no sistema de sucessão ou rotação também influencia a produção de fitomassa e o metabolismo de espécies microbianas, apresentando uma importante função na dinâmica da MOS, o que é comprovado pela grande proporção de nitrogênio orgânico no nitrogênio total do solo.

Dentro deste contexto, estudos envolvendo a influência sobre a quantidade e a qualidade da MOS são necessários para compreensão das vantagens e limitações de espécies e rotações de culturas, e para posteriores recomendações de manejo. Quanto mais humificada, a MOS pode representar um dreno mais estável de carbono e menos sujeito à emissão gasosa. Entretanto, para obter estas respostas em áreas agrícolas, principalmente em estudos com sistemas de manejo do solo e rotação de culturas, são necessários trabalhos de longa duração, em áreas consolidadas e com históricos bem definidos.

Tendo-se em vista a importância da matéria orgânica sobre o solo e a influência de sistemas de rotações de culturas envolvendo gramíneas e leguminosas sobre a sua dinâmica, levantaram-se as seguintes hipóteses: a) a qualidade da matéria orgânica do solo é influenciada em suas frações mais e menos recalcitrantes pelas culturas em rotação

em Sistema Semeadura Direta; b) os teores de matéria orgânica do solo são influenciados pelas culturas em rotação na ausência de adubação nitrogenada, sendo maiores em rotações de culturas que promovam maior aporte de nitrogênio no solo; c) culturas em rotação que promovem maiores teores de matéria orgânica também favorecem a agregação do solo e a produtividade de soja. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os teores e a qualidade da matéria orgânica do solo em função de culturas em rotação sob Sistema Semeadura Direta (SSD).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Caracterização da matéria orgânica do solo

A fração orgânica do solo pode ser agrupada em dois componentes fundamentais: um primeiro, constituído por material em estádios iniciais de decomposição, em que a morfologia do material vegetal de origem é ainda identificada; e um segundo, composto por material em fase avançada de decomposição, que não apresenta vestígios morfológicos do qual se originou, de coloração escura, conhecido como húmus (DICK et al., 2009). Há também uma fração viva da MOS: a biomassa microbiana, constituída predominantemente por fungos e bactérias presentes no solo.

O conceito de matéria orgânica não é uma unanimidade na comunidade científica. Em algumas situações, é tratada como sinónimo de húmus. Em outras inclui, além do húmus, os tecidos vegetais e animais em diferentes fases de decomposição que ocorrem dentro do solo (STEVENSON, 1994). O húmus é usualmente referido como “matéria orgânica pesada ou humificada”, enquanto os resíduos ainda em fases mais iniciais de decomposição como “matéria orgânica leve ou particulada”. Segundo Swift (1996), o húmus é formado por uma família de macromoléculas de estrutura não

muito bem definida, compostas por grupos hidrofóbicos e hidrofílicos, sítios de carga e íons acompanhantes, conhecidas substâncias húmicas.

A formação do húmus envolve um conjunto de transformações desde a incorporação da MOS fresca até a formação das frações humificadas mais estáveis. Guerra et al. (2008) dividem e conceituam a formação das substâncias húmicas em dois processos básicos: mineralização e humificação. A mineralização é um processo de degradação de moléculas maiores e mais complexas em outras mais simples. Os compostos fenólicos e lignificados que permanecem no solo após a fase de mineralização são estabilizados por processos bio-físico-químicos, constituindo o processo de humificação, levando à formação das substâncias húmicas.

Quanto ao processo de humificação, não há um consenso científico absoluto, embora, conceitualmente, haja duas teorias clássicas. Na primeira, compostos polifenólicos produzidos a partir da decomposição de resíduos vegetais, como lignina e taninos, e do metabolismo microbiano sofreriam reações de oxidação, formando quinonas, as quais se condensariam, e formariam gradativamente as estruturas macromoleculares das substâncias húmicas. Nestas estruturas, haveria um aumento relativo no teor de carbono e uma diminuição no oxigênio e no hidrogênio, conforme avançassem os estágios de condensação. Na segunda, haveria uma quebra de todos os biopolímeros vegetais e microbianos, ocorrendo combinações entre aminoácidos e açúcares redutores (reações de Mailard), para produzir estruturas de crescente complexidade, até as substâncias húmicas serem formadas (DICK et al., 2009; STEVENSON, 1994). Entretanto, tanto o processo de humificação, como a estrutura das substâncias húmicas são questionados (BURDON, 2001).

As substâncias húmicas participam, entre outros processos, da estabilização de agregados do solo (SWIFT, 1991), da dissolução de minerais (HOCH et al., 2000) e da redução de toxicidade de metais tóxicos (BOTERO, 2010; VIOLANTE et al., 2010). Em decorrência do processo de humificação, os ácidos húmicos e fúlvicos desenvolvem em sua estrutura cadeias carbônicas alifáticas e aromáticas, às quais podem estar associados diversos grupos funcionais como carboxila, hidroxila, amina, carbonila, entre outros (STEVENSON, 1994). A ocorrência de grupos com insuficiência de elétrons, como O-H, N-H e S-H, faz com que os ácidos húmicos e fúlvicos se comportem como ácidos fracos (CANELLAS et al., 2008; STEVENSON, 1994), havendo assim predominância de cargas negativas. Grupos carboxila são abundantes nestas frações e

atribui-se à ionização do íon hidrogênio destes grupos a principal contribuição da matéria orgânica para a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (DICK et al., 2009). Comparando-se a alguns minerais de argila (caulinita: 3 a 5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; illita: 30 a 40 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; montmorilonita: 80 a 150 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), as substâncias húmicas apresentam CTC que varia de 400 a 1400 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (CANELLAS et al., 2008), o que indica a efetiva contribuição da fração humificada da matéria orgânica para aumentar a fertilidade do solo.

A biomassa microbiana do solo (BMS), composta predominantemente por fungos e bactérias, embora represente somente entre 2 e 5% da MOS, é considerada seu componente chave, devido à participação em praticamente todas as reações que envolvem decomposição, imobilização, mineralização e síntese de novos compostos orgânicos, incluindo as substâncias húmicas. O nitrogênio microbiano representa geralmente de 1 a 5% do nitrogênio total na superfície do solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). Um desequilíbrio nas condições químicas e físicas do solo pode levar ao estresse da BMS, comprometer seu metabolismo e reduzir o fornecimento de nutrientes e o incremento de MOS ao solo. Quando um solo é revolvido, os agregados são desfeitos e a matéria orgânica protegida se torna mais acessível e suscetível à decomposição microbiana, reduzindo-se o conteúdo de MOS (BRAIDA et al., 2011). A textura do solo também pode influenciar a biomassa microbiana. Em solos mais argilosos, onde os teores de matéria orgânica são geralmente maiores, a biomassa microbiana também tende a ser maior (GAMA-RODRIGUES et al., 2005). A alteração do pH do solo também pode influenciar a atividade microbiana (PEREZ et al., 2004).

Um valor utilizado para avaliar a qualidade da matéria orgânica é a relação entre o carbono da biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) e o carbono orgânico total do solo (COT). Se a proporção for muito baixa, há então um indicativo de que a BMS não está atuando em equilíbrio com a MOS, provavelmente devido a um estresse em condições adversas, que pode incluir a qualidade do resíduo e alterações no próprio solo. Analogamente, a relação N microbiano/N total segue um comportamento semelhante quando os resíduos apresentam pior qualidade nutricional aos microorganismos (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008; JAKELAITIS et al., 2008).

4.2. Determinação dos compartimentos da matéria orgânica do solo

A determinação do teor de matéria orgânica do solo é realizada através da quantificação de carbono orgânico, que constitui entre 48 e 58% de seu peso total. O fator de Van Bemmelen (1,724) pode ser adotado para converter carbono orgânico total em matéria orgânica do solo, assumindo-se que a MOS contém 58% de C. No entanto, devido às variações na proporção de C na MOS, tanto entre diferentes solos, como entre horizontes de um mesmo solo, é recomendável que se reportem os valores de COT ao invés do valor calculado de MOS (NELSON; SOMMERS, 1996).

A combustão seca e a combustão úmida são dois procedimentos básicos utilizados para quantificar o C total nos solos, a partir do CO₂ liberado na reação. Os métodos de combustão seca podem ser realizados mediante a queima em forno para posterior quantificação gravimétrica. O procedimento também pode ser realizado em temperaturas mais elevadas (~1500°C) ou com fornos de indução em analisadores elementares (NELSON; SOMMERS, 1996). Analisadores elementares via seca para determinação de carbono e nitrogênio, embora de custo elevado, são muito precisos e relativamente rápidos na análise de amostras (ISLAM, 2006), tendo sido muito utilizados em trabalhos científicos nos últimos anos. Os métodos de combustão úmida empregam um oxidante forte, como o dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇), em uma mistura de digestão ácida para a oxidação quantitativa do C orgânico. Um método muito utilizado é o de Walkley-Balck, em que o carbono orgânico é oxidado rapidamente a CO₂ pelo íon dicromato em uma mistura de K₂Cr₂O₇ e H₂SO₄ em alta temperatura. Este método apresenta a vantagem de ser de menor custo, no entanto há as desvantagens de menor precisão na quantificação do C (NELSON; SOMMERS, 1996) e do uso reagentes com alto potencial de contaminação ambiental, como o dicromato, que envolve cromo hexavalente, um íon com potencial cancerígeno (CHAGAS et al., 2013). Há analisadores elementares de C via úmida baseados na combustão da amostras aquosas.

Embora a avaliação do teor de carbono orgânico total seja fundamental no estudo de sua dinâmica ou condição atual no solo, é possível que não seja suficiente para uma caracterização satisfatória, considerando-se que para alterações quantitativas no teor total pode ser necessário muito tempo, e que os diferentes compartimentos da MOS podem apresentar respostas distintas ao manejo adotado. Conseqüentemente, a avaliação isolada do COT pode não ser um bom indicador da MOS

quando se pretende realizar estudos mais detalhados. Assim, são necessárias avaliações que caracterizem mais precisamente a MOS em suas frações mais ou menos estáveis, o que, além da quantificação, permite uma compreensão de sua qualidade.

Entre os métodos químicos de fracionamento da matéria orgânica, o fracionamento sequencial com base na solubilidade das substâncias húmicas em meio alcalino e ácido é o mais conhecido na caracterização da MOS. Mediante esta técnica de extração, a matéria orgânica humificada pode ser separada em três grandes frações em termos de sua solubilidade em meio aquoso em função do pH: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas (STEVENSON, 1994; DICK et al., 2009). Ácidos húmicos são a fração não solúvel em água sob condições ácidas, mas que se torna solúvel sob maiores valores de pH; ácidos fúlvicos são a fração solúvel em meio aquoso sob qualquer valor de pH; huminas correspondem à fração não solúvel em um meio aquoso qualquer que seja o seu valor de pH (MacCARTHY; 2001). No entanto, há outros métodos, incluindo o descrito pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS), em que as substâncias húmicas, após reações de acidificação e alcalinização, são extraídas em somente um pH; extração com solventes não aquosos; extração de acordo com concentrações de sais; extração com solventes orgânicos, entre outros (SWIFT, 1996).

O emprego de métodos espectroscópicos também tem sido utilizado para caracterizar a matéria orgânica do solo. Segundo Ceretta et al. (2008), a espectroscopia em comprimentos de onda na faixa do ultravioleta-visível, conhecida como UV-VIS (200 a 800 nm), e do infravermelho (2,5 a 25 μm) permite a visualização gráfica da transmitância ou absorbância das amostras de matéria orgânica do solo em função do comprimento de onda. Picos de absorbância ou transmitância em determinados comprimentos de onda podem estar relacionados a uma maior ou menor humificação da matéria orgânica. Na espectroscopia na região do UV-VIS, é utilizada a relação E_4/E_6 (absorbância a 465 nm/absorbância a 665 nm), que é associada ao grau de humificação da matéria orgânica. Valores E_4/E_6 baixos estão relacionados a uma matéria orgânica mais humificada, com maior proporção de compostos aromáticos. Os ácidos húmicos, por exemplo, possuem um pico de absorção na região do ultravioleta (PRIMO et al., 2011).

No espectro do infravermelho, níveis de energia aplicados na região do intervalo de 2,5 a 25 μm promovem vibrações moleculares, produzindo-se em seguida espectros de transmitância ou absorbância cujos picos em bandas de comprimentos

de ondas são associados a grupos funcionais presentes na MOS (CERETTA et al., 2008; STEVENSON, 1994).

Entre outros métodos espectroscópicos estão a ressonância magnética nuclear (RMN), em que é produzido um espectro de deslocamento químico, cujas bandas espectrais estão associadas a grupos funcionais orgânicos (carbonilas, aromáticos, alifáticos) e a ressonância paramagnética eletrônica (EPR), em que são determinados a concentração de radicais livres semiquinona (CERETTA et al., 2008). Em RMN, é possível calcular o grau de aromaticidade a partir do espectro, e maiores valores indicam uma MOS mais humificada (STEVENSON, 1994). Maiores concentrações de radicais livres semiquinona em EPR também estão associadas a uma matéria orgânica mais humificada (MARTIN-NETO et al., 1998).

Milori et al. (2002a) apresentaram a técnica de espectroscopia por fluorescência induzida a laser (FIL) como uma alternativa para avaliar o grau de humificação da matéria orgânica em amostras de solo. Neste método, o princípio básico consiste em excitar o solo com um laser de comprimento de onda na região do ultravioleta/azul, resultando na fluorescência de grupos funcionais da matéria orgânica relacionados com o processo de humificação. Há então a possibilidade de se determinar o grau de humificação da matéria orgânica, após serem obtidos o espectro de emissão de fluorescência total e o carbono orgânico total do solo. Os autores concluíram que a técnica de FIL poderia ser uma ferramenta eficiente na análise qualitativa da matéria orgânica de solos, de forma rápida e precisa, além da vantagem do sistema poder ser miniaturizado, tendo, portanto, potencial para compor um sensor de campo, ao contrário dos métodos RMN e EPR, cujos equipamentos estão restritos ao laboratório. O FIL apresentou alta correlação ($r = 0,85$) com a espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (MILORI et al., 2002b). Milori et al. (2006), ao compararem o grau de humificação obtido pelo método de FIL com os métodos de espectroscopia de fluorescência propostos por Zsolnay et al. (1999) e Kalbitz et al. (1999), através de três índices do grau de humificação (A_4/A_1 , I_{465}/I_{399} e A_{465}), obtiveram boa correlação, concluindo ser o método FIL promissor para análise de grau de humificação em solos intactos, principalmente em solos com alto teor de Fe^{3+} , que pode ser restritivo a outros métodos como a RMN e a EPR.

As investigações sobre em quais compartimentos o carbono está sendo acumulado têm sido feitas também através do fracionamento físico da MOS, que pode ser granulométrico, densimétrico ou uma mistura de ambas. No método densimétrico,

as diferentes frações são separadas por sua densidade, através de flotação. Frações menos densas estão menos associadas a minerais e são denominadas frações leves, sendo subdivididas em fração leve livre e oclusa; a fração mais densa é denominada fração pesada e abrange as partículas orgânicas mais intimamente associadas a minerais (ROSCOE; MACHADO, 2002). Nos métodos granulométricos, as frações são separadas de acordo com seu tamanho e suas respectivas interações com a fração mineral do solo (GUERRA; SANTOS, 2008). No método granulométrico mais simples, a MOS é separada em duas grandes frações a partir do tamisamento em peneira de 0,053 mm: matéria orgânica particulada (MOP) ou lábil, mais grosseira, menos decomposta e associada à fração areia; e matéria orgânica associada a minerais (MOM), mais fina e associada a silte e argila (CAMBARDELLA; ELIOTT, 1992). A MOM pode ser analisada e subdividida em frações finas e grosseiras de silte e argila através de processos de sonicação e centrifugação (ELIOTT; CAMBARDELLA, 1993).

O acúmulo de C em frações mais ou menos lábeis da MOS tem sido relacionado à sua proteção física no interior de agregados, em consequência da inacessibilidade aos microrganismos e suas enzimas (FELLER; BEARE, 1997). A MOS protegida no interior de agregados, mais humificada, apresenta um tempo de permanência no solo maior do que a MOS lábil, sendo esta proteção maior nos microagregados do que nos macroagregados (BUYANOVSKY et al., 1994). O fracionamento físico pode ser mais adequado para o estudo qualitativo da MOS em comparação a métodos químicos (BAYER et al., 2003), resultando em frações mais associadas à estrutura e função da MOS do que aquelas obtidas pelos métodos químicos, tendo-se em vista sua relação com a textura do solo (FELLER et al., 2000). A MOS associada a frações mais grosseiras, como areia, de maior labilidade, é proveniente principalmente de resíduos vegetais recentemente degradados (BAYER et al., 2002; CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992; SIX et al., 2001). Já a MOS associada a frações mais finas, como argila, é considerada como de maior estabilidade (BALESDENT et al., 1988; BAYER et al., 2001; BUYANOVSKY et al., 1994).

A biomassa microbiana, tendo-se em vista sua importância nas reações de decomposição e síntese no solo, tem sido determinada através de métodos incluindo microscopia direta, adenosina trifosfato (OADES; JENKINSON, 1979; JENKINSON; LADD, 1981), taxa respiratória ou liberação de CO₂ (ANDERSON; DOMSCH, 1978), fumigação-incubação (JENKINSON; POWLSON, 1976), fumigação-

extração (VANCE et al., 1987; SPARLING; WEST, 1988) e irradiação-extração (ISLAM; WEIL, 1998; FERREIRA, 1999). Além da quantificação, os estudos da BMS são realizados de acordo com a sua atividade catabólica no solo, como a taxa de produção de CO₂, a taxa de consumo de O₂, a taxa de mineralização de N, e enzimas (JOERGENSEN; EMMERLING, 2006). Os métodos mais utilizados na quantificação da BMS envolvem a fumigação do solo com clorofórmio, provocando a morte e a liberação do C e N intracelulares, que posteriormente são quantificados. O método de irradiação com microondas como mecanismo biocida para determinação da BMS foi desenvolvido mais recentemente, apresenta as vantagens de ser rápido e dispensar o uso do clorofórmio, embora críticas também tenham sido feitas ao método (WANG et al., 2001).

Embora os valores de C e N da BMS sejam sensíveis a alterações no manejo do solo, podem não satisfazer como um indicador completo, uma vez que fortes alterações na comunidade microbiana são possíveis sem que haja alterações em sua biomassa ou em sua atividade (JOERGENSEN; EMMERLING, 2006). A avaliação da diversidade de microorganismos em nível genotípico por métodos de extração de DNA ou RNA do solo, com amplificação com PCR e separação por eletroforese, é uma alternativa que tem sido adotada em estudos recentes (MARSCHNER et al., 2003; SESSITSCH et al., 2004), embora suas interpretações sejam relativamente limitadas (JOERGENSEN; EMMERLING et al., 2006). Estudos com DNA de solo também têm sido empregados na avaliação de atividade microbiana (ANDERSON; MARTENS, 2013; BLAGODATSKAYA et al., 2003).

Nos últimos anos outros trabalhos reforçaram a importância relativa da BMS na formação da MOS. Cleveland et al. (2014), ao estudarem interações entre comunidades microbianas e decomposição de resíduos vegetais, observaram que, apesar da maior parte das taxas de decomposição ter sido explicada pela qualidade do resíduo vegetal (64%), uma proporção de 25% foi explicada por diferenças na comunidade microbiana. No entanto, conforme revisão de Gleixner (2013), embora o “pool” de MOS mais estável seja referido majoritariamente pela recalcitrância do resíduo vegetal, novos resultados, obtidos do estudo de características isotópicas de compostos orgânicos específicos, sugerem que a origem é predominantemente microbiana.

Nos estudos da MOS em sistemas de sucessão e rotação de culturas, outra possibilidade é a determinação de isótopo ¹³C no solo, que possibilita estimar, através de cálculos de proporção, ou por modelos, a contribuição relativa das

culturas envolvidas através de diferenças entre plantas de ciclo fotossintético C₃ e C₄. Isto é possível em determinadas condições de manejo, conhecendo-se estoque de C e a proporção de ¹³C na condição original do solo, e as proporções de ¹³C nas plantas estudadas (CERRI et al., 1985; CADISCH; GILLER, 1995). O uso de técnicas envolvendo ¹⁴C também é empregado em estudos de dinâmica da MOS (SIX; JASTROW, 2002).

O carbono orgânico dissolvido ou solúvel em água (CSA) é reconhecido como uma fração lábil, sendo muito reativa no solo, visto que reflete a fase inicial da degradação da MOS. Esta fração corresponde a compostos de C de cadeia aberta, e é prontamente disponível à decomposição pela biomassa microbiana do solo (LIANG et al., 1998). No solo, o CSA combina-se às superfícies de troca dos minerais do solo, atuando nos processos iônicos e na ciclagem de nutrientes (RANGEL et al., 2008). Além de ser considerada a fração mais biodegradável da MOS, é uma importante fonte de C para os microrganismos (MARSCHNER; KALBITZ, 2003; KARAVANOVA, 2013). Há métodos descritos para determinação de COS em amostras frescas (GHANI et al., 2003) e secas (MENDONÇA; MATOS, 2005).

Em decorrência de suas características físico-químicas, a MOS também influencia as propriedades físicas do solo. A agregação do solo, dimensionada na proporção de agregados de maior diâmetro, no diâmetro médio ponderado (DMP), no diâmetro médio geométrico (DMG) e no índice de estabilidade de agregados (IEA) é geralmente favorecida em teores maiores de MOS (SALTON et al., 2008; WOHLLENBERG et al., 2004). Entre os mecanismos envolvidos na agregação, a formação de pontes catiônicas, a cimentação entre partículas e a estabilidade promovida por exsudatos radiculares e microbianos ao redor e dentro de agregados são alguns dos efeitos relacionados à formação de macroagregados estáveis (STEVENSON, 1994; BRAIDA et al., 2011).

4.3. Estratégias de manejo do solo para aumentar o teor de matéria orgânica

Tem sido recorrente a preocupação em garantir-se a sustentabilidade da agricultura, ao mesmo tempo em que esta apresente produtividade que acompanhe as necessidades de uma demanda grande e crescente. Neste contexto, a conservação da qualidade dos solos agrícolas é elementar, estando relacionada à

minimização de impactos ambientais e a um melhor crescimento e desenvolvimento das plantas e, assim, à produtividade das culturas. O manejo conservacionista do solo constitui-se na melhor estratégia para evitar perda de matéria orgânica do solo. Em sistemas de produção agrícolas, estratégias amplamente utilizadas para aumentar o teor de matéria orgânica no perfil do solo envolvem o uso de Sistema Semeadura Direta (SSD) e, dentro deste sistema, o uso de diferentes espécies vegetais na composição de rotações de culturas.

4.3.1. Sistema Semeadura Direta

Entre as medidas conservacionistas da qualidade do solo, o Sistema Semeadura Direta (SSD) tem sido muito utilizado e estudado na agricultura brasileira, tendo sua área estimada superado 30 milhões de hectares (FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PLATA - FEBRAPDP, 2014). Vários benefícios têm sido verificados a partir do uso do SSD em comparação ao sistema convencional de preparo do solo com grades ou arados, como a redução da erosão (BERTOL et al., 1997; SHICK et al., 2000), a maior retenção da umidade do solo (SALTON; MIELNICZUK, 1995), a preservação da agregação do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997) e o aumento da capacidade de troca catiônica do solo (CIOTTA et al., 2003).

O sequestro de carbono pela agricultura, com a finalidade de mitigação de gases de efeito estufa da atmosfera, tem sido alvo de estudos e discussões nos últimos anos, como um possível dreno das grandes quantidades emitidas através da queima de combustíveis fósseis (LAL, 2001). A condução de sistemas conservacionistas como o SSD, com espécies vegetais com grande capacidade fotossintética e de produção de resíduos é um possível mecanismo de dreno do carbono (C) atmosférico para o solo. A alteração nos estoques de C orgânico no solo é um procedimento indicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas para realização de inventários das emissões de CO₂ na agricultura (IPCC, 2007).

O estoque de matéria orgânica é resultante do balanço entre entradas e saídas de carbono dentro do solo (DAVIDSON; JANSSENS, 2006). No SSD, o carbono incorporado aos tecidos vegetais através da fotossíntese tem sua velocidade de decomposição reduzida, devido ao revolvimento do solo ausente ou mínimo. Além disso, os agregados do solo não são rompidos, preservando a matéria orgânica no seu interior,

evitando assim sua deterioração por microorganismos. A formação de cobertura morta favorece a manutenção e o aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo (BALESDENT et al., 2000; BAYER; SCHNEIDER, 1999; COSTA et al., 2004). A deposição de grandes quantidades de resíduos e o não revolvimento resultam no acúmulo de palhada e na reduzida taxa de decomposição, contribuindo para diminuir as perdas de CO₂, favorecendo o acúmulo de MOS (BAYER et al., 2000; COSTA et al., 2008).

Em SSD, em decorrência do não revolvimento, há uma diminuição na proporção de estruturas recalcitrantes, principalmente aromáticas, na MOS, reduzindo-se o seu grau de humificação, devido ao incremento relativo de matéria orgânica particulada proveniente dos resíduos culturais (SEGNINI et al., 2013; FAVORETTO et al., 2008; CAMPOS et al., 2011).

Bayer et al. (2006) estudaram o potencial de sequestro de carbono por diferentes sistemas de preparo do solo em um experimento de 5 anos em áreas produtoras de grãos no cerrado brasileiro, em Luiziana/GO e Costa Rica/MS, tendo constatado no tratamento sem revolvimento aumentos no estoque de carbono do solo de 2,4 e 3,0 Mg ha⁻¹, respectivamente, em relação ao sistema de preparo convencional. Sá et al. (2001) verificaram comportamento semelhante na região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, ao avaliarem que a média de carbono orgânico do solo foi superior em Sistema Semeadura Direta de 20 e 22 anos em relação ao sistema de preparo convencional, nas camadas de 0-2,5 e 2,5-5,0 cm, o que está associado a um maior sequestro de C atmosférico.

4.3.2. Quantidade e qualidade de fitomassa em rotações de culturas

O aumento do teor de carbono orgânico no solo é dependente do aporte de biomassa e da qualidade do resíduo adicionado.

A partir da fitomassa adicionada no solo é produzida a matéria orgânica, sendo necessário um aporte satisfatório de resíduos para aumentar ou evitar perdas de seu estoque no solo. Bayer et al. (2000) demonstraram a importância da produção de fitomassa das plantas constituintes dos sistemas na definição dos estoques de carbono orgânico total (COT) em SSD. Em um solo descoberto, com adição anual de 0,66 Mg ha⁻¹ de C via resíduo vegetal de plantas espontâneas (invasoras), os autores estimaram,

para um período de 100 anos, que após uma perda de $22,55 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C desde o início da adoção deste manejo, o estoque de COT se estabilizaria em 10 Mg ha^{-1} na camada de 0-17,5 cm. Já em um sistema de culturas constituído de guandu + milho, com adição anual de $8,89 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C, o estoque estável de C nesta camada foi estimado para $61,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ para esta mesma simulação de 100 anos, representando um acúmulo de $28,83 \text{ Mg ha}^{-1}$ em relação ao estoque no início do manejo, comprovando assim que a adoção do SSD de forma isolada, sem levar em consideração a adoção de sistemas de culturas com satisfatório aporte de resíduos, não é solução para eliminar perdas de C do solo.

Assim como a quantidade de fitomassa adicionada, a qualidade dos resíduos das plantas em rotação influencia o estoque e a qualidade da MOS (JOHNSON et al., 2007). Valores utilizados para avaliação da decomposição de resíduos vegetais incluem os teores de celulose, hemicelulose, lignina e taninos. Dentro de uma mesma região climática, as relações de celulose e lignina com N são utilizadas como referência da velocidade de decomposição (KÖGEL-KNABNER, 2002).

Dados de relação C/N e lignina/N indicam menor ou maior recalcitrância do material. Maiores valores de relação C/N e de lignina/N são conhecidos por aumentarem a resistência do material à decomposição e à mineralização de N (FREI, 2013), embora nem sempre isso tenha sido verificado (JENSEN et al., 2005). Um outro fator é a facilidade de acesso ao resíduo pelos microorganismos. É relatada maior dificuldade de acesso aos resíduos de raízes do que aqueles de parte aérea, o que é atribuído à maior proteção dos resíduos radiculares no interior dos agregados e à maior relação lignina/N das raízes (BOLINDER et al., 1999; KÄTTERER et al., 2011). Amin et al. (2014), ao estudarem decomposição de folhas e raízes de milho, verificaram que microorganismos decompositores exibiram um rápido crescimento inicial na presença de resíduos de melhor qualidade (folhas) e produziram enzimas que não são eficientes na degradação de paredes celulares recalcitrantes, enquanto na presença de raízes, mais recalcitrantes, a biomassa microbiana aumentou mais lentamente, mas produziu enzimas de maior eficiência. Os autores concluíram que a qualidade do resíduo pode pré-selecionar a comunidade microbiana, regulando a quantidade e os tipos de enzimas produzidas de acordo com a complexidade da composição da parede celular das plantas residuais.

O emprego de plantas leguminosas de cobertura em SSD ou pastagens, ao possibilitar a fixação simbiótica de nitrogênio, pode estimular a produção de fitomassa das culturas seguintes e beneficiar a atividade microbiana do solo, contribuindo

para o incremento de MOS. Este efeito pode ser potencializado quando em rotação com gramíneas com elevada eficiência fotossintética, produtoras de grande quantidade de fitomassa, que serve como material de origem para a formação de MOS (PEOPLES; BALDOCK, 2001; LOVATO et al., 2004). A menor persistência da palha de plantas leguminosas (CALONEGO et al., 2012; AMADO et al., 2000) sugere que estas não são as ideais para manter o solo constantemente coberto, reforçando as recomendações de que podem ser melhor aproveitadas em rotações com gramíneas.

A adoção de sistemas consorciados em SSD possibilita, ao mesmo tempo, a produção de grãos e o acúmulo de carbono orgânico no solo (SILVA et al., 2011). Em integração lavoura-pecuária, o consórcio, além de viabilizar simultaneamente a produção de grãos e forrageiras, é uma estratégia de conservação do solo (KLUTHCOUSKI et al., 2000).

Pastagens, quando bem manejadas, acumulam grande quantidade de matéria orgânica. Geralmente, as plantas forrageiras apresentam grande capacidade de rebrota, o que pode ser aproveitado para aumentar o estoque de MOS. Sistemas de rotação que envolvam, intercaladas no tempo, pastagens e culturas anuais são outras opções, pois os benefícios provenientes do pasto bem manejado sobre o solo podem contribuir para um melhor desempenho das culturas seguintes e evitar e/ou minimizar perdas na qualidade do solo (NICOLOSO et al., 2008). Salton et al. (2011) observaram que sistemas com pastagens de gramíneas, em comparação aos exclusivamente com lavouras, apresentaram maiores teores de C no solo, o que foi associado ao elevado aporte de material vegetal comumente proporcionado pelas pastagens. Segnini (2007) verificou na região de São Carlos, SP, em um experimento conduzido por 27 anos, que áreas de pastagens com *Brachiaria decumbens* apresentaram estoques de carbono no solo, até a profundidade de 1,0 m no perfil, entre 25% a 40% superiores à área natural de cerradão da região, ressaltando a importância das gramíneas no aumento do sequestro de carbono, e indicando o alto potencial de sequestro de carbono por pastagens bem manejadas de *Brachiaria decumbens*, que também foi favorecido com a adição de nitrogênio no solo. Ao determinar o grau de humificação da MOS através do método de fluorescência induzida a laser, houve sob pastagem uma diminuição no grau de humificação em comparação à área de cerradão, atribuída à maior presença de matéria orgânica lábil nos tratamentos de pastagens, com maior aporte de resíduos.

O estudo da qualidade da matéria orgânica em rotações de culturas sob SSD pode fornecer importantes informações sobre as condições de estabilidade do sistema. Tendo-se em vista a grande diversidade de plantas cultivadas, é desejável que se conheça, em cada ambiente de produção, a contribuição das culturas e/ou sistemas que mais favoreçam, em seu equilíbrio dinâmico, o acúmulo de MOS, constituindo-se em uma ferramenta de manejo agrícola para que se tenha no solo, a médio e longo prazo, um reservatório estável e menos sujeito à decomposição e à emissão para atmosfera em estado gasoso.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Caracterização e localização das áreas experimentais

Os experimentos foram realizados nas safras agrícolas 2011/2012 e 2012/2013, em áreas manejadas em SSD por no mínimo oito anos, na Fazenda Experimental Lageado da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), em Botucatu/SP, localizadas a 22°49'S de latitude, 48°25' W de longitude e altitude de 786 m. Os solos das duas áreas são classificados como Latossolo Vermelho distroférico, de textura argilosa (experimento I) e Nitossolo Vermelho distroférico (experimento II), de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2006).

O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, ou seja, mesotérmico com inverno seco. A estação seca é bem definida e ocorre entre os meses de maio a setembro. A precipitação média anual é de aproximadamente 1514 mm, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio entre 3 e 18°C (CUNHA; MARTINS, 2009). Valores diários de temperaturas mínimas e máximas e de precipitações, referentes ao período de condução dos experimentos, estão representados

na figura 1 e foram obtidos da estação agrometeorológica da FCA, distante 3 km das áreas experimentais.

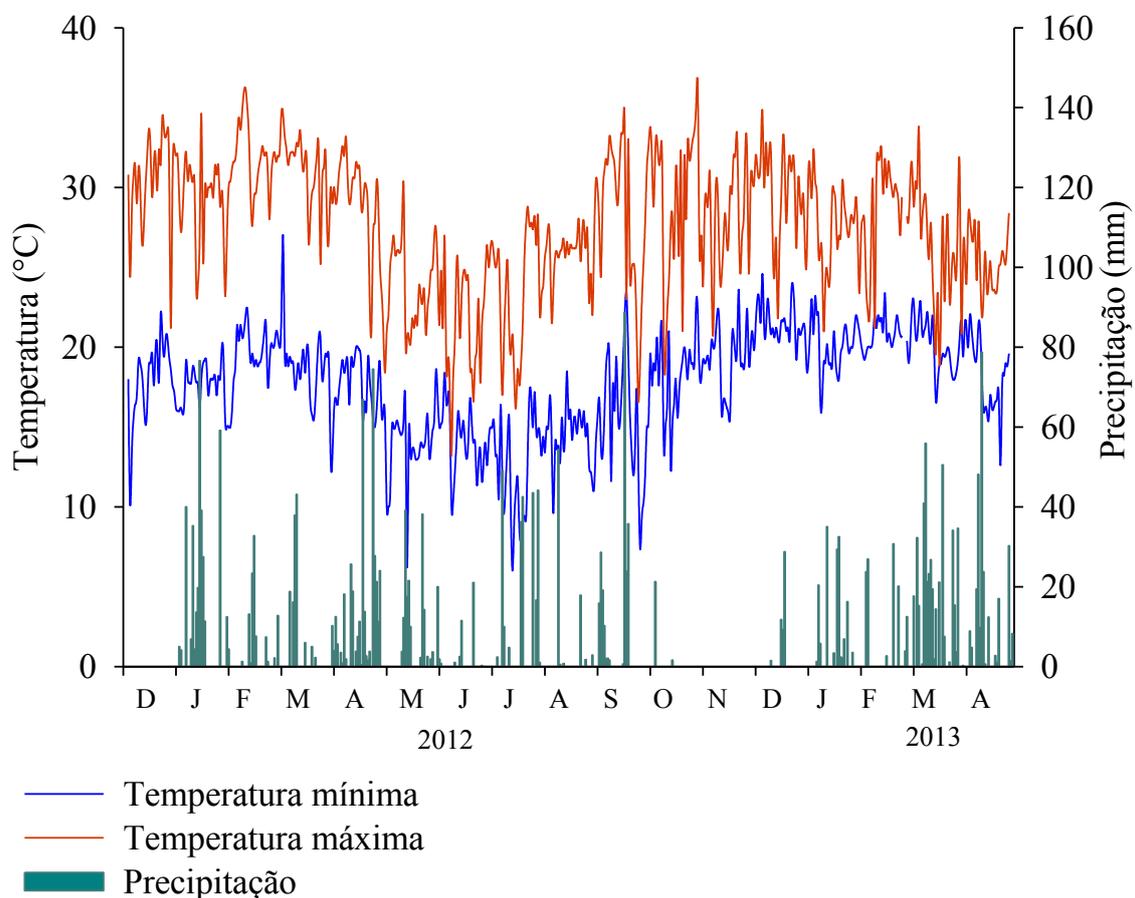


Figura 1. Precipitação e temperaturas mínima e máxima diárias entre dezembro de 2011 e abril de 2013, na fazenda experimental Lageado (FCA/UNESP). Botucatu, SP.

5.2. Experimento I

5.2.1. Histórico das rotações de culturas

A área foi conduzida entre os anos de 2001 e 2005 em SSD, com a sucessão soja/aveia-preta. Em 2006, iniciou-se um novo experimento envolvendo rotações de culturas em SSD, incluindo-se plantas de cobertura e consórcio. Desde então, têm sido

cultivados o sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), a braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis* (R. Germ. & C. M. Evrard) Crins) e o consórcio entre ambas no outono/inverno; o milho (*Pennisetum glaucum* L.), a crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.) e o sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) na primavera; e a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no verão, sendo esta última conduzida em toda a área. Nos anos de 2006, 2007 e 2008 o sorgo forrageiro foi substituído pelo cober crop (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* Piper Stapf) como planta de cobertura na primavera.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram representadas pelas culturas de outono/inverno (braquiária, sorgo granífero e sorgo granífero + braquiária) e as subparcelas pelas de primavera (milho, crotalária e sorgo forrageiro). As parcelas apresentaram dimensões de 30 x 5 m, ao passo que as subparcelas 10 x 5 m. Entre as subparcelas foram delimitados carregadores de 2 m de largura.

Uma área de mata nativa, distante 300 m do experimento I, foi adotada com referência.

5.2.2. Condução do experimento

5.2.2.1. Cultura da soja na safra 2011/2012

A soja foi semeada em 12/12/2011, por meio da semeadora-adubadora Semeato[®] (Personale-Drill) de fluxo contínuo, em espaçamento de 0,45 m, com população de semeadura de 355 mil sementes ha⁻¹. Foi utilizada a cultivar Dow Agrosciences 5D688 RR, de ciclo semiprecoce. As sementes foram tratadas com fungicida Carboxin + Thiran e inoculante (*Bradyrhizobium* sp.). A adubação de semeadura foi realizada com 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de cloreto de potássio e superfosfato triplo, respectivamente.

Foi realizada aplicação do herbicida Glyphosate em 12/01/2012, para o controle de plantas daninhas. Para o controle de pragas, na mesma data foi aplicado o inseticida Lufenuron e, posteriormente, em 08/02/2012, 29/02/2012 e 28/03/2012, os inseticidas Tiamexotam, Metamidofós e Acefato, respectivamente. Visando ao controle de doenças, nessas datas também foram aplicados os fungicidas Pyraclostrobin +

Epoxiconazol, Azoxystrobin + Cyproconazol e Pyraclostrobin + Epoxiconazol, respectivamente.

A colheita foi realizada manualmente em 13/04/2012, através de 6 sub-amostragens de 1 m de comprimento por unidade experimental, correspondendo a uma área de 2,7 m². As plantas colhidas foram trilhadas mecanicamente, procedendo-se a pesagem de grãos em seguida. A umidade foi ajustada para 13% e os valores convertidos em kg ha⁻¹. O restante da área experimental foi colhido com colhedora automotriz.

5.2.2.2. Culturas de outono/inverno de 2012

Em 27/04/2012 foi realizada a semeadura da braquiária ruziziensis e do sorgo granífero (cultivar AG 1080), com espaçamentos entre linhas de 0,17 e 0,34 m, respectivamente, através da semeadora-adubadora de fluxo contínuo Semeato® (Personale-Drill), sem a utilização de adubação. Foram utilizados 22 e 11 kg ha⁻¹ de sementes, respectivamente. Para o consórcio, foram utilizados os mesmos espaçamentos e quantidades de sementes, sendo as sementes de braquiária depositadas na caixa de adubo da semeadora e distribuídas na mesma linha de semeadura do sorgo granífero.

O controle de plantas invasoras foi realizado em 22/05/2012, mediante aplicação do herbicida 2,4-D. O sorgo granífero foi colhido com colhedora automotriz em 26/09/2012. A dessecação foi realizada em 10/10/2012, através da aplicação do herbicida Glyphosate.

5.2.2.3. Culturas de primavera de 2012

As culturas de primavera foram semeadas em 17/10/2012, utilizando-se a mesma semeadora-adubadora já descrita, sem adubação e com espaçamento de 0,17 m entre linhas.

Foram utilizados 25 kg ha⁻¹ de sementes de milho cultivar ADR-300, 30 kg ha⁻¹ de sementes de crotalaria júncea cultivar IAC-KR1 e 15 kg ha⁻¹ de sementes de sorgo forrageiro cultivar Silotec-20. Em 03/12/2011, por ocasião do florescimento, as plantas foram manejadas quimicamente com aplicação de Glyphosate.

5.2.2.4. Cultura da soja na safra 2012/2013

A soja da safra 2012/2013 foi semeada em 05/12/2012, mecanicamente através da semeadora já descrita no item 5.2.2.1. Foi utilizada a cultivar Monsoy M7211 RR. O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m e a população de 445 mil sementes ha⁻¹. As sementes foram tratadas com fungicida Carboxin + Thiran, inseticida Thiamethoxam e inoculante (*Bradyrhizobium* sp.). Durante a semeadura, também foi realizada adubação com 250 kg ha⁻¹ do formulado 0-20-20.

O controle de plantas daninhas com herbicida foi realizado em 09/01/2013, mediante aplicação de Glyphosate. Os controles de pragas e doenças foram realizados em 06/02/2013 pela pulverização do inseticida Lambda-cialotrina + Thiamethoxam e do fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol; em 25/02/2013, aplicando-se o inseticida Metomil e o fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol; em 01/03/2013 por meio da aplicação dos inseticidas Lambda-cialotrina + Thiamethoxam e Clorantranilprole e do fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol; e em 09/04/2013 com inseticida Lambda-cialotrina + Thiamethoxam. Nesta última, também foi aplicado o herbicida dessecante Paraquat.

A colheita foi realizada em 16/04/2013 com colhedora de parcelas, em 6 linhas de 4 m na área útil de cada parcela, totalizando 10,8 m². Os grãos foram pesados e a produtividade foi convertida em kg ha⁻¹, após correção da umidade para 13%.

5.3. Experimento II

5.3.1. Histórico da área e rotações de culturas

A área foi conduzida em SSD entre os anos de 1997 e 2002 com a rotação soja/aveia-preta/milho/triticale. A partir de 2003 iniciou-se um experimento com diferentes rotações de culturas envolvendo plantas de cobertura. O triticale (*X Triticosecale* Wittmack) e o girassol (*Helianthus annuus* L.) têm sido cultivados no outono/inverno. Após a colheita da safra de outono/inverno e com início das primeiras chuvas de primavera têm sido cultivadas as espécies de cobertura milheto (*Pennisetum*

glaucum L.), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), para produção de palhada, antecedendo a soja no verão (*Glycine max* L. (Merrill)). São conduzidas também na primavera unidades sem o cultivo de plantas de cobertura (pousio), em que foram realizadas escarificações em outubro de 2003 e 2009.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram representadas pelas plantas cultivadas no outono/inverno (girassol e triticale), e as subparcelas pelas culturas na primavera (milheto, crotalária e sorgo forrageiro, além do pousio escarificado). As dimensões da área das parcelas foram de 32 x 5 m, enquanto as subparcelas foram delimitadas em áreas de 8 x 5 m. Carreadores de 4 m foram locados entre os blocos, parcelas e subparcelas. Os carreadores foram semeados e considerados como bordaduras.

5.3.2. Condução do experimento

5.3.2.1. Cultura da soja na safra 2011/2012

Foi semeada, em 12/12/2011, a cultivar de soja Dow Agrosiences 5D688 RR, de ciclo semiprecoce, por meio da semeadora-adubadora Semeato[®] (Personale-Drill) de fluxo contínuo em espaçamento entre linhas de 0,45 m, com população de semeadura de 355 mil sementes ha⁻¹. As sementes foram tratadas com fungicida Carboxin + Thiran e inoculante (*Bradyrhizobium* sp.). A adubação de semeadura foi realizada com 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de cloreto de potássio e superfosfato triplo, respectivamente.

Foi realizado o controle de plantas daninhas por meio do herbicida Glyphosate em 12/01/2012, e na mesma data foi aplicado o inseticida Lufenuron. Em 08/02/2012, 29/02/2012 e 28/03/2012 foram aplicados os inseticidas Tiamexotam, Metamidofós e Acefato, respectivamente. Nas mesmas datas, foram aplicados os fungicidas Pyraclostrobin + Epoxiconazol, Azoxystrobin + Cyproconazol e Pyraclostrobin + Epoxiconazol, respectivamente.

A colheita foi realizada manualmente, através de 6 sub amostragens de 1 m de comprimento, perfazendo uma área de 2,7 m², no dia 13/04/2012. As amostras foram trilhadas mecanicamente. O restante da soja na área experimental foi colhido com

colhedora automotriz. As amostras foram pesadas e a produtividade foi calculada em kg ha⁻¹, após correção da umidade para 13%.

5.3.2.2. Culturas de outono/inverno de 2012

O triticale (IPR 111) e o girassol (Catissol) foram semeados em 25/04/2012, nos espaçamentos 0,17 e 0,51 m, respectivamente, por meio da semeadora descrita no item 5.3.2.1, sem adubação, utilizando-se para o triticale 165 kg ha⁻¹ de sementes e para o girassol 22 kg ha⁻¹. A colheita foi realizada em setembro com colhedora automotriz.

5.3.2.3. Culturas de primavera de 2012

Foram semeadas as culturas de milho (ADR-300), sorgo forrageiro (Silotec-20) e crotalária júncea (IAC-KR1) no dia 17/10/2012, sem a aplicação de fertilizantes. Foi utilizada a mesma semeadora já descrita, com o espaçamento entre linhas de 0,17 m, exceto nas áreas de pousio, onde não foi realizada a semeadura. O manejo foi o mesmo descrito no item 5.2.2.3.

5.3.2.4. Cultura da soja na safra 2012/2013

A cultivar de soja Monsoy M7211 RR foi semeada em 05/12/2012 por meio da semeadora já descrita no item 5.3.2.1, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, com população de 445 mil sementes ha⁻¹. As sementes foram tratadas com fungicida Carboxin + Thiran, inseticida Thiamethoxam e inoculante (*Bradyrhizobium* sp.). Durante a semeadura foi realizada adubação com 250 kg ha⁻¹ do formulado 0-20-20.

Foi realizada aplicação de herbicida Glyphosate em 09/01/2013 para o controle das plantas daninhas. Para o controle de pragas e insetos foram realizadas aplicações em 06/02/2013, do inseticida Lambda-cialotrina + Thiamethoxam e do fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol; em 25/02/2013, do inseticida Metomil e do

fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol; em 01/03/2013, dos inseticidas Lambda-cialotrina + Thiamethoxam e Clorantraniliprole e do fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazol; e em 09/04/2013, do inseticida Lambda-cialotrina + Thiamethoxam. Na data da quarta aplicação, também foi aplicado o herbicida dessecante Paraquat.

A colheita foi realizada em 16/04/2013 por meio de colhedora de parcelas, em 6 linhas de 4 m na área útil de cada unidade experimental, totalizando 10,8 m², e o restante foi colhido com colhedora automotriz. As amostras foram pesadas e a produtividade foi calculada em kg ha⁻¹, após correção da umidade para 13%.

5.4. Massa de matéria seca de palha das culturas em rotação

Para fins de caracterização, foram coletadas amostras de palha após o cultivo da soja da safra 2011/2012, em 20/04/2012, do cultivo de outono/inverno de 2012, em 04/10/2012, e do cultivo das plantas de primavera, em 04/12/2012. As coletas foram realizadas por meio de um quadro de amostragem de dimensões 0,5 m x 0,5 m. As amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C até massa constante, procedendo-se em seguida mensuração da massa de matéria seca. As médias de massa de matéria seca de cada espécie nas áreas de Latossolo e Nitossolo estão apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Massa de matéria seca de palha das espécies vegetais no experimento I (Latossolo) no ano de 2012. Botucatu, SP.

Cultura	Matéria seca (Mg ha ⁻¹)	Data de coleta
Soja	3,27	20/04/2012
Braquiária ruziziensis	2,98	04/10/2012
Sorgo granífero	2,19	04/10/2012
Braquiária+Sorgo granífero	3,25	04/10/2012
Crotalária	5,95	04/12/2012
Milheto	5,12	04/12/2012
Sorgo forrageiro	5,57	04/12/2012

Tabela 2. Massa de matéria seca de palha das espécies vegetais no experimento II (Nitossolo) no ano de 2012. Botucatu, SP.

Cultura	Matéria seca (Mg ha ⁻¹)	Data de coleta
Soja	5,16	20/04/2012
Girassol	3,00	04/10/2012
Triticale	3,23	04/10/2012
Crotalária	5,46	04/12/2012
Milheto	5,13	04/12/2012
Sorgo forrageiro	4,66	04/12/2012

5.5. Caracterização química das espécies vegetais

Foi realizada, para fins de caracterização, a determinação dos teores de carbono, nitrogênio, celulose, hemicelulose e lignina nas plantas conduzidas nos dois experimentos, a partir de amostras coletadas no ano de 2012. As amostras de soja (palha) foram coletadas após a colheita, em abril. As amostras das culturas graníferas de outono/inverno foram coletadas antes da colheita de grãos. As plantas de cobertura de outono/inverno e de primavera foram coletadas em pré-florescimento, antes do manejo químico.

As coletas foram realizadas por meio de um quadro de amostragem de dimensões 0,5 m x 0,5 m, sendo posteriormente acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60° C até massa constante. As amostras foram moídas em moinhos elétricos tipo “Willey” com malha de 1 mm. As análises foram conduzidas a partir de amostras compostas homogeneizadas de cada espécie das duas áreas experimentais quando possível. Os teores de carbono e nitrogênio foram determinados em analisador elementar (LECO-TruSpec® CHNS). As análises dos teores de celulose, hemicelulose e lignina foram realizadas no Laboratório de Bromatologia da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da UNESP, Botucatu, SP, seguindo-se os procedimentos descritos por Silva e Queiroz (2002). Os resultados das análises de caracterização química das espécies vegetais são apresentados na tabela 3.

A partir dos dados de massa de matéria seca de palha e do teor de N determinado na análise de caracterização química, foi possível calcular a quantidade de nitrogênio das espécies vegetais para estimativa da entrada de N no sistema (tabela 4).

Tabela 3. Caracterização química das espécies nos sistemas de rotação de culturas. Botucatu, 2012.

Cultura	Hemicelulose	Celulose	Lignina	C	N	C/N	Lignina/N
	-----%-----						
Crotalária	11,9	33,8	14,9	44,70	2,86	16	5
Palhada de soja	12,0	44,6	30,4	45,30	0,75	61	41
Braquiária	27,5	24,0	10,1	44,48	2,44	18	4
Milheto	32,5	28,4	4,7	43,80	1,30	34	4
Sorgo forrageiro	34,7	35,4	5,4	46,25	0,87	53	6
Sorgo granífero	35,9	34,7	7,1	45,40	0,74	61	10
Triticale	20,0	49,2	17,3	45,10	0,47	96	37
Girassol	9,9	48,0	21,1	44,20	0,67	66	32

Tabela 4. Quantidade de nitrogênio das espécies vegetais em rotação calculada a partir da massa de matéria seca de palha nas áreas experimentais de Latossolo e Nitossolo. Botucatu, 2012.

Cultura	Quantidade de N	
	Latossolo	Nitossolo
	-----kg ha ⁻¹ -----	
Crotalária	170	156
Palhada de soja	24	39
Braquiária ruziziensis	73	-
Milheto	68	67
Sorgo forrageiro	48	40
Sorgo granífero	16	-
Triticale	-	15
Girassol	-	20

5.6. Coletas e análises de amostras de solos

Nas safras 2011/2012 e 2012/2013, amostras de solo foram coletadas a fim de se realizarem as análises de carbono orgânico total, nitrogênio total, grau de humificação por fluorescência induzida a laser (FIL), fracionamento físico da matéria orgânica, carbono da biomassa microbiana, nitrogênio da biomassa microbiana, carbono solúvel em água, carbono solúvel em água quente e agregados. Também foram

efetuadas análises químicas e mineralógicas de caracterização da área. Com exceção da análise de agregados, executada a partir de monólitos, em todas as outras análises foram utilizadas amostras de solo deformadas.

5.6.1. Coletas e armazenamento de amostras de solo deformadas

Os solos das duas áreas experimentais foram amostrados nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade em 16/04/2012 e 24/04/2013, após a colheita da soja, sendo coletadas três subamostras por unidade experimental (subparcelas). As subamostras foram homogeneizadas, formando-se amostras compostas. Também foram coletadas amostras da área de mata, adjacente à área experimental de Latossolo, como referência. As amostras foram coletadas com trados do tipo sonda, e acondicionadas em sacos plásticos no interior de caixas térmicas. Em seguida foram levadas para o laboratório.

As análises relativas à caracterização química e mineralógica das áreas e de determinação do grau de humificação por fluorescência induzida a laser (FIL) foram realizadas somente com amostras coletadas no ano de 2012. Em todas as demais análises efetuadas a partir de amostras deformadas (carbono orgânico total, nitrogênio total, fracionamento físico da MOS, carbono da biomassa microbiana, nitrogênio da biomassa microbiana, carbono solúvel em água e carbono solúvel em água quente) foram utilizadas somente aquelas coletadas em 2013.

As amostras destinadas às determinações de C e N da biomassa microbiana foram separadas em duas partes: parte de cada amostra foi submetida à determinação de umidade em estufa a 105°C e o restante armazenado em congelador a -20°C, no interior de sacos plásticos, por aproximadamente 3 meses, conforme Stenberg et al. (1998). Para fins de correção de umidade para a análise da biomassa microbiana, amostras nas duas áreas experimentais foram coletadas para caracterização da umidade na capacidade de campo através do método empírico descrito por Silva et al. (2007).

As amostras de solo destinadas às demais avaliações foram secas ao ar e em seguida encaminhadas para análise.

5.6.2. Análises de caracterização química, granulométrica e mineralógica

Parte do solo coletado no ano de 2012 foi submetida, somente para fins de caracterização, às análises química, granulométrica e mineralógica. As análises química e granulométrica foram realizadas no Laboratório de Relações Solo-Planta, da FCA/UNESP, em Botucatu, enquanto a identificação mineralógica executada no Laboratório de Mineralogia do Solo ARGILAB, da ESALQ/USP. Para estas análises, foram utilizadas amostras compostas contendo solo de todos os tratamentos, nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Nas análises químicas foram adotados os métodos de Raij et al. (2001) e para as granulométricas as recomendações de Embrapa (1997). Nas tabelas 5 e 6 estão apresentadas as análises químicas e os teores de argila, silte e areia das áreas de Latossolo e Nitossolo, respectivamente. Nas figuras 1 e 2 estão os resultados da identificação de minerais (filossilicatos e óxidos) na fração argila nas áreas de Latossolo e Nitossolo, respectivamente. Esta última análise foi efetuada através de difratometria de raios X (MOORE; REYNOLDS 1997).

Tabela 5. Caracterização química e granulométrica do solo no experimento I (Latossolo). Botucatu, 2012.

Profundidade (m)	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Al _{trocável} -----mmol _c dm ⁻³ -----	H+Al	Ca	Mg	K	V %	Areia	Argila	Silte
									-----g kg ⁻¹ -----		
0-0,10	5,2	15	1	27	57	24	1,0	75	501	405	95
0,10-0,20	4,7	12	2	40	34	16	0,7	56	475	455	71
0,20-0,40	4,1	7	8	62	20	11	0,5	33	413	505	82
0,40-0,60	3,8	6	17	99	12	8	0,4	17	375	505	120

Tabela 6. Caracterização química e granulométrica do solo no experimento II (Nitossolo). Botucatu, 2012.

Profundidade (m)	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Al _{trocável} -----mmol _c dm ⁻³ -----	H+Al	Ca	Mg	K	V %	Areia	Argila	Silte
									-----g kg ⁻¹ -----		
0-0,10	4,9	33	2	54	71	34	3,2	66	108	655	238
0,10-0,20	4,4	12	7	75	32	12	1,3	37	100	655	245
0,20-0,40	4,2	21	9	93	31	14	2,2	33	84	705	211
0,40-0,60	4,3	11	12	102	35	12	0,7	32	66	730	204

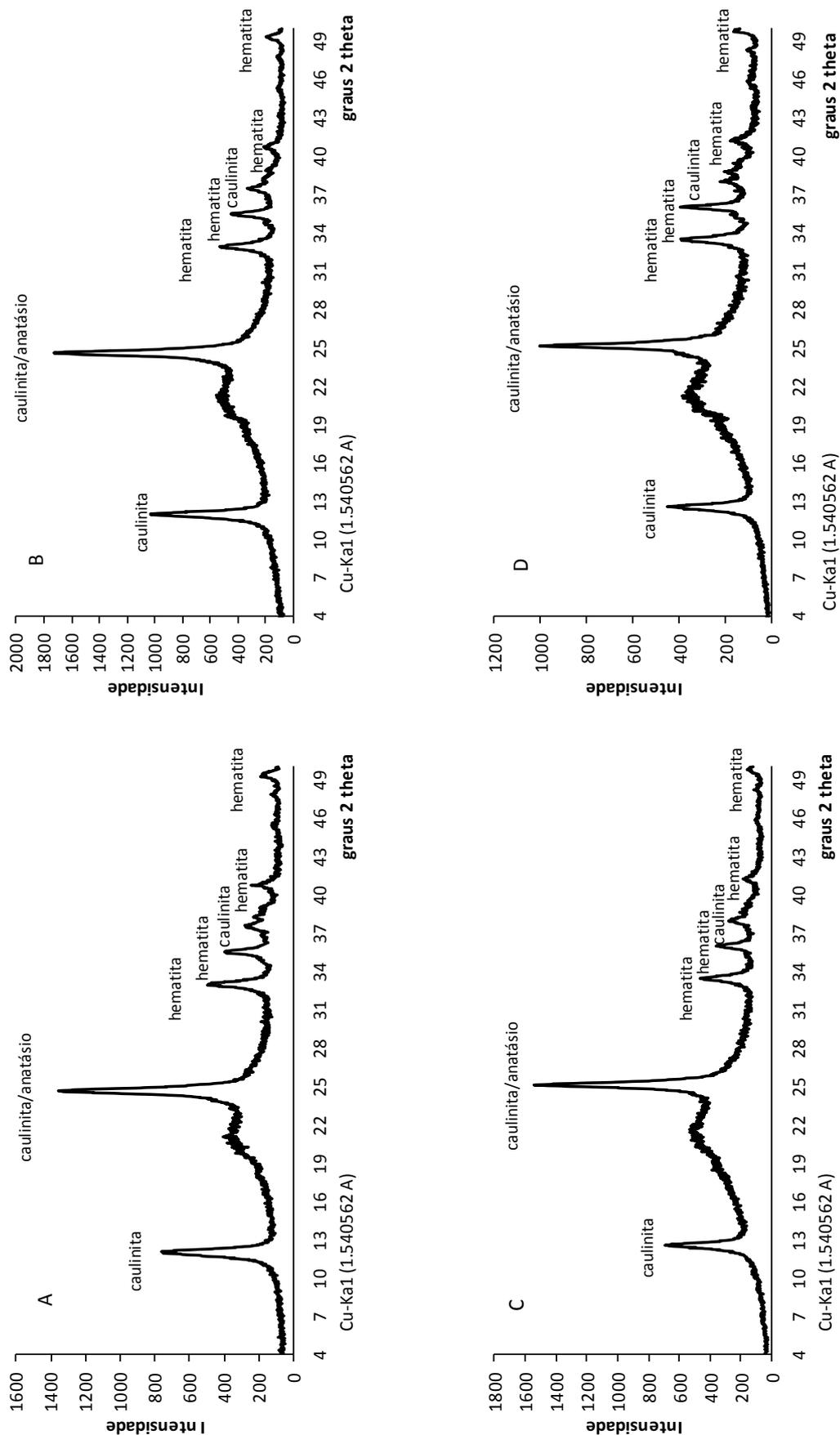


Figura 2. Identificação, no solo do experimento I (Latossolo), de minerais (filossilicatos e óxidos) na fração argila por difratometria de Raios X, com fração argila saturada com magnésio e atmosfera de etileno-glicol. A, B, C e D correspondem às camadas de 0-0,10 m (A); 0,10-0,20 m (B); 0,20-0,40 m (C) e 0,40-0,60 m (D), respectivamente.

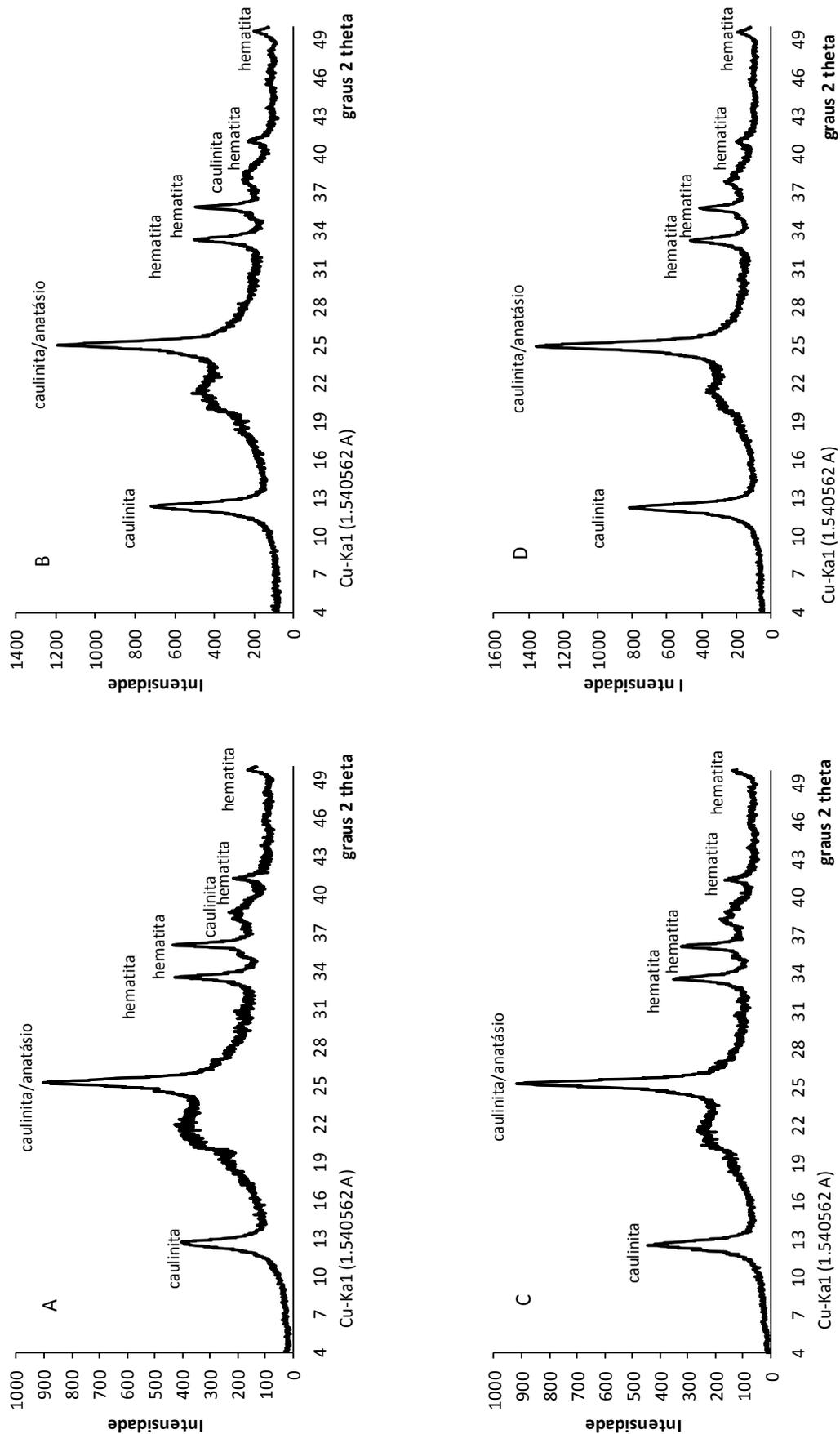


Figura 3. Identificação, no solo do experimento II (Nitossolo), de minerais (filossilicatos e óxidos) na fração argila por difratometria de Raios X, com fração argila saturada com magnésio e atmosfera de etileno-glicol. A, B, C e D correspondem às camadas de 0-0,10 m (A); 0,10-0,20 m (B); 0,20-0,40 m (C) e 0,40-0,60 m (D), respectivamente.

De acordo com as avaliações de caracterização do solo (tabelas 5 e 6), os dois solos, embora sejam química e morfológicamente muito diferentes, apresentam comportamento semelhante quanto ao pH na camada superficial, de aproximadamente 5,0; com sua queda nas camadas seguintes, o que pode ser notado também pelo aumento da acidez potencial nas camadas mais profundas. Pode-se notar também que o solo do experimento I apresenta menor capacidade de torça catiônica potencial em comparação ao solo do experimento II nas quatro camadas. A diferença mais facilmente perceptível é a de textura: o solo da área I apresenta solo de textura argilosa e teores de areia superiores a 30%, enquanto no solo do experimento II a textura é muito argilosa, com teor de argila sempre superior a 60%, e teor de areia não ultrapassando 11%. Percebe-se no solo I um nítido comportamento de aumento de teor de argila nas camadas mais profundas, sobretudo em 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em que há um aumento de 10% em relação à camada de 0-0,10 m. Quanto aos silicatos e óxidos de ferro e alumínio, os solos apresentaram composição semelhante (figuras 2 e 3), não tendo sido identificados silicatos do tipo 2:1 na área de Nitossolo.

5.6.3. Análises de carbono orgânico total e nitrogênio total do solo

Foram analisados os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) somente no solo coletado em 2013, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade, no Laboratório de Relações Solo-Planta da FCA/UNESP, em Botucatu, SP. Após a secagem ao ar, as amostras foram homogeneizadas com auxílio de um rolo de madeira, tamisadas em peneira de malha de 2 mm e, em seguida, submetidas às determinações de carbono e nitrogênio totais em analisador elementar automático modelo TruSpec™ CHNS, da LECO® (figura 4).

O princípio das análises de C e N em analisador elementar baseia-se na combustão da amostra em elevadas temperaturas (900-950°C), associada a um influxo de gás oxigênio. Todo o carbono é convertido em CO₂ e o nitrogênio em óxidos (NO_x). O CO₂ é mensurado em um detector infravermelho, ao passo que os óxidos de nitrogênio sofrem um processo de remoção de oxigênio, formando gás N₂. O nitrogênio é então quantificado através de condutividade térmica (LECO CORPORATION, 2011).



Figura 4. Analisador Elementar Modelo TruSpec™ CHNS - LECO®

5.6.4. Grau de humificação da matéria orgânica do solo

Realizou-se a determinação do grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (FIL), nas amostras de solo das camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade, sendo utilizadas somente aquelas coletadas no ano de 2012. Após serem secas ao ar, as amostras foram homogeneizadas, moídas em almofariz de porcelana e tamisadas em peneira de malha de 0,149 mm (100 Mesh). Uma parte foi encaminhada para a determinação do carbono orgânico total (COT) no analisador elementar descrito no item 5.6.3. Os resultados destas análises de COT foram utilizados somente para os cálculos de grau de humificação. A outra parte das amostras foi conduzida à Embrapa Instrumentação Agropecuária, em São Carlos, SP, onde se procederam a preparação e a determinação do grau de humificação por FIL (figura 5).

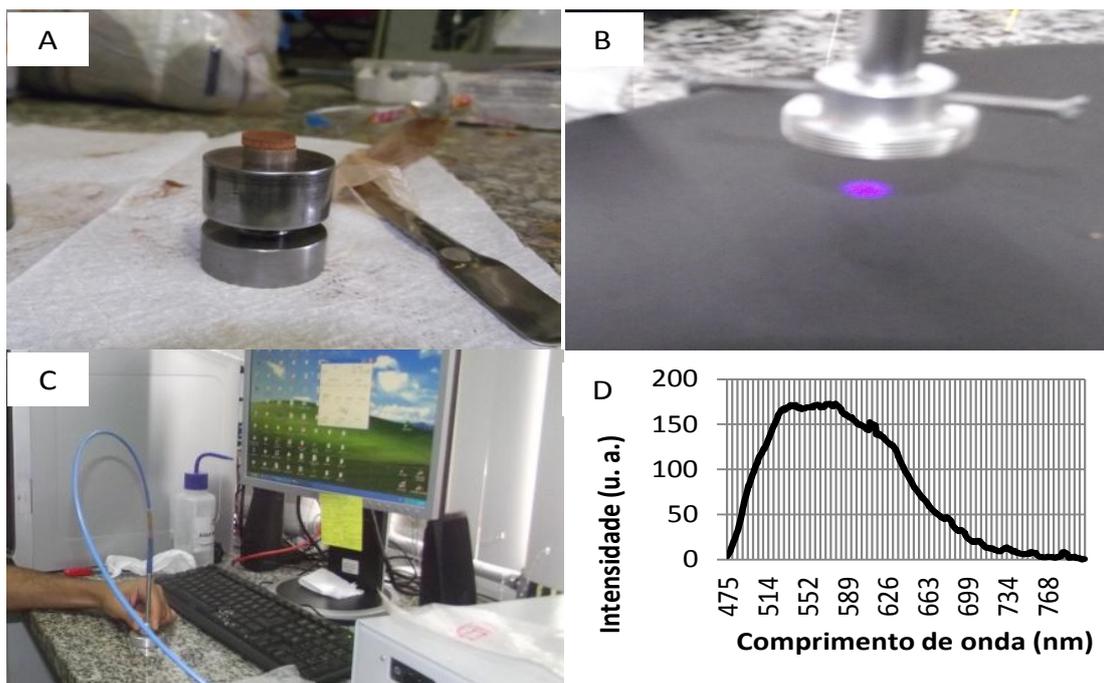


Figura 5. Determinação do grau de humificação por fluorescência induzida a laser: pastilha de solo após o processo de prensagem (A); emissão de laser no comprimento de 465 nm pelo equipamento (B); medição das intensidades de emissão de fluorescência das pastilhas de solo (C); curva de emissão fluorescência de uma pastilha de solo (D).

A preparação consistiu em um processo de compressão em uma prensa, a um peso equivalente a oito toneladas-força, por 90 segundos, de aproximadamente 0,5 g de solo distribuído em um pastilhador, para a produção de pastilhas circulares de faces planas, com 11 mm de diâmetro e espessura entre 1 e 2 mm (figura 5A). Foram preparadas duas pastilhas por unidade experimental, para condução das análises em duplicatas. Após a preparação, as pastilhas foram submetidas ao analisador de FIL, descrito por Milori et al. (2002a), e pertencente ao Laboratório de Ótica e Fotônica da Embrapa Instrumentação Agropecuária. O princípio do método baseia-se na excitação da pastilha com um laser de 465 nm, produzindo emissão de fluorescência, que é coletada por lentes convergentes e focalizada sobre a fenda de um monocromador (figuras 5B e 5C). Os sinais são então multiplicados por uma fotomultiplicadora, ajustados para sensibilidade máxima na região do visível e, em seguida, filtrados e amplificados por um amplificador “lock-in”. O funcionamento do sistema e a aquisição de dados são controlados por um software instalado em um computador (MILORI et al., 2006).

Em seguida, é produzido um espectro de emissão de fluorescência, representado por um gráfico ou curva, composto pelos comprimentos de onda emitidos no eixo das abscissas e as intensidades de emissão nas ordenadas (figura 5D).

As emissões de fluorescência são atribuídas à matéria orgânica humificada (MILORI et al., 2004; MILORI et al., 2006). Assim, a soma das emissões, correspondente à área sob a curva de emissão (ACF), fornece um valor proporcional à quantidade de matéria orgânica humificada. O grau de humificação (H_{FIL}) é calculado pela relação entre a área sob a curva de emissão de fluorescência e o teor de carbono orgânico total (MILORI et al., 2004). O valor é de interpretação qualitativa, não quantificando teor ou conteúdo, mas é representativo da proporção humificada do carbono orgânico total (equação 1):

$$H_{FIL} = \frac{ACF}{COT_{(mg\ kg^{-1})}} \quad (1)$$

Equação 1: H_{FIL} = grau de humificação; ACF = área abaixo da curva de emissão de fluorescência; COT = carbono orgânico total do solo, em $mg\ kg^{-1}$.

Foram realizadas duas análises por face de pastilha, totalizando oito análises, sendo considerada a média dos oito valores de área sob a curva de fluorescência como ACF da amostra. Posteriormente, foram calculados os valores de H_{FIL} .

5.6.5. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O fracionamento físico da matéria orgânica foi realizado nas amostras coletadas no ano de 2013, nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, no Laboratório de Relações Solo-Planta da FCA/UNESP, Botucatu, SP.

Procedeu-se o fracionamento granulométrico, adaptado de Cambardella e Elliott (1992). O princípio do método consiste em separar o carbono orgânico do solo em duas frações: carbono orgânico particulado (COP), menos decomposto e mais recentemente depositado no solo, e carbono associado a minerais (COM), mais recalcitrante e humificado.

Foram pesados 20 gramas de solo seco ao ar tamisados em malha de 2 mm em copos de polietileno de 250 mL e adicionados 80 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio $5\ g\ L^{-1}$. Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, passadas por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e

enxaguadas várias vezes com água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de alumínio, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação de ar forçada a 50°C até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP), moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro, e submetido à determinação de C em analisador elementar, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COP) do solo, de acordo com a equação 2:

$$\text{COP} = \frac{\text{CFP} \cdot \text{MFP}}{\text{Ps}} \quad (2)$$

Equação 2: COP = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg⁻¹; CFP = teor de carbono da fração particulada, em g kg⁻¹; MFP = massa da fração particulada, em gramas; Ps = massa da amostra inicial do solo, em gramas (20 gramas).

O teor de carbono associado a minerais (COM) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total e o carbono orgânico particulado (equação 3):

$$\text{COM} = \text{COT} - \text{COP} \quad (3)$$

Equação 3: COM = teor de carbono orgânico associado a minerais no solo, em g kg⁻¹; COT = teor de carbono orgânico total do solo, em g kg⁻¹; COP = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg⁻¹.

5.6.6. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo

Para a determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) e do nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N_{BMS}) foram utilizadas somente amostras de solo coletadas no ano de 2013 na profundidade de 0-0,10 m. As análises foram conduzidas seguindo-se o método de irradiação-extração (ISLAM; WEIL, 1998; MEDONÇA; MATOS, 2005), no Laboratório de Relações Solo-Planta da FCA/UNESP, Botucatu, SP.

O método de irradiação-extração tem como princípio a irradiação das amostras de solo em forno de microondas, fornecendo energia eletromagnética que, ao ser absorvida, provoca a rotação das moléculas de água e a migração condutiva de íons dissolvidos em um campo eletromagnético, para gerar calor quase instantaneamente por fricção molecular. A alta temperatura e a pressão de vapor afetam a permeabilidade e a estabilidade da membrana plasmática de células microbianas, provocando a sua ruptura e liberando vários metabólitos intracelulares (ISLAM; WEIL, 1998). Em seguida, as amostras são submetidas a uma extração rápida, com K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, um extrator fraco, procedendo-se em sequência às determinações de C e N (BROOKES et al., 1985; VANCE et al., 1987).

O carbono da biomassa microbiana é calculado pela diferença entre o teor de C da mostra irradiada (C_I) e o teor de C da amostra não irradiada (C_{NI}). Analogamente, a diferença entre o nitrogênio de amostras irradiadas e não irradiadas fornece o N da biomassa microbiana. Os resultados destas subtrações são então multiplicados (ou divididos) por um fator de correção referente à eficiência do extrator para o método e o elemento quantificado.

Após o período de armazenamento, conforme descrição no item 5.6.1, as amostras foram retiradas do congelador e mantidas a 25°C até o equilíbrio com a temperatura ambiente, por cerca de 2 horas. Foram então peneiradas em malha de 2 mm e, em seguida, submetidas à padronização de umidade, acrescentando-se água com auxílio de uma pipeta: as amostras da área de Latossolo e Nitossolo foram corrigidas para 65% e 85% da umidade na capacidade de campo (CC), respectivamente. As amostras da mata nativa foram submetidas aos mesmos procedimentos adotados para as amostras da área de Latossolo. Na escolha destes valores foram considerados a umidade das amostras no momento de coleta em cada área, os valores de umidade recomendados pelos métodos de análise e a não necessidade de se secarem as amostras antes de umedecê-las novamente, para evitar variações bruscas na população microbiana. Como as umidades das amostras de Latossolo e de Nitossolo estavam na faixa de 59-63% e 78-84% da CC, respectivamente, optou-se por um valor de padronização de umidade diferente em cada área. Após a padronização de umidade, as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas em ambiente a 25°C em sacos plásticos vedados, para homogeneização da umidade e estabilização da atividade microbiana (GONÇALVES et al., 2002), iniciando-se a seguir os procedimentos de análise pelo método da irradiação-extração. Com exceção do tempo de

exposição à irradiação das amostras de Latossolo, em que foi adotado o método de Ferreira et al. (1999), todos os procedimentos de análise seguiram o método de Islam e Weil (1998) adaptado por Mendonça e Matos (2005). As análises foram conduzidas em duplicatas.

Foi pesado o equivalente a 20 gramas de solo seco em copos de polipropileno de 150 mL resistentes à exposição a forno de microondas. As amostras não irradiadas foram vedadas e permaneceram em repouso, enquanto as demais foram submetidas à irradiação. Utilizou-se um forno de microondas Electrolux MEX 55®, em potência real de 623 W, calculada a partir da variação da temperatura de 1L de água após 2 minutos de irradiação. Procedeu-se a irradiação de uma amostra por vez, através do seguinte procedimento, recomendado por Islam e Weil (1999) para uniformizar a distribuição de energia e evitar superaquecimento do solo: 1) a amostra foi submetida à irradiação por metade do tempo de exposição determinado; 2) em seguida foi retirada do forno de microondas, submetida a uma agitação manual leve para movimentar o solo no interior do copo de polipropileno e deixada em repouso até atingir temperatura ambiente; 3) e finalmente foi submetida à segunda metade do tempo de exposição à irradiação no forno de microondas. Após cada seção de irradiação, a temperatura foi monitorada em algumas amostras com auxílio de um termômetro.

As amostras da área de Latossolo foram submetidas a um tempo de irradiação total de 130 segundos, dividido em duas seções de 65 segundos, de acordo com a relação de 4050 J g^{-1} verificada na recomendação de Ferreira et al. (1999). Para as amostras de Nitossolo foram seguidas as recomendações de Islam e Weil (1998), adotando-se duas seções de 32 segundos, sempre se respeitando a faixa de temperatura entre 80 e 88°C proposta pelos autores. A escolha de valores diferentes de tempo de exposição foi baseada na recomendação de Islam e Weil (1998) de que a temperatura final após a irradiação permanecesse entre 80 e 88°C. Temperaturas inferiores podem levar a uma atividade biocida pouco eficiente, subestimando os teores de C e N, à medida que temperaturas superiores podem provocar o rompimento e a solubilização de moléculas humificadas de origem não microbiana. As amostras de Latossolo, quando submetidas ao tempo de exposição recomendado por Islam e Weil (1998) não atingiam a temperatura mínima de 80°C, tendo ocorrido valores nulos ou negativos do C_{BMS} . As amostras de Nitossolo, submetidas ao cálculo de exposição de Ferreira et al. (1999) atingiam temperaturas acima do limite de 88°C, superestimando a C_{BMS} de amostras mais suscetíveis ao superaquecimento.

Após a irradiação procederam-se, em ordem cronológica, a adição de 80 mL de solução de K_2SO_4 0,5 M sobre as amostras (irradiadas e não irradiadas), a agitação em agitador horizontal a 220 rpm por 30 minutos, o repouso por mais 30 minutos para permitir a sedimentação do solo no interior do copo e a filtragem dos extratos em papel filtro quantitativo. Após a filtragem, foram pipetados 10 mL do filtrado para a determinação do C_{BMS} pelo método de oxidação de dicromato, descrito por Mendonça e Matos (2005).

O restante do filtrado foi transferido para frascos de vidro. Três gotas de ácido sulfúrico concentrado foram adicionadas em seguida, para impedir a decomposição microbiana. Os extratos ácidos filtrados foram levados a um congelador (-20°C) e mantidos congelados por no máximo 7 dias até a análise de nitrogênio da biomassa microbiana (ISLAM; WEIL, 1998). Após o descongelamento, foram pipetados 10 mL do extrato ácido, realizando-se em seguida a determinação do N da biomassa microbiana pelo método de Kjeldahl descrito por Mendonça e Matos (2005).

O carbono da biomassa microbiana (C_{BMS}) foi calculado pela equação (4):

$$C_{MS} = \frac{C_I - C_{NI}}{k_c} \quad (4)$$

Equação 4: C_{BMS} = carbono da biomassa microbiana do solo em $mg\ kg^{-1}$ de solo ou ppm; C_I = quantidade de C ($mg\ kg^{-1}$) recuperada na amostra irradiada; C_{NI} = quantidade de C ($mg\ kg^{-1}$) recuperada na amostra não irradiada; k_c = fator de correção que representa a eficiência do extrator em extrair o C da biomassa microbiana do solo (adimensional).

O fator de correção k_c utilizado para a área de Latossolo foi de 0,33 recomendado por Sparling e West (1988) e adotado por Ferreira et al. (1999). Por sua vez, para a área de Nitossolo, utilizou-se o valor de 0,213 recomendado por Islam e Weil (1999). O nitrogênio da biomassa microbiana (N_{BMS}) foi calculado pela equação 5:

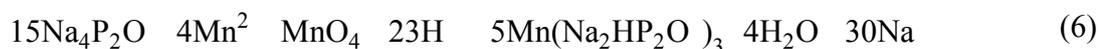
$$N_{MS} = \frac{N_I - N_{NI}}{k_n} \quad (5)$$

Equação 5: N_{BMS} = nitrogênio da biomassa microbiana do solo em $mg\ kg^{-1}$ de solo ou ppm; N_I = quantidade de N ($mg\ kg^{-1}$) recuperada na amostra irradiada; N_{NI} = quantidade de N ($mg\ kg^{-1}$) recuperada na amostra não irradiada; k_n = fator de correção que representa a eficiência do extrator em extrair o N da biomassa microbiana do solo (adimensional).

Para o nitrogênio, não há um valor de k_n desenvolvido para o método de irradiação-extração. Foi utilizado, nas duas áreas experimentais, o valor proposto por Brookes et al. (1985) para o método de fumigação-extração: 0,54.

5.6.7. Carbono solúvel em água e em água quente

As determinações de carbono solúvel em água (CSA) e em água quente (CSA_q) foram realizadas somente nas amostras de 0-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade coletadas no ano de 2013, no Laboratório de Relações Solo-Planta da FCA/UNESP, Botucatu, SP. O procedimento de análise foi adaptado do método colorimétrico de Bartlett e Ross (1988), descrito por Mendonça e Matos (2005). O princípio do método é baseado na perda de cor púrpuro-avermelhada, provocada pelo complexo Mn(III)-pirofosfato, conforme o Mn(III) é reduzido pelo carbono orgânico em meio ácido, cuja reação hipotética se encontra na equação 6. A partir de uma curva padrão, o teor de C solúvel é determinado a partir de absorbância medida por espectrofotometria.



Equação 6: Reação hipotética de redução do manganês em meio ácido pelo carbono orgânico. Fonte: Bartlett e Ross (1988).

O presente método colorimétrico apresenta a limitação de que os valores de absorbância são nulos em concentrações superiores a 192 mg C kg⁻¹ de solo, impedindo a determinação das concentrações de C. No entanto, os valores de C solúvel em água e em água quente nas duas áreas experimentais estiveram dentro dos limites de concentração abrangidos pelo método, possibilitando assim sua utilização.

5.6.7.1. Carbono solúvel em água

Após secas ao ar, as amostras de solo coletadas foram peneiradas em malha de 0,250 mm (60 Mesh). Em seguida, foram pesados 3,5 gramas de solo

peneirado em tubos de centrífuga de 15 mL, acrescentando-se 7 mL de água deionizada, obtendo-se a relação solo-extrator 1:2. Em seguida, os tubos foram agitados em agitador horizontal (220 rpm) por 15 minutos e centrifugados por mais 15 minutos a 5000 rpm. Os extratos foram filtrados em papel filtro quantitativo. Foram pipetados 1,25 mL do filtrado, adicionando-se em ordem cronológica: 1,25 mL de H₂O destilada, 1,25 mL do reagente de trabalho (RT) e 1,25 mL de H₂SO₄ concentrado. Os extratos foram deixados em repouso por 18 horas e submetidos à leitura em espectrofotômetro a 495 nm. Os teores de C nos extratos foram determinados a partir de uma curva padrão preparada com ácido oxálico diidratado, nas concentrações de 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,2; 1,6 e 2,0 mmol C L⁻¹. Os valores finais foram transformados em mg C kg⁻¹ de solo.

O reagente de trabalho (RT) foi preparado adicionando-se, em um balão volumétrico de 250 mL, em ordem: 75 mL de Na₄P₂O₇ 0,1 mol L⁻¹, 11,5 mL de H₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ e 5 mL de KMnO₄ 0,10 mol L⁻¹. O balão foi agitado manualmente e foram acrescentados imediatamente a seguir, com agitação, 20 mL de MnSO₄ 0,1 mol L⁻¹. O volume foi completado com água destilada. A preparação do RT foi sempre realizada no dia de seu uso, para evitar sua oxidação e perda de cor.

5.6.7.2. Carbono solúvel em água quente

Após secas ao ar, as amostras coletadas foram peneiradas em malha de 0,250 mm (60 Mesh). Em seguida foram pesados 3,5 gramas de solo peneirado em tubos de centrífuga de 15 mL, acrescentando-se 7 mL de água deionizada, obtendo-se a relação solo-extrator 1:2. Em seguida, os tubos foram agitados em agitador horizontal (220 rpm) por 15 minutos e submetidos a aquecimento por imersão em água (“banho-maria”) a 80°C durante 16 horas, conforme descrito por Ghani et al. (2003). Após o aquecimento, as amostras permaneceram em repouso até atingirem a temperatura ambiente. Procederam-se, em ordem, agitação por 15 minutos em agitador horizontal (220 rpm), centrifugação a 5000 rpm e filtragem dos extratos em papel filtro quantitativo. Os procedimentos para determinação de CSA_q a partir dos extratos filtrados foram adaptados de Bartlett e Ross (1988) e Mendonça e Matos (2005) e foram os mesmos descritos para CSA no item 5.6.7.1.

5.6.8. Coleta e análise de agregados do solo

A coleta de amostras de solo para análise de agregados foi realizada em 14/12/2012. Em cada unidade experimental, foram abertas trincheiras com dimensões aproximadas de 0,30 m de largura por 0,60 m de comprimento e 0,60 m de profundidade. Foram retirados monólitos de solo com dimensões aproximadas de 0,10 m de altura por 0,20 m de comprimento e 0,10 m de largura, com auxílio de espátula de aço e marreta de 1 kg nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm, respectivamente, utilizando-se somente a porção retida na de 4 mm. Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper e Chepil (1965), utilizando-se um aparelho de oscilação vertical, descrito por Yoder (1936).

Foram pesadas duas subamostras de 25 g de solo de cada amostra, sendo uma delas submetida à determinação de umidade em estufa a 105°C e a outra encaminhada para o tamisamento. As subamostras destinadas ao tamisamento foram pré-umedecidas levemente com um borrifador e mantidas em repouso em temperatura ambiente por 10 minutos. Em seguida, foram transferidas para um conjunto de peneiras acopladas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de diâmetro dentro do aparelho de oscilação vertical. O aparelho movimentava verticalmente o conjunto de peneiras imersas em água, de modo que amostra de solo depositada inicialmente no tãmis superior (2,00 mm) mergulhe totalmente e depois suba até aflorar acima do nível da água.

O tamisamento mecânico na água foi realizado por 15 minutos. As porções retidas em cada peneira foram transferidas para potes de alumínio com o auxílio de jatos de água e secas em estufa a 105°C por um período de 24 horas para posterior pesagem. A partir dos valores de massa, e conhecendo-se os teores de umidade das amostras originais de solo submetidas ao tamisamento, foram calculados a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2 mm (agregados menores que 2 mm), o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG). Também foi calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA), conforme Castro Filho et al. (1998). Para as determinações de DMP, DMG e IEA foram utilizadas as equações 7, 8 e 9, respectivamente.

$$\text{DMP} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (7)$$

Equação 7: DMP = diâmetro médio ponderado (mm); \bar{x}_i = diâmetro médio das classes de tamanho de agregados (mm); w_i = massa das classes de tamanho de agregados após a secagem (g).

$$\text{DMG} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (8)$$

Equação 8: DMG = Diâmetro médio geométrico (mm); \bar{x}_i = diâmetro médio das classes de tamanho de agregados (mm); w_i = massa das classes de tamanho de agregados após a secagem (g).

$$\text{IEA} = \frac{w_{<0,25}}{w_s} \cdot 100 \quad (9)$$

Equação 9: IEA = Índice de estabilidade de agregados (%); w_s = massa da amostra original de solo após a secagem (g); $w_{<0,25}$ = massa de agregados menores que 0,25 mm (g).

5.6. Análises estatísticas

Para verificação de interações entre culturas de primavera e de outono/inverno, foi realizada análise de variância, e as médias foram comparadas estatisticamente pelo teste t (LSD), no nível de 5 % de probabilidade de erro. Os dados de solo na camada de 0-0,10 m de carbono orgânico total, nitrogênio total, fracionamento físico, grau de humificação, carbono solúvel em água e em água quente foram submetidos à análise de correlação, calculando-se os coeficientes de correlação de Pearson (r), sendo sua significância determinada pelo teste t de Student a 5% de probabilidade de erro.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Experimento I

6.1.1. Carbono orgânico e nitrogênio totais do solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Em nenhuma das análises de variância realizadas foram constatadas interações significativas. Por esta razão, optou-se por não se desdobrarem os testes de médias em todas as análises realizadas (tabela 7). Verificou-se também nas análises de variância que os efeitos foram em geral mais pronunciados nas culturas de primavera, com menores valores de probabilidade de F (tabela 7). Os teores de carbono orgânico total, após decrescerem até a camada de 0,20-0,40 m, apresentaram um aumento na camada de 0,40-0,60 m (tabela 8), o que pode ser atribuído a dois fatores: o aumento do teor de argila

(tabela 5) e a presença de pequenos fragmentos vegetais carbonizados na camada de 0,40-0,60 m.

O teor de carbono orgânico total (COT) médio foi de aproximadamente 14 mg kg^{-1} na camada superficial, diminuindo para valores entre 9 e 11 mg kg^{-1} nas camadas seguintes; o teor de carbono orgânico particulado (COP), com média de aproximadamente 2 mg kg^{-1} na camada 0-0,10 m, reduziu-se aproximadamente a um terço e a um quinto deste valor nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente (tabela 8). Para o carbono associado a minerais, a queda foi relativamente menos acentuada, reduzindo de aproximadamente 12 mg kg^{-1} em 0-0,10 m para 10 e 9 mg kg^{-1} em 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente. Os tratamentos não influenciaram a relação COP/COT, e seus maiores valores ocorreram na camada de 0-0,10 m, em que esteve próximo a 14% (tabela 9). Já nas camadas mais profundas esta relação variou entre 4 e 5%. A relação COP/COT é um indicador de labilidade da MOS. Maiores valores significam maior proporção de carbono orgânico particulado, de maior labilidade, no carbono orgânico total.

Os teores de nitrogênio total (NT) apresentaram comportamento decrescente com o aumento da profundidade, estabilizando-se nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Os valores médios de NT nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m foram 0,97; 0,73; 0,64; e $0,62 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente (tabela 8).

Maiores teores de COT e COM foram verificados nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m do solo com o cultivo de crotalária, mas não diferindo do manejo com sorgo forrageiro (tabela 8). Foi verificado que, apesar das diferenças entre COT terem sido significativas entre crotalária e milho nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, o N total não diferiu na camada de 0-0,10 m e o solo com crotalária foi superior ao com milho quanto ao N total somente na camada de 0,10-0,20 m (tabela 8), o que pode ter acontecido em decorrência do menor aporte de matéria seca do milho (tabela 1) e da maior quantidade de N na crotalária (tabela 4).

Rigon (2013), no mesmo solo do presente experimento e avaliando as mesmas rotações, observou que a crotalária foi a cultura de primavera que mais acumulou nitrogênio na palha, independentemente da cultura de outono/inverno. Suzuki e Alves (2006), em um Latossolo distrófico de textura argilosa na região de Selvíria/MS, não encontraram diferenças significativas entre produção de matéria seca de crotalária e

milheto, o que, em condições de limitações de N no solo, pode favorecer a crotalária no acúmulo de MOS.

Pereira et al. (2010), ao compararem plantas de cobertura em sistemas com milho e soja, em solo semelhante na região de Uberaba, constataram que após a adubação de 152 kg N ha⁻¹ e 8 kg N ha⁻¹ durante os ciclos de milho e soja, respectivamente, que o estoque de carbono no solo entre as camadas de 0 e 0,2 m foi, em geral, maior em solo cultivado com milheto em comparação ao com crotalária, indicando que a adubação nitrogenada pode favorecer o acúmulo de carbono orgânico no solo por gramíneas com grande capacidade de produção de fitomassa.

A ausência de diferenças significativas de nitrogênio total no solo na camada de 0-0,10 m pode ter acontecido devido à textura menos argilosa do solo (tabela 5), minimizando as chances de proteção de N em forma orgânica e mineral e facilitando assim sua decomposição e perda na forma de lixiviação ou emissão gasosa. Os valores de nitrogênio, desde a superfície, são baixos, com teores inferiores a 1 g kg⁻¹. Assim, é possível afirmar que, neste solo, o aporte de nitrogênio através da fixação simbiótica na crotalária não foi suficiente para promover aumento significativo de N total na camada de 0-0,10 m. Contrariamente, na camada de 0,10-0,20 m, onde as taxas de decomposição diminuem, mas ainda ocorre intenso crescimento radicular, um acúmulo de N foi verificado (tabela 8). No entanto, em geral, a ausência de efeitos na relação C/N do solo na camada superficial (tabela 9) está de acordo com o baixo efeito do aporte de N através da crotalária.

Perin et al. (2004) não verificaram diferenças de fitomassa entre milheto e crotalária, mas verificaram um acúmulo maior de N na parte aérea de crotalária, sendo 57% deste acúmulo devido à fixação simbiótica. Sodré Filho et al. (2004), em um Latossolo de textura argilosa, não encontraram diferenças entre massa de matéria seca de milheto e crotalária, que estiveram em aproximadamente 2 Mg ha⁻¹. Kappes et al. (2013), também em um Latossolo de textura argilosa, verificaram que o cultivo de crotalária, comparativamente ao milheto, resultou em maior produção de matéria seca de parte aérea do milho em sucessão. Leal et al. (2013) observaram que, na ausência de adubação nitrogenada, a crotalária produziu quantidade de matéria seca superior ao milheto, mas também constataram que, com o aumento da adubação para mais do que 90 kg ha⁻¹, o milheto mais do que dobrou a produção de matéria seca, superando a crotalária, que pouco variou com a aplicação de N. Segundo Marcelo et al. (2012), crotalária e milheto, que

produzem grande quantidade de matéria seca, destacam-se como culturas adequadas para cultivo na entressafra. A crotalaria devido à baixa taxa de decomposição e à elevada quantidade de nutrientes liberados na decomposição, e o milho em razão da elevada quantidade de nutrientes remanescentes nos resíduos.

O maior aporte de matéria seca da crotalaria em relação às demais culturas de primavera (tabela 1), sua menor relação C/N e seu alto teor de lignina (tabela 3) são fatores que favorecem o metabolismo microbiano, por um lado, e o acúmulo de matéria orgânica mais recalcitrante, por outro (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008; STEVENSON, 1994). Esta combinação pode ter resultado nos maiores teores de carbono orgânico total e associado a minerais (COM) na camada de 0-0,10 m.

Tabela 7. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) dos teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), relação C/N do solo e relação COP/COT nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m na área de Latossolo. Botucatu, 2013.

Cultura	NT	COT	COP	COM	C/N	COP/COT
0 a 0,10 m						
Outono (A)	0,246	0,628	0,221	0,807	0,439	0,222
Primavera (B)	0,729	0,048	0,357	0,125	0,351	0,567
A x B	0,215	0,248	0,425	0,356	0,542	0,515
CV _A (%)	11,32	5,08	22,72	6,50	10,88	22,39
CV _B (%)	8,86	6,28	23,92	6,47	6,85	21,99
0,10 a 0,20 m						
Outono (A)	0,172	0,400	0,500	0,373	0,227	0,485
Primavera (B)	0,008	0,077	0,053	0,142	0,464	0,161
A x B	0,167	0,640	0,632	0,778	0,181	0,786
CV _A (%)	7,60	3,93	22,51	4,74	7,56	22,93
CV _B (%)	7,04	7,87	21,59	8,55	9,85	23,08
0,20 a 0,40 m						
Outono (A)	0,198	0,310	0,433	0,287	0,129	0,319
Primavera (B)	0,114	0,995	0,851	0,996	0,159	0,771
A x B	0,145	0,333	0,291	0,241	0,530	0,073
CV _A (%)	9,42	2,39	16,98	2,81	13,21	18,18
CV _B (%)	7,56	7,80	19,51	7,91	9,96	18,45
0,40 a 0,60 m						
Outono (A)	0,484	0,871	0,797	0,790	0,569	0,680
Primavera (B)	0,427	0,347	0,936	0,293	0,053	0,924
A x B	0,348	0,188	0,247	0,191	0,895	0,310
CV _A (%)	8,04	10,45	34,98	9,39	15,77	25,20
CV _B (%)	8,79	13,55	39,34	13,11	14,26	30,76

Tabela 8. Teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (COM) no solo, em g kg^{-1} , nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu 2013.

Cultura	NT	COT	COP	COM
	----- g kg^{-1} -----			
0 a 0,10 m				
Outono				
Braquiária	0,97 a	14,14 a	2,17 a	11,96 a
Sorgo granífero	0,93 a	13,83 a	1,85 a	11,98 a
Sorgo+Braquiária	1,02 a	14,10 a	1,94 a	12,15 a
Primavera				
Crotalária	0,99 A	14,38 A	2,02 A	12,36 A
Milheto	0,96 A	13,52 B	1,84 A	11,67 B
Sorgo forrageiro	0,97 A	14,18 AB	2,11 A	12,06 AB
Média Geral	0,97	14,02	1,99	12,03
0,10 a 0,20 m				
Outono				
Braquiária	0,72 a	10,89 a	0,58 a	10,32 A
Sorgo granífero	0,71 a	10,49 a	0,62 a	9,87 A
Sorgo+Braquiária	0,76 a	10,83 a	0,63 a	10,19 A
Primavera				
Crotalária	0,74 A	11,00 A	0,60 AB	10,40 A
Milheto	0,68 B	10,31 B	0,55 B	9,76 B
Sorgo forrageiro	0,76 A	10,91 AB	0,68 A	10,22 AB
Média Geral	0,73	10,74	0,61	10,13
0,20 a 0,40 m				
Outono				
Braquiária	0,64 a	9,62 a	0,38 a	9,24 a
Sorgo granífero	0,61 a	9,34 a	0,35 a	8,99 a
Sorgo+Braquiária	0,67 a	9,21 a	0,39 a	8,83 a
Primavera				
Crotalária	0,64 AB	9,40 A	0,38 A	9,02 A
Milheto	0,62 B	9,40 A	0,37 A	9,03 A
Sorgo forrageiro	0,66 A	9,38 A	0,37 A	9,01 A
Média Geral	0,64	9,39	0,37	0,90
0,40 a 0,60 m				
Outono				
Braquiária	0,60 a	11,12 a	0,53 a	10,59 a
Sorgo granífero	0,61 a	11,12 a	0,53 a	10,59 a
Sorgo+Braquiária	0,63 a	10,86 a	0,58 a	10,27 a
Primavera				
Crotalária	0,61 A	11,37 A	0,57 A	10,80 A
Milheto	0,61 A	11,19 A	0,54 A	10,64 A
Sorgo forrageiro	0,63 A	10,55 A	0,54 A	10,00 A
Média Geral	0,61	11,03	0,55	10,48

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Tabela 9. Relação C/N do solo e relação carbono orgânico particulado/carbono orgânico total (COP/COT) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	C/N	COP/COT (%)
0 a 0,10 m		
Outono		
Braquiária	14,95 a	15,38 a
Sorgo granífero	15,16 a	13,31 a
Sorgo+Braquiária	14,29 a	13,74 a
Primavera		
Crotalária	14,96 A	14,01 A
Milheto	14,44 A	13,56 A
Sorgo forrageiro	15,00 A	14,86 A
Média Geral	14,80	14,14
0,10 a 0,20 m		
Outono		
Braquiária	16,13 a	5,36 a
Sorgo granífero	15,74 a	5,96 a
Sorgo+Braquiária	15,08 a	5,89 a
Primavera		
Crotalária	15,77 A	5,49 A
Milheto	15,96 A	5,38 A
Sorgo forrageiro	15,23 A	6,34 A
Média Geral	15,65	5,74
0,20 a 0,40 m		
Outono		
Braquiária	16,01 a	3,94 a
Sorgo granífero	16,26 a	3,76 a
Sorgo+Braquiária	14,39 a	4,22 a
Primavera		
Crotalária	15,66 A	4,10 A
Milheto	16,13 A	3,91 A
Sorgo forrageiro	14,87 A	3,91 A
Média Geral	15,55	3,97
0,40 a 0,60 m		
Outono		
Braquiária	20,18 a	4,75 a
Sorgo granífero	19,47 a	4,81 a
Sorgo+Braquiária	18,78 a	5,23 a
Primavera		
Crotalária	20,84 A	5,02 A
Milheto	19,72 AB	4,80 A
Sorgo forrageiro	17,88 B	4,98 A
Média Geral	19,48	4,93

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

As duas gramíneas, sorgo forrageiro e milho, não diferiram entre si quanto ao COT do solo (tabela 8). O mesmo comportamento foi verificado para a fração associada a minerais (COM). Diferenças no carbono particulado (COP) foram observadas somente na camada de 0,10-0,20 m, tendo o solo cultivado com sorgo forrageiro maior teor, mas não diferindo da crotalária (tabela 8). A diferença entre sorgo forrageiro e milho na subsuperfície quanto ao carbono particulado (COP) pode estar relacionada ao menor aporte de matéria seca do milho (tabela 1), podendo ter refletido também em menor produção de raízes, e assim no menor teor de COP. No entanto, a ausência de diferenças entre as relações COP/COT (tabela 9) indica que, apesar de possíveis diferenças no COP, este não foi suficiente para alterar significativamente a labilidade da matéria orgânica.

Entre as culturas de primavera verificaram-se menores teores de N total no solo, nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, com o cultivo de milho (tabela 8). Quanto à relação C/N, houve diferença apenas na camada de 0,40-0,60 m, onde se verificou maior valor com o cultivo de crotalária em comparação ao cultivo de sorgo forrageiro (tabela 9). Nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, as médias de relação C/N foram de 14,8; 15,6; 15,5; e 19,5; respectivamente, caracterizando um aumento de acordo com a profundidade (tabela 9). Segundo Stevenson (1994), em solos tropicais não revolvidos, o equilíbrio na relação C/N ocorre entre 10 e 15.

A braquiária apresentou um alto teor de N em seus tecidos, próximo inclusive ao da crotalária (tabela 3), que é uma leguminosa, acumulando grande quantidade deste nutriente (tabela 4). Um fator que pode aumentar os teores de nitrogênio na braquiária é a associação com bactérias do gênero *Azospirillum*, que podem introduzir via fixação biológica quantidade suficiente para proporcionar um balanço nulo ou até positivo de N para o sistema solo-planta (REIS JUNIOR et al., 2002). Além desta característica, a braquiária *ruziziensis* é uma espécie com boa capacidade de adaptação em ambientes com deficiência de N em comparação a outras espécies do mesmo gênero, apresentando nestas condições uma alta eficiência no uso de N (FERNANDES et al., 2011).

Rigon (2013), na mesma área experimental, e comparando os mesmos tratamentos, observou que o emprego da braquiária aumentou significativamente em pelo menos 700 kg ha⁻¹ a produção de matéria seca no inverno, tendo acumulado muito mais N do que o sorgo granífero solteiro. O autor verificou ainda que, na primavera, a

crotalária acumulou mais N na palha, sendo este feito mais pronunciado quando envolveu a braquiária no outono/inverno, solteira ou consorciada, tendo sido obtidos os maiores acúmulos de N, superando em pelo menos 50 kg ha^{-1} o sorgo granífero solteiro seguido de crotalária. No entanto, o autor também observou maiores perdas de CO_2 e N_2O quando a braquiária foi cultivada no outono/inverno, o que, aliado às maiores perdas por decomposição, pode ter prejudicado o efeito direto da braquiária no acúmulo de carbono orgânico no solo. Torres et al. (2005), ao compararem sete tipos de cobertura em um Latossolo argiloso, constataram que, entre as coberturas avaliadas, o milho e a crotalária foram as que apresentaram a maior produção de massa de matéria seca, maior acúmulo e maior liberação de N, enquanto a braquiária foi a cobertura que apresentou a maior taxa de decomposição.

Castoldi et al. (2014), comparando 4 espécies de braquiária, concluíram que a braquiária ruziziensis foi a espécie que apresentou o maior acúmulo de N e a que mais perdeu N após a realização de dessecação com o herbicida glyphosate, tendo sido a maior parte do N perdida liberada no solo.

Segundo Pacheco et al. (2011), a braquiária pode se comportar de maneira que possibilite a elevada liberação de nutrientes, o que pode ser explicado pela maior presença de tecidos jovens, oriundos da recente rebrota e que apresentam alta sensibilidade à decomposição, levando-se em conta sua baixa relação lignina/N.

6.1.2. Grau de humificação da matéria orgânica do solo

Não houve interações entre as culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 10). Foram constatadas diferenças significativas no grau de humificação do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) apenas na camada 0-0,10 m, com influência apenas das culturas de outono/inverno. Nesta camada, a MOS apresentou-se menos humificada com o cultivo de braquiária solteira (tabela 11), em função do maior aporte de palha por esta espécie, além do sistema radicular de espessura fina, com grande capacidade de penetração e ocupação de volume de solo, favorecendo o acúmulo de matéria orgânica lábil, o que aumenta a quantidade de C na fração não humificada (SEGNINI, 2007). O menor grau de humificação, neste caso, não foi correspondido por uma diferença significativa no teor de COP (tabela 9), embora seu valor tenha sido alto.

Verificou-se, em geral, um aumento de H_{FIL} nas camadas de solo mais profundas, o que era esperado em virtude do menor aporte de resíduos. Geralmente, o maior aporte de resíduos também está relacionado, assim como a um menor H_{FIL} , a outros valores espectroscópicos, como menor grau de aromaticidade por RMN e menor relação E_4/E_6 por espectroscopia na região do UV-VIS (CERETTA et al., 2008).

Tabela 10. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	H_{FIL}			
	0 a 0,10 m	0,10 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m	0,40 a 0,60 m
Outono (A)	0,0033	0,9971	0,5282	0,7725
Primavera (B)	0,1609	0,2129	0,5490	0,4127
A x B	0,1500	0,9184	0,6169	0,5331
CV _A (%)	8,11	5,82	9,30	15,41
CV _B (%)	9,00	11,79	10,38	15,99

Tabela 11. Grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	0 a 0,10 m	0,10 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m	0,40 a 0,60m
Outono				
Braquiária	1017,7 b	1403,6 a	1709,0 a	1478,3 a
Sorgo granífero	1150,2 a	1408,1 a	1677,3 a	1503,8 a
Sorgo+Braquiária	1147,5 a	1405,1 a	1757,8 a	1435,7 a
Primavera				
Crotalária	1100,8 A	1397,3 A	1676,2 A	1466,8 A
Milheto	1146,5 A	1464,7 A	1754,8 A	1411,1 A
Sorgo forrageiro	1068,1 A	1354,9 A	1713,1 A	1539,9 A
Média Geral	1105,1	1405,6	1714,7	1472,5

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

6.1.3. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo

Não foram constatadas interações entre as culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 12). O carbono da biomassa microbiana do solo na camada de 0-0,10 m variou entre 197 e 229 mg kg⁻¹, ao passo que o nitrogênio entre 17 e 29 mg kg⁻¹. Houve diferenças somente entre as culturas de primavera (tabela 13). Os valores de carbono de biomassa microbiana pelo método da irradiação-extração estão próximos aos encontrados por Nunes et al. (2011) em solo semelhante em SSD pelo método de fumigação-extração.

O maior valor de carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) ocorreu com o cultivo da crotalária, embora não diferindo do sorgo forrageiro, enquanto o menor C_{BMS} esteve associado ao milho (tabela 13). O maior teor de nitrogênio da biomassa microbiana (N_{BMS}) também esteve associado à crotalária, que diferiu das demais culturas de primavera. Milho e sorgo forrageiro não diferiram entre si quanto ao carbono e ao nitrogênio microbiano do solo. Não houve diferenças entre os valores do quociente C_{BMS}/COT , enquanto o solo com crotalária apresentou maior relação N_{BMS}/NT em comparação às demais culturas de primavera (tabela 13). As médias das relações, considerando todos os tratamentos, de C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT foram de 1,53% e 2,33%, respectivamente, que podem ser consideradas baixas. O valor da relação C_{BMS}/COT está um pouco abaixo do intervalo comumente encontrado de 2 a 5%, ao passo que a relação N_{BMS}/NT encontra-se próxima do limite inferior da faixa de 1 a 5% normalmente encontrada nos solos (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). Assim, é reforçada a possibilidade de que a biomassa microbiana esteja sob estresse ambiental.

O maior teor de carbono da biomassa microbiana no solo com o cultivo da crotalária em comparação ao milho e o maior teor de nitrogênio no solo sob crotalária em comparação às demais culturas de primavera é refletido no maior teor de carbono orgânico total. O maior teor de C da biomassa microbiana está relacionado ao aporte de N pela crotalária, o que é corroborado pelo maior teor de N microbiano. A maior relação N microbiano/N total no solo com crotalária é um indicativo de que o aporte de N alterou a comunidade ou o metabolismo microbiano, o que pode ter favorecido a síntese de matéria orgânica. Perez et al. (2004) verificaram um aumento de nitrogênio da biomassa microbiana a partir do aumento do nitrogênio total do solo.

Estes valores também indicam que a biomassa microbiana, presente em um solo que não recebe adubação com fertilizantes nitrogenados desde a instalação do experimento, está submetida a um estresse por deficiência de N (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). O aumento no N_{BMS} e no C_{BMS} são fatores que podem ter contribuído para o incremento de COT pela crotalária. No entanto, o aumento no C_{BMS} não promoveu diferenças na relação C_{BMS}/COT .

Tabela 12. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}), do nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}) e de suas relações com seus respectivos teores totais (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	C_{BMS}	N_{BMS}	C_{BMS}/COT	N_{BMS}/NT
0 a 0,10 m				
Outono (A)	0,7089	0,5477	0,7184	0,5131
Primavera (B)	0,0751	0,0165	0,3699	0,0196
A x B	0,3437	0,5408	0,6072	0,5774
CV_A (%)	23,59	101,43	23,13	104,23
CV_B (%)	14,57	38,85	14,21	38,64

Tabela 13. Teores de carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) e nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}), e relações com seus respectivos teores totais (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	C_{BMS} (mg kg ⁻¹)	N_{BMS} (mg kg ⁻¹)	C_{BMS}/COT (%)	N_{BMS}/NT (%)
0 a 0,10 m				
Outono				
Braquiária	207,56 a	27,79 a	1,47 a	2,96 a
Sorgo granífero	210,08 a	20,64 a	1,51 a	2,18 a
Sorgo+Braquiária	224,32 a	18,63 a	1,59 a	1,87 a
Primavera				
Crotalária	229,78 A	28,79 A	1,60 A	2,98 A
Milheto	197,48 B	17,74 B	1,46 A	1,84 B
Sorgo forrageiro	214,70 AB	20,53 B	1,52 A	2,19 B
Média Geral	214,22	22,19	1,53	2,33

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

6.1.4. Carbono solúvel em água e em água quente

Não houve interações entre as culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 14) nem diferenças significativas nos teores de carbono solúvel em água e em água quente nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (tabela 15).

Tabela 14. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) do solo nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20. Área de Latossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	CSA	CSA _q	CSA	CSA _q
	0 a 0,10m		0,10 a 0,20 m	
Outono (A)	0,3896	0,4527	0,9276	0,9479
Primavera (B)	0,1741	0,9099	0,5967	0,8263
A x B	0,6901	0,9435	0,9657	0,1254
CV _A (%)	43,67	12,71	50,76	16,91
CV _B (%)	32,54	16,11	48,78	19,87

Tabela 15. Teores de carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) do solo, em mg kg⁻¹, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	CSA	CSA _q	CSA	CSA _q
	-----mg kg ⁻¹ -----		-----	
	0 a 0,10 m		0,10 a 0,20 m	
Outono				
Braquiária	52,34 a	151,00 a	37,92 a	97,73 a
Sorgo granífero	42,36 a	145,70 a	41,20 a	95,92 a
Sorgo+Braquiária	55,28 a	158,43 a	40,28 a	95,29 a
Primavera				
Crotalária	50,05 A	149,62 A	40,62 A	93,75 A
Milheto	56,72 A	153,95 A	34,95 A	96,91 A
Sorgo forrageiro	43,20 A	151,57 A	43,83 A	98,32 A
Média Geral	48,67	151,38	39,80	96,41

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Os teores médios de carbono solúvel em água na camada superficial e subsuperficial foram aproximadamente 50 e 40 mg kg⁻¹, respectivamente, ao passo que as médias de carbono solúvel em água quente foram 152 e 96 mg kg⁻¹,

respectivamente (tabela 15). Estes valores estão próximos aos encontrados por Garcia et al. (2013) na mesma área experimental.

A ausência de diferenças significativas entre as rotações quanto ao carbono solúvel em água e em água quente, frações muito lábeis, ao contrário do comportamento de C e N de biomassa microbiana e do carbono orgânico total, pode ter acontecido pela rápida degradação destas formas de C e pela baixa disponibilidade de sítios de retenção, considerando-se a textura do solo menos argilosa e os baixos teores de matéria orgânica, favorecendo também as perdas por lixiviação. Em solos mais arenosos, as perdas são proporcionalmente mais rápidas do que nos mais argilosos (BUSO; KLIEMANN, 2003).

Garcia et al. (2013) observaram que a braquiária favoreceu o aumento do carbono solúvel em água nas camadas de 0-5 e 5-10 m de profundidade. No entanto, a coleta foi realizada logo após o manejo das culturas de primavera, antes da soja, podendo ocorrer neste período um efeito residual das culturas de outono/inverno neste solo, ao passo que após a soja estas variações possam não ser mais perceptíveis.

6.1.5. Análises de solo da mata nativa

Os dados da área de mata (tabela 16) não foram submetidos à análise estatística, sendo utilizados como referência somente para o experimento I (Latossolo).

Os teores de carbono orgânico total e suas respectivas frações particulada e associada a minerais, e de nitrogênio, foram em geral superiores aos dos tratamentos da área do experimento I. Nas duas camadas superficiais, os valores de grau de humificação foram muito inferiores àqueles encontrados nas culturas em rotação, o que pode ser atribuído às maiores entradas de carbono orgânico na forma de serrapilheira e menores perdas por decomposição de microorganismos (tabela 16).

Também foram verificados maiores teores de carbono e nitrogênio de biomassa microbiana em comparação à área sob manejo agrícola (tabela 16). Estes resultados estão de acordo com trabalhos que compararam sistemas agrícolas e áreas de floresta (SILVA et al., 2012; SEGNINI, 2007). Os valores das relações C/N, COP/COT, C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT estiveram próximos daqueles determinados nas culturas em rotação,

não tendo sido realizadas análises de frações solúveis (CSA e CSA_q) e de agregados nas amostras provenientes da mata.

Tabela 16. Caracterização da área de mata próxima ao experimento em Latossolo quanto aos teores no solo de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação C/N, carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), relação COP/COT, grau de humificação (H_{FIL}), carbono da biomassa microbiana (C_{BMS}), nitrogênio da biomassa microbiana (N_{BMS}), relação C_{BMS}/COT e relação N_{BMS}/NT. Botucatu, 2013.

	0 a 0,10 m	0,10 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m	0,40 a 0,60m
COT (g kg ⁻¹)	22,27	15,00	10,07	10,87
NT (g kg ⁻¹)	1,230	1,01	0,78	0,73
C/N	17,20	14,82	12,87	14,99
COP (g kg ⁻¹)	3,83	1,67	0,63	0,65
COM (g kg ⁻¹)	18,42	13,32	9,43	10,21
COP/COT (%)	17,08	11,44	6,31	5,99
H _{FIL}	527,1	863,1	1095,5	1183,6
C _{BMS} (mg kg ⁻¹)	338,982	-	-	-
N _{BMS} (mg kg ⁻¹)	41,574	-	-	-
C _{BMS} /COT (%)	1,52	-	-	-
N _{BMS} /NT (%)	3,38	-	-	-

6.1.6. Análises de correlação

De acordo com os coeficientes de correlação calculados entre análises de solo na camada de 0-0,10 m (tabela 17), verifica-se que COT e COM apresentaram correlação positiva com o nitrogênio total (NT). Entre COT e NT, o valor do coeficiente de correlação de Pearson (r) na área de Latossolo foi de 0,58, o que indica, com auxílio das análises de comparações de médias entre culturas de outono/inverno e de primavera, que o aporte de N no solo favoreceu o acúmulo de matéria orgânica. A correlação significativa entre NT e COM (r = 0,56) indica que o aporte de N no solo favoreceu o acúmulo de matéria orgânica humificada. A correlação entre NT e COP não foi significativa.

Os coeficientes de correlação de COT, NT, COP e COM com o grau de humificação determinado por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) sempre foram negativos, embora fossem baixos e não significativos a 5% de probabilidade. O valor

negativo é explicado pelo H_{FIL} inversamente proporcional ao COT. As frações solúveis em água e em água quente apresentaram correlação significativa positiva com o nitrogênio, embora a correlação com o COT não fosse significativa. Não houve correlação significativa a 5% entre a fração COP e as duas frações solúveis (CSA e CSA_q), ao passo que a fração COM apresentou correlação significativa com o CSA, embora o coeficiente fosse baixo. As correlações entre H_{FIL} e as duas frações solúveis foram baixas e apresentaram valores negativos, e somente a correlação com CSA_q foi significativa a 5% de probabilidade de erro.

O coeficiente de correlação significativo a 5% de 0,58 entre COT e NT, embora parcialmente, está de acordo com os resultados de comparações de médias. Isto pode ser explicado em parte pela contribuição da crotalaria através da fixação simbiótica de N, associada a sua maior massa de matéria seca. No entanto, como discutido anteriormente, é possível, neste solo, que as perdas de nitrogênio tenham sido altas, o que evitou que o valor do coeficiente de correlação tivesse um valor maior. O nitrogênio, entre as frações físicas, tendo apresentado correlação somente com a fração mineral, indica sua importância no acúmulo de matéria orgânica humificada. A ausência de correlação com o carbono orgânico particulado pode indicar uma decomposição mais rápida do material, com maiores perdas em curto prazo do resíduo depositado no solo.

Tabela 17. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os valores determinados nas análises de solo na camada de 0-0,10 m. COT (carbono orgânico total do solo), NT (nitrogênio total do solo), COP (carbono orgânico particulado), COM (carbono orgânico associado a minerais), H_{FIL} (grau de humificação) CSA (carbono solúvel em água) e CSA_q (carbono solúvel em água quente). Área de Latossolo, Botucatu, SP.

	COT	NT	COP	COM	H_{FIL}	CSA	CSA _q
COT	1,00						
NT	0,58*	1,00					
COP	0,52*	0,21	1,00				
COM	0,87*	0,56*	0,03	1,00			
H_{FIL}	-0,30	-0,28	-0,29	-0,19	1,00		
CSA	0,33	0,50*	0,07	0,34*	-0,22	1,00	
CSA _q	0,27	0,54*	0,27	0,16	-0,38*	0,46*	1,00

* Significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro

No entanto, a correlação significativa entre N total e as frações solúveis de carbono (CSA e CSA_q), frações muito lábeis, sugerem que maiores teores de

nitrogênio no solo favoreceram a formação de complexos orgânicos solúveis e, conseqüentemente, o metabolismo de comunidades microbianas que sintetizam matéria orgânica. No entanto, reitera-se novamente a ausência de diferenças significativas quanto aos valores de CSA e CSA_q no solo entre culturas de outono/inverno e de primavera nos testes de médias discutidos no item 6.1.4.

6.1.7. Análises de agregados do solo

Não houve interações entre rotações de culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 18) nem diferenças significativas na análise de agregados entre as culturas nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (tabela 19).

Tabela 18. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Área de Latossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	DMP	DMG	2 mm	IEA
0 a 0,10 m				
Outono (A)	0,2477	0,3065	0,2544	0,3096
Primavera (B)	0,4874	0,5408	0,3915	0,8798
A x B	0,8480	0,8350	0,8654	0,6802
CV _A (%)	6,93	16,39	8,68	3,88
CV _B (%)	7,78	18,02	9,49	4,24
0,10 a 0,20 m				
Outono (A)	0,1370	0,2213	0,1251	0,1680
Primavera (B)	0,8646	0,7539	0,9117	0,4328
A x B	0,4945	0,5009	0,3782	0,8002
CV _A (%)	8,93	15,98	12,44	2,80
CV _B (%)	6,35	12,86	8,65	2,37

Comparativamente, os valores apresentaram um pequeno decréscimo na profundidade de 0,10-0,20 m. Considerando-se as duas profundidades, as médias de diâmetro médio ponderado (DMP) estiveram entre 2,20 e 2,59 mm; as de diâmetro médio geométrico (DMG) entre 1,54 e 2,08; as proporções retidas na peneira de 2

mm entre 66 e 83% e do índice de estabilidade de agregados (IEA) entre 89 e 93% (tabela 18).

Tabela 19. Valores médios das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m na área de Latossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	DMP (mm)	DMG (mm)	2 mm (%)	IEA(%)
0 a 0,10 m				
Outono				
Braquiária	2,58 a	2,08 a	83,39 a	93,33 a
Sorgo granífero	2,43 a	1,82 a	79,41 a	90,50 a
Sorgo+Braquiária	2,48 a	1,92 a	77,44 a	92,31 a
Primavera				
Crotalária	2,43 A	1,84 A	77,25 A	91,85 A
Milheto	2,52 A	2,01 A	81,14 A	92,57 A
Sorgo forrageiro	2,53 A	1,98 A	81,85 A	91,72 A
Média geral	2,50	1,94	80,08	92,05
0,10 a 0,20 m				
Outono				
Braquiária	2,39 a	1,77 a	75,16 a	90,89 a
Sorgo granífero	2,19 a	1,54 a	66,25 a	89,15 a
Sorgo+Braquiária	2,36 a	1,77 a	73,54 a	91,99 a
Primavera				
Crotalária	2,33 A	1,72 A	72,05 A	91,21 A
Milheto	2,32 A	1,71 A	71,97 A	90,91 A
Sorgo forrageiro	2,29 A	1,65 A	70,92 A	89,91 A
Média geral	2,31	1,69	71,64	90,68

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Quanto aos dados de outono/inverno, foi possível notar, embora não tenha havido diferenças significativas entre as culturas, a tendência da braquiária, solteira ou consorciada, em favorecer a agregação (tabela 19). Garcia e Rosolem (2010), no ano de 2008, na mesma área experimental deste trabalho, encontraram valores semelhantes aos determinados na camada superficial deste experimento nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, verificando, porém, na camada de 0-5 cm, entre as culturas de outono/inverno, um maior valor de DMP no consórcio sorgo granífero + braquiária e um menor DMG com o uso do sorgo granífero solteiro. Espécies de braquiárias são recomendadas para o acúmulo de matéria seca. No entanto, a ausência de chuvas no outono/inverno em clima tropical pode

limitar o desenvolvimento das plantas e mitigar os seus efeitos sobre o acúmulo de MOS e a agregação do solo (TIMOSSI et al., 2007).

Garcia e Rosolem (2010) encontraram, entre as culturas de primavera, menor valor de DMP no solo cultivado com crotalária em comparação às gramíneas. Na camada de 5-10 cm, a presença da braquiária no outono/inverno e das gramíneas na primavera aumentaram o DMP e a proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm. Como na época, os autores também encontraram menor valor de COT com a crotalária em comparação às gramíneas na camada de 5-10 cm, as alterações de carbono orgânico proporcionadas por esta leguminosa no decorrer do tempo podem ter contribuído para que os valores de análises de agregados se tornassem equivalentes estatisticamente no presente trabalho.

Verificou-se, portanto, que as diferenças entre carbono orgânico total não foram correspondidas por diferenças significativas nas análises de agregados.

Cunha et al. (2011), em um Latossolo Vermelho de textura franco-arenosa, comparando crotalária e sorgo-vassoura em SSD em dois experimentos, um com milho no verão e outro com feijão das águas, não encontraram diferenças significativas na matéria orgânica do solo e na agregação do solo.

De modo geral, os elevados valores do índice de estabilidade de agregados, acima de 90%, são indicativos de que o solo encontra-se bem estruturado.

6.1.8. Produtividade de grãos de soja

Não houve interações entre culturas de outono/inverno e de primavera na produtividade de grãos de soja (tabela 20).

Na safra 2011/12, verificou-se uma produtividade média de grãos de aproximadamente 3100 kg ha⁻¹. Somente houve efeito das culturas de primavera, com a soja cultivada após milheto superando as demais culturas em pouco mais de 250 kg ha⁻¹ (tabela 21).

Na safra de 2012/13, a produtividade de grãos de soja foi aproximadamente de 2560 kg ha⁻¹. Somente houve diferenças significativas entre culturas de outono/inverno, em que o sorgo granífero esteve associado à menor produtividade de soja comparativamente aos tratamentos envolvendo braquiária (tabela 21). A produtividade

média de soja envolvendo o cultivo do sorgo granífero no outono/inverno foi de 2472 kg ha⁻¹, inferior em 161 e 107 kg ha⁻¹ em comparação ao consórcio sorgo + braquiária e braquiária solteira, respectivamente. A produtividade na safra 2012/2013 foi inferior em comparação com a obtida na safra 2011/12, e pode ser explicada em função do ataque de lagartas (*Helicoverpa* spp.) extremamente agressivas e de difícil controle, e pela escassez de chuvas no mês de janeiro no ano de 2013.

As produtividades não seguiram o mesmo comportamento nos dois anos avaliados e, aparentemente, não estiveram relacionadas com a quantidade e a qualidade da matéria orgânica nem com a agregação do solo.

Tabela 20. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) da produtividade de grãos de soja nas safras 2011/12 e 2012/13. Área de Latossolo, Botucatu, SP.

Cultura	Produtividade da soja	
	2011/2012	2012/2013
Outono (A)	0,1184	0,0077
Primavera (B)	0,0318	0,8695
A x B	0,7633	0,2230
CV _A (%)	11,04	4,18
CV _B (%)	9,00	4,63

Tabela 21. Produtividade de grãos de soja nas safras 2011/12 e 2012/13. Área de Latossolo, Botucatu, SP.

Cultura	Produtividade de soja (kg ha ⁻¹)	
	2011/2012	2012/2013
Outono		
Braquiária	3306,42 a	2579,23 b
Sorgo granífero	3030,83 a	2472,45 a
Sorgo+Braquiária	2983,00 a	2633,35 b
Primavera		
Crotalária	3033,25 B	2572,71 A
Milheto	3296,25 A	2564,29 A
Sorgo forrageiro	2990,75 B	2548,04 A
Média Geral	3106,75	2561,68

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

6.2. Experimento II

6.2.1. Carbono orgânico e nitrogênio totais do solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Da mesma forma como observado para o experimento I, não houve interação significativa entre os fatores de variação para os resultados de NT, COT, COP, COM, C/N e COP/COT do solo nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade (tabela 22). Assim, os dados não foram desdobrados. Também, do mesmo modo como o experimento I, verificou-se em geral maior efeito das espécies cultivadas na primavera em comparação às de outono/inverno pelos menores valores de probabilidade de F. Os teores médios de COT decresceram de 19,1 g kg⁻¹ na camada de 0-0,10 m para 14,65 g kg⁻¹ na camada de 0,10-0,20 m, estabilizando-se em valores próximos a 12 g kg⁻¹ nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (tabela 23). As frações COP e COM apresentaram comportamento similares, tendo o COP decrescido de 3,13 g kg⁻¹ em 0-0,10 m para 1,28 g kg⁻¹ em 0,10-0,20 m, estabilizando-se em valores próximos a 0,8 g kg⁻¹ nas camadas seguintes, ao passo que o COM decresceu de 15,94 g kg⁻¹ para 13,38 g kg⁻¹, e estabilizou-se próximo a 11,5 g kg⁻¹ nas duas últimas camadas (tabela 23). A diminuição do COT e das frações COP e COM em profundidade era esperada em função do maior aporte de resíduos vegetais na superfície do solo no Sistema Semeadura Direta.

Avaliando os efeitos isolados dos fatores de variação, verificou-se, de acordo com a tabela 23 que, entre as culturas de outono/inverno, o triticale promoveu maior teor de carbono orgânico total no solo na camada de 0-0,10 m, sendo este maior teor influenciado pela fração associada a minerais.

Já na comparação entre os manejos de primavera, constatou-se que a crotalária foi uma das espécies que mais aumentaram os teores de N total no solo, não diferindo do milho na camada de 0-0,10 e 0,40-0,60 m, do pousio e do sorgo forrageiro na camada de 0,10-0,20 m, do pousio e do milho na camada de 0,20-0,40 m (tabela 23). Comportamento semelhante ao do N total no solo foi encontrado para COT nas culturas de primavera, o que evidencia uma forte relação entre a disponibilidade de N e os teores de COT no solo. Os aumentos nos teores de COT ocorreram tanto por aumento na fração particulada como na fração associada a minerais, com exceção da camada de 0,20-0,40 m, em que não houve diferença entre os tratamentos na fração COM.

Os aumentos de carbono orgânico total e associado a minerais na camada de 0-0,10 m com o triticale podem ter sido consequência da maior massa de matéria seca (tabela 2), de uma maior quantidade de raízes, e também do sistema radicular fasciculado (CALONEGO; ROSOLEM, 2010), favorecendo o acúmulo de MOS em comparação ao girassol. Maior relação C/N no solo também foi encontrada com triticale, embora a diferença (0,27) para o valor encontrado no manejo com girassol tenha sido pequena (tabela 24). Estas duas culturas não diferiram quanto ao teor de N total no solo.

Tabela 22. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) dos teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), relação C/N do solo e relação COP/COT nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	NT	COT	COP	COM	C/N	COP/COT
0 a 0,10 m						
Outono (A)	0,120	0,008	0,462	0,010	0,007	0,562
Primavera (B)	0,003	0,017	0,025	0,100	0,787	0,277
A x B	0,052	0,586	0,958	0,427	0,133	0,649
CV _A (%)	2,82	1,84	10,88	2,81	3,17	11,37
CV _B (%)	4,92	5,69	10,82	6,29	2,71	9,96
0,10 a 0,20 m						
Outono (A)	0,582	0,655	0,521	0,731	0,136	0,682
Primavera (B)	0,029	0,031	0,020	0,062	0,648	0,094
A x B	0,652	0,646	0,303	0,599	0,149	0,230
CV _A (%)	3,45	3,47	11,07	3,39	3,88	10,01
CV _B (%)	5,46	6,45	14,00	6,65	2,73	12,34
0,20 a 0,40 m						
Outono (A)	0,943	0,986	0,783	0,972	0,930	0,683
Primavera (B)	0,147	0,188	0,068	0,295	0,826	0,302
A x B	0,967	0,476	0,584	0,473	0,391	0,534
CV _A (%)	8,19	4,02	3,28	4,53	5,07	7,44
CV _B (%)	7,43	6,36	14,05	6,80	5,17	15,27
0,40 a 0,60 m						
Outono (A)	0,803	0,183	0,402	0,249	0,190	0,634
Primavera (B)	0,012	0,068	0,053	0,167	0,061	0,080
A x B	0,142	0,430	0,392	0,647	0,931	0,518
CV _A (%)	6,01	8,31	18,33	9,13	5,60	19,31
CV _B (%)	4,21	5,61	30,99	5,48	5,95	28,94

Tabela 23. Teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (COM) no solo, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	-----g kg ⁻¹ -----			
	NT	COT	COP	COM
0 a 0,10 m				
Outono				
Girassol	1,86 a	18,55 b	3,08 a	15,47 b
Triticale	1,92 a	19,60 a	3,18 a	16,42 a
Primavera				
Crotalária	1,96 A	19,82 A	3,41 A	16,41 A
Milheto	1,95 A	19,50AB	3,24 AB	16,26 A
Pousio	1,79 B	18,16 C	2,89 C	15,27 B
Sorgo forrageiro	1,85 B	18,81 BC	2,98 BC	15,83 AB
Média Geral	1,89	19,10	3,13	15,94
0,10 a 0,20 m				
Outono				
Girassol	1,56 a	14,58 a	1,26 a	13,32 a
Triticale	1,54 a	14,73 a	1,30 a	13,43 a
Primavera				
Crotalária	1,61 A	15,21 A	1,45 A	13,76 A
Milheto	1,48 B	13,85 B	1,16 B	12,69 B
Pousio	1,57 A	14,99 A	1,25 B	13,74 A
Sorgo forrageiro	1,54 AB	14,56 AB	1,24 B	13,32AB
Média Geral	1,55	14,65	1,28	13,38
0,20 a 0,40 m				
Outono				
Girassol	1,36 a	12,48 a	0,82 a	11,65 a
Triticale	1,36 a	12,49 a	0,82 a	11,66 a
Primavera				
Crotalária	1,41 A	12,75 A	0,90 A	11,85 A
Milheto	1,39 AB	12,74 A	0,81 AB	11,92 A
Pousio	1,36 AB	12,48 AB	0,83 AB	11,65 A
Sorgo forrageiro	1,27 B	11,88 B	0,74 B	11,14 A
Média Geral	1,37	12,48	0,82	11,66
0,40 a 0,60 m				
Outono				
Girassol	1,18 a	11,88 a	0,76 a	11,12 a
Triticale	1,19 a	12,32 a	0,83 a	11,49 a
Primavera				
Crotalária	1,22 A	12,07 AB	0,73 AB	11,35 AB
Milheto	1,21 A	12,49 A	0,85 AB	11,64 A
Pousio	1,15 B	11,55 B	0,64 B	10,90 B
Sorgo forrageiro	1,15 B	12,29 A	0,95 A	11,34 AB
Média Geral	1,18	12,10	0,80	11,30

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Com relação ao nitrogênio nas culturas de primavera, verificou-se que a crotalária destacou-se por proporcionar o maior teor de N total no solo nas 4 profundidades, ou isoladamente, ou não diferindo estatisticamente de outra cultura em rotação (tabela 23).

O efeito sobre o N foi mais acentuado na camada de 0-0,10 m, em que o solo sob crotalária diferiu de duas rotações (sorgo forrageiro e pousio). Neste solo, ao contrário do experimento I, ficou mais evidente a retenção de N no solo fixado simbioticamente. Isto pode ser explicado pelo teor muito alto de argila do Nitossolo, favorecendo a proteção do N e evitando perdas. Nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, a ausência de efeito da crotalária em comparação ao pousio pode estar relacionada ao menor crescimento de raízes nestas camadas (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

Contrariamente, crotalária e milho se destacaram no efeito sobre o N total do solo na camada de 0,40-0,60 m, sendo estas as culturas cujos resíduos apresentaram maior teor de N (tabela 3) e aporte de matéria seca (tabela 2), resultando assim em um aporte de maior quantidade N (tabela 4). Assim, é possível que na camada de 0,40-0,60 m tenha havido acúmulo de N proveniente das camadas mais superficiais.

O teor de carbono orgânico total apresentou comportamento semelhante ao N total, embora algumas diferenças tenham sido observadas. Verificou-se, de maneira geral, nas 4 camadas, que a crotalária se destacou por estar sempre associada a maiores valores de COT do solo. O menor teor na camada superficial com o uso do pousio pode ser explicado pela ausência de aporte de resíduos. Na camada superficial, entre as gramíneas de primavera, somente o solo conduzido com sorgo forrageiro foi estatisticamente inferior ao com crotalária quanto ao COT, embora sorgo forrageiro e milho apresentem padrão de crescimento radicular semelhante.

Nas demais camadas, com exceção da camada de 0,20-0,40 m, onde no solo cultivado com milho se verificou maior COT e N total, as duas gramíneas de primavera não diferiram entre si quanto ao COT. Este comportamento indica que, embora estas gramíneas tenham atuado de maneira semelhante quanto à dinâmica do carbono orgânico neste solo, o maior teor de N total na camada de 0,20-0,40 m favoreceu o aumento de COT no manejo com milho comparativamente ao sorgo forrageiro.

Calonego e Rosolem (2008), embora não tivessem obtido diferenças estatísticas entre as culturas de outono/inverno e de primavera, obtiveram na

camada mais superficial do solo teores médios de matéria orgânica ligeiramente superiores com o triticale e a crotalária, corroborando os resultados observados no presente trabalho.

Rigon (2013) verificou, na mesma área de Nitossolo deste experimento, que o acúmulo médio de N na palhada de crotalária, de 205 kg ha⁻¹, foi o maior entre as culturas de primavera, tendo o milho e o sorgo forrageiro acumulado 158 e 120 kg ha⁻¹, respectivamente. Este maior acúmulo de N pela crotalária está de acordo com as quantidades determinadas neste trabalho (tabela 4).

Observa-se, de acordo com a caracterização de carboidratos estruturais das plantas em rotação (tabela 3), que a crotalária apresenta alto teor de N e de lignina, o que pode ser favorável ao acúmulo de matéria orgânica na presente condição sem adubação nitrogenada, levando-se em conta, por um lado, as entradas de N via fixação simbiótica, possibilitando a atividade microbiana e, por outro, o aporte de quantidades relativamente altas de lignina, principal fonte vegetal de cadeias polifenólicas para a síntese de matéria orgânica (GAMA-RODRIGUES et al., 2005; STEVENSON, 1994).

Segundo Conceição et al. (2005), a adubação nitrogenada em sistemas através do uso de leguminosas fixadoras de N pode incrementar a fitomassa das culturas e o estoque de N do solo, favorecendo o aumento do estoque de matéria orgânica. Assim, de acordo com a discussão sobre o experimento I no item 6.1.1, o aporte de N pela crotalária pode também ter favorecido o acúmulo de carbono orgânico neste experimento.

Percebe-se também neste solo, ao contrário do solo do experimento I, onde não foram verificados efeitos sobre o COP, que o solo cultivado com crotalária destacou-se no acúmulo de carbono orgânico particulado até a camada de 0,20-0,40 m, mas este efeito foi mais pronunciado nas duas primeiras camadas. Este efeito foi bem evidente quando se observaram os maiores valores da relação COP/COT da crotalária na camada de 0,10-0,20 m (tabela 24). Na camada superficial, o milho também favoreceu o acúmulo de COP, o que pode ser explicado pelo maior teor de N no material e pela maior produção de matéria seca em relação ao sorgo forrageiro. Na camada de 0,40-0,60 m, o maior teor de COP do solo com sorgo forrageiro em comparação ao pousio pode indicar a influência da deposição de raízes em profundidade. Como na camada de 0,40-0,60 m a atividade microbiana é menor, o processo de decomposição é mais lento, favorecendo-se o acúmulo de COP pelas culturas com maior capacidade de deposição de raízes em profundidade.

Tabela 24. Relação C/N do solo e relação carbono orgânico particulado/carbono orgânico total (COP/COT) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	C/N	COP/COT (%)
0 a 0,10 m		
Outono		
Girassol	9,96 b	16,57 a
Triticale	10,23 a	16,23 a
Primavera		
Crotalária	10,10 A	17,27 A
Milheto	10,01 A	16,58 A
Pousio	10,12 A	15,95 A
Sorgo forrageiro	10,14 A	15,81 A
Média Geral	10,10	16,40
0,10 a 0,20 m		
Outono		
Girassol	9,38 a	8,63 a
Triticale	9,56 a	8,78 a
Primavera		
Crotalária	9,47 A	9,55 A
Milheto	9,37 A	8,39 B
Pousio	9,54 A	8,36 B
Sorgo forrageiro	9,48 A	8,52 B
Média Geral	9,47	8,71
0,20 a 0,40 m		
Outono		
Girassol	9,17 a	6,63 a
Triticale	9,16 a	6,56 a
Primavera		
Crotalária	9,06 A	7,08 A
Milheto	9,19 A	6,38 A
Pousio	9,17 A	6,63 A
Sorgo forrageiro	9,26 A	6,27 A
Média Geral	9,17	6,60
0,40 a 0,60 m		
Outono		
Girassol	10,10 a	6,37 a
Triticale	10,39 a	6,67 a
Primavera		
Crotalária	9,91 B	5,98 B
Milheto	10,32 AB	6,84 AB
Pousio	10,03 AB	5,55 B
Sorgo forrageiro	10,72 A	7,70 A
Média Geral	10,25	6,52

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Em todas as camadas de solo avaliadas, a ausência de diferenças de COP entre as duas gramíneas de primavera indicam, assim como para o COT, que atuaram de maneira semelhante, e que eventuais diferenças na quantidade de matéria seca, na qualidade do resíduo e nos sistemas radiculares não alteraram o aporte de COP.

Quanto ao carbono associado a minerais, crotalária e milho promoveram acúmulo de carbono nessa fração, comparativamente ao pousio, na camada de 0-0,10 m do solo (tabela 23). Nas camadas de solo seguintes, houve um comportamento semelhante ao da fração COP: quando houve diferenças, a crotalária sempre esteve presente no grupo de culturas que propiciaram maior teor de COM e não houve diferenças entre as gramíneas de primavera. Estes dados sugerem, de maneira geral, que o aporte de N pela crotalária favoreceu neste solo o acúmulo de carbono orgânico tanto na fração particulada quanto na fração associada a minerais, mais humificada.

Na camada de 0,40-0,60 m o cultivo do sorgo forrageiro promoveu uma maior relação COP/COT no solo, sem diferir do milho, muito provavelmente em função de um maior aporte de raízes nessa camada (tabela 24).

Quanto à relação C/N do solo (tabela 24) verificou-se menor valor com o cultivo de girassol em comparação ao triticale na camada de 0-0,10 m e com a crotalária em comparação ao sorgo forrageiro na camada 0,40-0,60 m.

De uma forma geral a relação C/N do solo se apresentou baixa, em torno de 10. Este valor foi inferior ao encontrado no solo do experimento I (Latosolo), muito em razão do maior teor de argila no Nitossolo, que favorece a proteção física da MOS em formas estáveis e humificadas, possibilitando assim maior acúmulo e menores perdas de nitrogênio. A relação C/N do solo alta com o cultivo de sorgo forrageiro, diferenciando-se em relação ao solo com crotalária na camada de 0,40-0,60 m pode ser justificada pelo seu maior teor de COP, através da maior deposição de raízes nesta camada. Isto é complementado pela maior relação COP/COT com o sorgo forrageiro nesta camada em comparação às rotações com crotalária e pousio. Levando-se em conta a ausência de diferenças entre sorgo forrageiro e milho, os resultados sugerem que a crotalária, comparativamente às gramíneas de primavera, possui um sistema radicular com menor capacidade de deposição de material particulado no solo em maiores profundidades, exercendo sua contribuição no aumento do carbono orgânico principalmente nas duas camadas superficiais.

6.2.2. Grau de humificação da matéria orgânica do solo

Não foram observadas interações entre as culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 25). Assim como verificado no experimento I, os valores de grau de humificação da matéria orgânica por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) aumentaram a partir da camada 0-0,10 m conforme o aumento da profundidade do solo, em decorrência do maior aporte de matéria orgânica lábil na superfície. Menores valores de H_{FIL} na camada 0-0,10 m foram encontrados com o cultivo de triticales (tabela 26), indicando matéria orgânica menos humificada, embora não tenha havido diferenças significativas de valores de COP entre triticales e girassol (tabela 23).

O menor grau de humificação do solo com triticales em comparação ao com girassol era esperado, tendo-se em vista o maior teor de COT com triticales, e pode ser explicado pela maior produção de matéria seca e pelas características do sistema radicular, que favorece a queda da proporção humificada em decorrência do aporte de material particulado (CALONEGO; ROSOLEM, 2010, SEGNINI, 2007). Entretanto, o triticales diferiu do girassol quanto ao COM e não ao COP. Embora isto tenha acontecido, é possível que neste fracionamento físico granulométrico seja incluída na fração associada a minerais matéria orgânica ainda não ligada às argilas, mas que é contabilizada como associada a minerais por não ser retida na peneira de 0,053 mm. Mas também o triticales pode ter favorecido diretamente o acúmulo de COM, tendo-se em vista os processos de ressíntese a partir dos resíduos depositados no solo (GUERRA et al., 2008).

Entre as plantas de primavera, com o cultivo de crotalária foi verificado menor H_{FIL} na camada de 0-0,10, o que evidencia a presença de matéria orgânica no solo com menor grau de humificação, provavelmente em razão dos maiores teores de COT. Na camada de 0,10-0,20 m a crotalária também esteve associada à MOS com menor grau de humificação, porém sem diferir do sorgo forrageiro e do pousio. O menor grau de humificação da MOS nesta camada com o uso da crotalária está de acordo com os maiores teores de COP apresentados na tabela 23 (item 6.2.1). Embora as rotações não tenham produzido efeito significativo na relação COP/COT do solo na camada superficial, verifica-se que a crotalária é a cultura cuja média numérica foi a maior.

Tabela 25. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	H_{FIL}			
	0 a 0,10 m	0,10 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m	0,40 a 0,60 m
Outono (A)	0,0454	0,2171	0,6809	0,6086
Primavera (B)	0,0206	0,1276	0,1683	0,0082
A x B	0,4178	0,3876	0,9959	0,7952
CV _A (%)	8,30	5,08	9,62	18,09
CV _B (%)	5,60	7,02	7,19	11,53

Tabela 26. Grau de humificação da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	0 a 0,10 m	0,10 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m	0,40 a 0,60m
Outono				
Girassol	1215,3 a	1464,9 a	1729,7 a	1665,0 a
Triticale	1102,7 b	1420,9 a	1703,2 a	1609,2 a
Primavera				
Crotalária	1090,5 B	1377,7 B	1647,9 B	1738,2 AB
Milheto	1170,6 A	1499,8 A	1686,4 AB	1566,8 BC
Pousio	1196,6 A	1454,3 AB	1777,6 A	1788,9 A
Sorgo forrageiro	1178,2 A	1439,9 AB	1754,1 AB	1454,6 C
Média Geral	1158,9	1442,9	1716,4	1637,1

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Na camada de 0,40-0,60 m verificou-se menor H_{FIL} no solo com o manejo com sorgo forrageiro, sem diferir do manejo com milho (tabela 26), o que comprova um aporte de resíduos vegetais e matéria orgânica leve nessa camada com essas culturas, sendo mais efetivas em reduzir o grau de humificação, possivelmente devido ao maior crescimento de raízes em profundidade de sistemas que envolvam estas espécies (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

A ausência de diferenças de H_{FIL} do solo entre as duas gramíneas de primavera nas 4 profundidades indica um comportamento semelhante no processo de humificação da MOS. Na camada de 0,40-0,60 m, o solo com crotalária, embora não tenha diferido do solo com milho, também não diferiu do pousio, indicando que seu efeito em

reduzir o grau de humificação restringiu-se às três camadas superiores, possivelmente devido ao seu crescimento radicular menos efetivo em maior profundidade.

6.2.3. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo

Não houve interações entre culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 27). As médias de carbono de biomassa microbiana na camada de 0-0,10 m variaram entre 235 e 300 mg kg⁻¹, com média geral de 259 mg kg⁻¹, ao passo que as médias de nitrogênio de biomassa microbiana variaram entre 18,5 e 26 mg kg⁻¹, sendo a média geral de 22,31 mg kg⁻¹ (tabela 28). Houve diferenças somente entre as culturas de primavera. Entre culturas de primavera, os maiores valores de carbono da biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) foram encontrados envolvendo crotalária, embora sem diferir do milheto, enquanto os menores valores de C_{BMS} foram encontrados com o sorgo forrageiro e o pousio escarificado (tabela 28). Houve diferença no nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N_{BMS}) entre as culturas de outono/inverno, com o triticales associado a um maior N_{BMS} (tabela 28). Entre as culturas de primavera não foram encontradas diferenças significativas quanto ao N_{BMS} .

Neste solo, o maior teor de N microbiano não esteve associado a um aumento significativo no carbono microbiano. Conforme discutido anteriormente, o maior aporte de matéria orgânica pode não estar necessariamente associado à maior biomassa microbiana, mas ser mais influenciada pela comunidade e pela atividade microbiana. Verifica-se neste caso, que o maior N microbiano associado ao triticales, ao propiciar maior teor de COT, pode indicar alterações na composição e na atividade dos microorganismos, de modo a favorecer o acúmulo de MOS. No entanto, ao contrário do solo do experimento I, a crotalária não aumentou os teores de N_{BMS} .

Não foram encontradas diferenças entre as culturas de outono/inverno ou de primavera na relação entre carbono da biomassa microbiana e carbono orgânico total do solo (C_{BMS}/COT), que apresentou média de 1,37% (tabela 28). Somente entre as culturas de outono/inverno foi encontrada diferença quanto à relação nitrogênio de biomassa microbiana/nitrogênio total do solo (N_{BMS}/NT), com o triticales sendo superior ao girassol (tabela 28). A maior proporção de N microbiano em relação ao N total indica que o triticales proporcionou ao solo melhor qualidade biológica em

comparação ao girassol. A relação C_{BMS}/COT média esteve abaixo de 2%, indicando que biomassa microbiana pode estar sob estresse. O valor N_{BMS}/NT do girassol (0,99%), abaixo de 1%, sugere que para esta cultura há um forte estresse na biomassa microbiana quanto ao aproveitamento do N do solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Tabela 27. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) do carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}), do nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}) e de suas relações com seus respectivos teores totais no solo (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	C_{BMS}	N_{BMS}	C_{BMS}/COT	N_{BMS}/NT
0 a 0,10 m				
Outono (A)	0,7861	0,0268	0,6443	0,0356
Primavera (B)	0,0792	0,6827	0,2822	0,4048
A x B	0,3402	0,2532	0,3275	0,7274
CV_A (%)	16,22	5,63	15,75	5,05
CV_B (%)	19,77	36,00	21,27	36,41

Tabela 28. Teores de carbono de biomassa microbiana do solo (C_{BMS}) e nitrogênio de biomassa microbiana do solo (N_{BMS}), e relações com seus respectivos teores totais (C_{BMS}/COT e N_{BMS}/NT) na camada de 0-0,10 m na área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	C_{BMS} (mg kg ⁻¹)	N_{BMS} (mg kg ⁻¹)	C_{BMS}/COT (%)	N_{BMS}/NT (%)
0 a 0,10 m				
Outono				
Girassol	257,41 a	18,55 b	1,39 a	0,99 b
Triticale	262,39 a	26,07 a	1,34 a	1,37 a
Primavera				
Crotalária	300,43 A	22,57 A	1,53 A	1,26 A
Milheto	264,95 AB	23,69 A	1,37 A	1,38 A
Pousio	239,44 B	19,16 A	1,32 A	1,06 A
Sorgo forrageiro	234,77 B	23,81 A	1,24 A	1,03 A
Média Geral	259,38	22,31	1,37	1,19

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Entre as culturas de primavera, o maior teor de carbono da biomassa microbiana do solo pode estar relacionado ao maior aporte de N total no solo. Verifica-se que o solo sob crotalária, com maior C_{BMS} em comparação ao sorgo forrageiro e ao pousio, seguiu o mesmo comportamento quanto ao N total e ao COT. Assim, os

maiores teores de carbono e nitrogênio total estiveram associados ao maior C_{BMS} . O maior C_{BMS} pode ter favorecido o acúmulo de matéria orgânica. Estes resultados estão de acordo com os observados por Gama-Rodrigues et al. (2005) que, ao avaliarem solos em ambientes com diferentes teores de argila, relataram o aumento do carbono de biomassa microbiana em solos com maiores teores de nitrogênio total. Neste solo, ao contrário do experimento I, a ausência de diferenças entre culturas de primavera quanto ao nitrogênio da biomassa microbiana não era esperada, devido aos maiores teores de N total no solo com o cultivo da leguminosa e do milho.

Embora os resultados de carbono e nitrogênio da BMS possam ser utilizados para a discussão, estes dados referem-se somente a uma única coleta após a soja. Como a biomassa microbiana pode ser muito sensível a variações no ambiente, como alterações na temperatura e umidade do solo, além das próprias culturas de cobertura, é recomendável, para um diagnóstico mais preciso, uma maior frequência de avaliações no ano, envolvendo coletas durante a condução de todas as culturas em rotação.

6.2.4. Carbono solúvel em água e em água quente

Não houve interações entre as culturas de outono/inverno e de primavera nas duas frações solúveis (tabela 29) nem diferenças significativas nos teores de carbono solúvel em água nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m do solo (tabela 30). Os teores médios de carbono solúvel em água na camada superficial e subsuperficial foram aproximadamente 34 e 22 mg kg^{-1} , respectivamente. Nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m os teores médios de carbono solúvel em água quente foram de aproximadamente 118 e 68 mg kg^{-1} , respectivamente.

Houve diferenças significativas quanto ao carbono solúvel em água quente nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, somente entre culturas de primavera. Na camada superficial, o solo com milho apresentou média superior aos com as demais culturas, enquanto na camada subsuperficial, milho e sorgo forrageiro proporcionaram médias superiores às encontradas com crotalária e pousio (tabela 30). Segundo Calvo et al. (2010), milho e sorgo são amplamente utilizados na entressafra das culturas de verão no Brasil pela alta adaptabilidade à deficiência hídrica, elevada produção de fitomassa e grande capacidade de reciclar nutrientes.

Tabela 29. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) de carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	0 a 0,10m		0,10 a 0,20 m	
	CSA	CSA _q	CSA	CSA _q
Outono (A)	0,3318	0,8598	0,5832	0,0907
Primavera (B)	0,9360	0,0223	0,5768	0,0774
A x B	0,9222	0,1336	0,3964	0,8813
CV _A (%)	14,44	33,79	8,15	14,57
CV _B (%)	19,63	9,83	22,99	15,90

Tabela 30. Teores de carbono solúvel em água (CSA) e carbono solúvel em água quente (CSA_q) no solo, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	0 a 0,10 m		0,10 a 0,20 m	
	CSA	CSA _q	CSA	CSA _q
-----mg kg ⁻¹ -----				
<i>Outono</i>				
Girassol	32,53 a	119,80 a	21,65 a	71,46 a
Triticale	34,87 a	123,10 a	22,70 a	64,39 a
<i>Primavera</i>				
Crotalária	33,25 A	113,80 B	24,52 A	61,20 B
Milheto	32,99 A	134,52 A	22,16 A	73,67 A
Pousio	33,69 A	116,18 B	20,93 A	63,50 B
Sorgo forrageiro	34,87 A	121,31 B	21,10 A	73,34 A
<i>Média Geral</i>	33,79	117,73	21,92	68,18

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Considerando-se as duas camadas analisadas, estes resultados indicam que as gramíneas, principalmente o milheto, por suas raízes fasciculadas mais finas e numerosas ou exsudatos liberados pelo sistema radicular, favoreceram o acúmulo de formas lábeis solúveis de matéria orgânica. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Pivetta et al. (2011), que constataram, na mesma área experimental de Nitossolo, que o sistema radicular da soja foi favorecido pelo cultivo do milheto e do sorgo forrageiro na primavera, o que pode ter contribuído para as diferenças de carbono solúvel em água quente encontradas, uma vez que a coleta de solo foi realizada após a soja. Outro possível fator que pode ter favorecido o maior teor de carbono solúvel no solo a partir do cultivo destas duas culturas de primavera seria a menor perda de N por lixiviação em

plantas de ciclo fotossintético C_4 por unidade de fitomassa, conforme as avaliações de Rosolem et al. (2005). As perdas mais rápidas de N na superfície dificultariam as transformações envolvendo formas solúveis de carbono, visto que são muito ativas no sistema solo-planta (KARAVANOVA, 2013).

Em comparação ao solo do experimento I, onde não houve diferenças significativas, o maior teor de argila pode ter influenciado o efeito das culturas sobre estas frações solúveis. É maior a probabilidade de que o efeito sobre esta fração seja de curto prazo, sendo facilmente degradada, principalmente em solos menos argilosos e com menos matéria orgânica, onde há menos sítios de sorção (MARSCHNER; KALBITZ, 2003).

6.2.5. Análises de correlação

Na camada de 0-0,10 m, entre COT e N total do solo, o coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,90$) foi maior do que no experimento I, o que indica forte correlação e, com auxílio das análises de comparações de médias entre culturas de outono/inverno e de primavera, que o aporte de N no solo favoreceu o acúmulo de matéria orgânica (tabela 31). As correlações significativas entre N total e carbono associado a minerais ($r = 0,86$) indicam que o aporte de N no solo favoreceu o acúmulo de matéria orgânica humificada (tabela 31). A correlação entre N total e o carbono orgânico particulado ($r = 0,55$), contrariamente ao experimento I, foi significativa, embora tenha sido menor que a fração associada a minerais. A correlação muito alta entre COT e COM, assim como no experimento I, demonstra a grande influência que esta fração exerce na composição da matéria orgânica do solo.

O grau de humificação determinado por fluorescência induzida a laser (H_{FIL}) apresentou correlação negativa significativa com COT, NT, COP e COM, (tabela 31), o que não foi verificado no experimento I. As frações solúveis em água e em água quente (CSA e CSA_q) apresentaram correlação positiva com o carbono orgânico total e o nitrogênio total. Não houve correlação significativa entre a fração COP e as duas frações solúveis (CSA e CSA_q), ao passo que a fração COM apresentou correlação positiva significativa com o CSA e o CSA_q , embora os coeficientes fossem baixos. As correlações

entre H_{FIL} e as frações solúveis (CSA e CSA_q) sempre foram baixas e apresentaram valores negativos, mas não foram significativas (tabela 31).

Tabela 31. Coeficientes de correlação de Perason (r) entre os valores determinados nas análises de solo na camada de 0-0,10 m. COT (carbono orgânico total do solo), NT (nitrogênio total do solo), COP (carbono orgânico particulado), COM (carbono orgânico associado a minerais), CSA (carbono solúvel em água) e CSA_q (carbono solúvel em água quente). Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

	COT	NT	COP	COM	H_{FIL}	CSA	CSA_q
COT	1,00						
NT	0,90*	1,00					
COP	0,61*	0,55*	1,00				
COM	0,96*	0,86*	0,37	1,00			
H_{FIL}	-0,59*	-0,55*	-0,46*	-0,54*	1,00		
CSA	0,48*	0,46*	0,35	0,45*	-0,30	1,00	
CSA_q	0,44*	0,44*	0,28	0,43*	-0,16	0,45*	1,00

* Significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro

Ao contrário do experimento I, verificou-se que o COT e o NT apresentaram correlações significativas com todas as análises incluídas (tabela 31). O coeficiente de correlação entre COT e NT, muito maior do que o encontrado para a área de Latossolo, também significativo, indica novamente a tendência de aumento de matéria orgânica do solo com o aporte de N pelas rotações de culturas. A correlação significativa entre o NT e o COP, que não foi verificada no experimento I, é explicada provavelmente pela contribuição da crotalária para esta fração neste experimento.

É observada também a forte correlação entre NT e COM, maior do que no experimento I. Aparentemente, o aumento de sítios de retenção neste solo favoreceu as correlações entre nitrogênio e carbono orgânico. A ocorrência de correlações significativas entre COT e NT; entre COT e suas frações físicas (COP e COM); e entre NT e as frações físicas do COT (COP e COM) estão de acordo com os resultados encontrados por Conceição et al. (2005). Estes autores concluíram que a fração particulada da MOS é mais sensível em detectar os impactos dos sistemas de manejo do solo. No entanto, como pode ser verificado no presente trabalho, a MOS associada a minerais também pode ser afetada pelo manejo do solo.

A correlação negativa entre N total e H_{FIL} sugere que o aporte de N no solo, ao favorecer a produção de matéria seca, diminui a proporção de matéria orgânica humificada, aumentando a proporção de formas mais lábeis.

As correlações negativas significativas entre o H_{FIL} e as duas frações físicas do carbono (COP e COM), indicam que o efeito da redução do H_{FIL} com o aumento do COT ocorreu tanto na fração particulada como na mineral. Assim, é possível afirmar que neste solo o aumento tanto de COM quanto de COP reduziram a proporção humificada da MOS determinada pelo método de fluorescência induzida à laser, o que também foi verificado na correlação entre COT e H_{FIL} .

As frações de carbono solúveis em água e em água quente apresentaram correlações significativas com o carbono total, nitrogênio total e carbono associado a minerais. Novamente, fica evidente neste solo, em comparação ao experimento I (tabela 19), o efeito dos maiores teores de argila e de matéria orgânica como sítios de retenção destas frações solúveis. Como o carbono orgânico total apresentou uma correlação muito alta com o nitrogênio total, o aumento de nitrogênio também favoreceu, conseqüentemente, o aumento dos teores das frações solúveis em água e em água quente no solo.

6.2.6. Análises de agregados do solo

Não se verificaram interações entre as culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 32). De acordo com as análises de estabilidade de agregados, verificou-se que, entre os manejos de primavera, a crotalaria promoveu menor DMG e DMP no solo em comparação ao sorgo forrageiro, na camada de 0-0,10 m (tabela 33). Nesta mesma camada, o manejo com crotalaria também resultou em menores valores de IEA em relação ao pousio e ao sorgo forrageiro, revelando-se uma espécie com menor capacidade de estruturação do solo.

Os valores das análises de agregados apresentaram um pequeno decréscimo na profundidade de 0,10-0,20 m (tabela 33). Considerando-se as duas profundidades, as médias de DMP estiveram entre 2,66 e 2,84 mm; as de DMG entre 2,29 e 2,63 mm; as proporções retidas na peneira de 2 mm entre 84 e 93%; o IEA entre 95,5 e 97,7% (tabela 33).

Tabela 32. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2013.

Cultura	DMP	DMG	2 mm	IEA
0 a 0,10 m				
Outono (A)	0,3581	0,2240	0,4550	0,1925
Primavera (B)	0,0826	0,0456	0,1048	0,0530
A x B	0,3518	0,3559	0,3498	0,5479
CV _A (%)	2,06	4,60	3,04	1,44
CV _B (%)	4,39	9,67	6,20	1,74
0,10 a 0,20 m				
Outono (A)	0,9064	0,6747	0,9908	0,5509
Primavera (B)	0,6729	0,7514	0,6033	0,9423
A x B	0,4383	0,4413	0,4279	0,4306
CV _A (%)	3,37	6,38	7,30	0,98
CV _B (%)	4,68	10,37	6,82	1,98

Ao contrário do solo do experimento I, onde não foram encontradas diferenças significativas, as diferenças encontradas na camada superficial do Nitossolo, em que os valores das análises de agregados de solo com o manejo do sorgo forrageiro foram superiores aos com crotalária em todas as análises, indicaram que o sistema radicular fasciculado do sorgo forrageiro contribuiu mais para a agregação do que o aporte de matéria orgânica da crotalária.

No entanto, as diferenças nas análises de agregados foram pequenas. Os altos valores de IEA (entre 95 e 97%) indicam que o solo encontra-se bem estruturado em geral (tabela 33). Calonego e Rosolem (2010), na mesma área experimental e empregando as mesmas rotações de culturas, observaram que os sistemas triticales/milheto e triticales/sorgo forrageiro foram os que apresentaram maior densidade de comprimento radicular e massa de matéria seca de raízes, em comparação aos sistemas que envolveram crotalária na primavera. Calonego e Rosolem (2008) observaram, também na mesma área experimental, que o triticales aumentou a proporção de agregados maiores do que 2 mm na camada de 0 a 0,05 m, atribuindo este efeito às raízes de maior densidade e com distribuição mais uniforme, facilitando a distribuição de exsudatos. Quanto aos sistemas adotados na primavera, os autores concluíram que o manejo mecânico da compactação do solo com escarificador e ausência de plantas de cobertura promoveu

redução da estabilidade dos agregados na camada de 0,05 a 0,10 m. No entanto, após três anos de condução do experimento, verificaram que a desestruturação do solo foi recuperada.

Tabela 33. Valores médios das análises de agregados: diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), proporção de agregados retidos na peneira de 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Área de Nitossolo, Botucatu, 2012.

Cultura	DMP (mm)	DMG (mm)	2 mm (%)	IEA(%)
0 a 0,10 m				
<i>Outono</i>				
Girassol	2,76 a	2,44 a	89,98 a	96,51 a
Triticale	2,80 a	2,51 a	91,32 a	97,25 a
<i>Primavera</i>				
Crotalária	2,70 B	2,31 B	87,06 B	95,54 B
Milheto	2,79 AB	2,51 AB	91,26 AB	97,01 AB
Pousio	2,78 AB	2,52 AB	90,78 AB	97,20 A
Sorgo forrageiro	2,84 A	2,63 A	93,50 A	97,77 A
<i>Média geral</i>	2,78	2,49	90,64	96,88
0,10 a 0,20 m				
<i>Outono</i>				
Girassol	2,68 a	2,32 a	85,38 a	96,16 a
Triticale	2,68 a	2,35 a	85,41 a	96,55 a
<i>Primavera</i>				
Crotalária	2,68 A	2,32 A	85,67 A	96,11 A
Milheto	2,72 A	2,41 A	87,56 A	96,63 A
Pousio	2,66 A	2,29 A	84,54 A	96,24 A
Sorgo forrageiro	2,65 A	2,31 A	83,80 A	96,44 A
<i>Média geral</i>	2,68	2,33	85,39	96,36

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro em uma mesma profundidade de solo, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

Assim, os altos valores encontrados na avaliação do pousio escarificado neste trabalho, tendo a última escarificação ocorrido no ano de 2009, refletem os resultados encontrados anteriormente por Calonego e Rosolem (2008). Verifica-se que os resultados de carbono solúvel em água e de análises de agregados apresentaram comportamento parecido, com as gramíneas destacando-se comparativamente à crotalária na primavera. Neves et al. (2006) observaram o aumento da quantidade de agregados estáveis no solo com o aumento do carbono solúvel em água quente, sugerindo que o CSA_q também apresenta função na manutenção da agregação do solo.

6.2.7. Produtividade de grãos de soja

Na safra 2011/2012, em decorrência da interação significativa entre as culturas de outono/inverno e de primavera (tabela 34), as comparações de médias foram desdobradas. Verificou-se na safra 2011/12 que não houve diferença entre as culturas de inverno quanto à produtividade da soja. Entre as culturas de primavera, a soja após milho, embora não diferindo do manejo com sorgo forrageiro, apresentou a menor produtividade quando a cultura de outono/inverno foi o girassol. No entanto, a soja apresentou a menor produtividade quando foi adotado o sorgo forrageiro na primavera, embora sem diferir da crotalária, quando a rotação de outono/inverno foi o triticale (tabela 35).

Na safra 2012/13, não houve interação entre as rotações de outono/inverno e de primavera, não se desdobrando os dados (tabela 34). A produtividade de grãos de soja apresentou média aproximada de 3115 kg ha⁻¹ (tabela 36).

A produtividade média da soja após o cultivo do milho, de 2910 kg ha⁻¹, foi inferior em 293 kg ha⁻¹ em comparação ao manejo com crotalária, que esteve associado ao maior valor de produtividade de soja. No entanto, não houve diferenças de produtividade de soja entre os manejos com crotalária, sorgo forrageiro e pousio (tabela 35).

Quanto ao pousio, sobre o qual se realiza periodicamente a operação de escarificação, nos primeiros três anos de avaliação deste experimento, Calonego e Rosolem (2010) verificaram que a escarificação aumentou a produtividade da soja nos primeiros anos após a realização deste manejo. Porém, com o passar dos anos não constataram diferenças em comparação às produtividades obtidas em áreas cultivadas com plantas de cobertura.

De acordo com os dados, não se verificou neste trabalho um comportamento regular na produtividade de soja nos dois anos de avaliação, não sendo possível estabelecer uma relação com as diferenças encontradas quanto ao nitrogênio e ao carbono orgânico do solo.

Tabela 34. Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) da produtividade de grãos de soja nas safras 2011/12 e 2012/13. Área de Nitossolo, Botucatu, SP.

Cultura	Produtividade da soja (kg ha ⁻¹)	
	2011/2012	2012/2013
Outono (A)	0,5891	0,7201
Primavera (B)	0,0425	0,0001
A x B	0,0312	0,6049
CV _A (%)	18,08	4,28
CV _B (%)	9,53	3,57

Tabela 35. Produtividade de grãos de soja na safra 2011/12. Área de Nitossolo, Botucatu, SP.

Cultura	Produtividade da soja (kg ha ⁻¹)				
	Crotalária	Milheto	Pousio	Sorgo forrageiro	Média
Girassol	3091,62 Aa	2508,22 Ab	3139,32 Aa	2871,94 Aab	2902,77
Triticale	2871,96 Aab	2967,02 Aa	2939,41 Aa	2494,93 Ab	2818,33
Média	2981,79	2737,62	3039,36	2683,44	2860,55

Médias seguidas de letras distintas, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 36. Produtividade de grãos de soja na safra 2012/13. Área de Nitossolo, Botucatu, SP.

Cultura	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Outono	
Girassol	3106,15 a
Triticale	3124,72 a
Primavera	
Crotalária	3203,37 A
Milheto	2910,03 B
Pousio	3186,70 A
Sorgo forrageiro	3161,64 A
Média Geral	3115,43

Letras iguais na coluna para cada fator de variação não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade de erro, minúsculas entre culturas de outono/inverno e maiúsculas entre culturas de primavera.

7. CONCLUSÕES

De forma geral, os dois experimentos apresentaram resultados consistentes. Considerando-se as hipóteses levantadas, verificou-se que:

a) A qualidade da matéria orgânica do solo foi influenciada em suas frações mais e menos recalcitrantes pelas culturas em rotação em Sistema Semeadura Direta, principalmente pelas de primavera, tanto no Latossolo como no Nitossolo, tendo seus diversos compartimentos importância para aumentar o seu teor final no solo.

b) Os teores de matéria orgânica do solo foram influenciados pelas culturas em rotação, de modo que maiores teores ocorreram em rotações de culturas que promoveram maior aporte de nitrogênio no solo, envolvendo principalmente a cultura da crotalaria na primavera.

c) Maiores teores de carbono orgânico no solo não resultaram em maior agregação do solo. Por outro lado, os solos já apresentavam inicialmente índices satisfatórios de estruturação.

d) As sucessões de culturas afetaram a produtividade da soja que, no entanto, não esteve relacionada aos teores de matéria orgânica e de nitrogênio total do solo.

O carbono orgânico do solo foi pouco afetado pelas características peculiares de cada um dos dois ambientes de estudo, representados pelos dois experimentos, com diferentes históricos e teores de argila no solo, sendo muito mais influenciado pela presença de nitrogênio no solo e nas espécies vegetais. Isto permite concluir que em Sistema Semeadura Direta o aumento no teor de matéria orgânica do solo é limitado pela disponibilidade de nitrogênio, o que aumenta sua importância nas estratégias de conservação do solo e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**, Viçosa-MG, v. 24, p. 179-189, 2000.

AMIN, B. A. Z. et al. Impact of fine litter chemistry on lignocellulolytic enzyme efficiency during decomposition of maize leaf and root in soil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 117, p. 169–183, 2014.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 10, p. 215-221, 1978.

ANDERSON, T. H.; MARTENS, R. DNA determinations during growth of soil microbial biomasses. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 57, p. 487-495, 2013.

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

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

- BARTLETT, R. J.; ROSS, D. N. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1191-1192, 1988.
- BAYER, C.; SCHENEIDER, N. G. Plantio direto e o aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo em pequenas propriedades rurais no município de Teutônia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 165-166, 1999.
- BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 237-245, 2006.
- BAYER, C. et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 1473-1478, 2001.
- BAYER, C. et al. Effect of no-till cropping systems on SOM in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 95-104, 2000.
- BAYER, C. et al. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v. 105, p. 81-92, 2002.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Húmico em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 27, p. 537-544, 2003.
- BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 409-418, 1997.
- BEZERRA, P. S. S.; TAKIYAMA, L. R.; BEZERRA, C. W. B. Complexação de íons de metais por matéria orgânica dissolvida: modelagem e aplicação em sistemas reais. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 3, p. 639-648, 2009.
- BLAGODATSKAYA, E. V.; BLAGODATSKII.; ANDERSON, T. –H. Quantitative isolation of microbial DNA from different types of soils of natural and agricultural ecosystems. **Microbiology**, New York, v. 72, n. 6, p. 744-749, 2003.
- BOLINDER, M.A. et al. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 215, p. 85-91, 1999.
- BOTERO, W. G. **Substâncias húmicas: interações com nutrientes e contaminantes**. Araraquara: UNESP, 2010. 75 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Instituto de Química, Araraquara, 2010.
- BRAIDA, J. A. et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 221-278.
- BROOKES, P. C. et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, p. 837-842, 1985.

BURDON, J. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? **Soil Science**, Hagerstown, v. 166, n. 1, p. 752-769, 2001.

BUSO, W. H. D.; KLIEMANN, H. J. Relações de carbono orgânico e de nitrogênio total e potencialmente mineralizável com o nitrogênio absorvido pelo milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 33, n. 2, p. 97-105, 2003.

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

CADISCH, G.; GILLER, K. E. Estimating the contribution of legumes to soil organic matter build up in mixed communities of C₃/C₄ plants. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 28, n. 6, p. 823-825, 1996.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, n. 4, p. 1399-1407, 2008.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, p. 242-249, 2010.

CALONEGO, J. C. et al. Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 5, p. 770-781, 2012.

CALVO, C. L. Produtividade de fitomassa e relação C/N de monocultivos e consórcios de guandu-anão, milho e sorgo em três épocas de corte. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 77-86, 2010.

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

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

CANELLAS, L. P. et al. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap. 5, p. 45-63.

CASTOLDI, G.; PIVETTA, L. A.; ROSOLEM, C. A. Nitrogen budget in a soil-plant system after brachiaria grass desiccation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, p.1-11, 2014. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00380768.2013.878641>>. Acesso em: 25 mai. 2014.

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

- CERETTA, C. A. et al. Métodos espectroscópicos. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap. 14, p. 201-227.
- CERRI, C. et al. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C , à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 300, série II, n. 9, p. 423-427, 1985.
- CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.
- CHAGAS, C. C.; GUIMARÃES, R. M.; BOCCOLINI, P. M. M. Câncer relacionado ao trabalho: uma revisão sistemática. **Cadernos Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 209-223, 2013.
- CIOTTA, M. N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.
- CLEVELAND, C. C. et al. Litter quality versus soil microbial community controls over decomposition: a quantitative analysis. **Oecologia**, New York, v.174, p. 283-294, 2014.
- CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 29, p. 777-788, 2005.
- COSTA, F. S. et al. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004.
- COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap.28, p. 545-559.
- CRASWELL, E. T. LEFROY, R. D. B. The role and function of organic matter in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 61, p. 7-18, 2001.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.
- CUNHA, E. Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I – atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p. 589-602, 2011.
- DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, London, v. 440, p. 165-173, 2006.
- DICK, D. P. et al. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: parte II - aplicações**. 1.ed. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 2, cap. 11, p. 1-68.

- ELLIOTT, E. T.; CAMBARDELLA, C. A. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, p. 449-457, 1993.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- FAVORETTO, C. M. et al. Determinação da humificação da matéria orgânica de um Latossolo e de suas frações organo-minerais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 1994-1996, 2008.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PLAJA – FEBRAPDP. **Evolução da área cultivada no Sistema Plantio Direto na palha - Brasil**. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.I.pdf> Acesso em: 01 mar. 2014.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.
- FELLER, C. et al. Approaching "functional" soil organic matter pools through particle-size fractionation. Examples for tropical soils. In: LAL, R. et al. (Ed.). **Assessment methods for soil carbon pools**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 53-68. (Advances in Soil Science).
- FERNANDES, A. M. et al. Brachiaria species affecting soil nitrification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p.1699-1706, 2011.
- FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 23, p. 991-996, 1999.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, p. 95-106, 2002.
- FREI, M. Lignin: Characterization of a multifaceted crop component. **The Scientific World Journal**, v. 2013 p. 1-25, 2013. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/436517/>>. Acesso em: 1 mar. 2014.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 11, p. 159-170.
- GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 29, p. 893-901, 2005.
- GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1489-1498, 2010.

- GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p.1724-1731, 2013.
- GHANI, A.; DEXTER, M.; PERROTT. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 35, p. 1231-1243, 2003.
- GLEIXNER, G. Soil organic matter dynamics: a biological perspective derived from the use of compound-specific isotopes studies. **Ecological Research**, Tokyo, v. 28, p. 683-695, 2013.
- GONÇALVES, A. S. et al. Biomassa microbiana em amostras de solos secadas ao ar e reumedecidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 651-658, 2002.
- GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap. 13, p. 185-199.
- GUERRA, J. G. M. et al. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 3, p. 19-26.
- HOCH, A. R.; REDDY, M. M.; AIKEN, G. R. Calcite crystal growth inhibition by humic substances with emphasis on hydrophobic acids from the Florida Everglades. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 64, n. 1, p. 61-72, 2000.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 851 p.
- ISLAM, K. R. Organic carbon content assessment methods. In: LAL,R. (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. 2. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006. v. 2, p. 1164-1168.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 27, p. 408-416, 1998.
- JAKELAITIS, A. et al. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, p. 118-127, 2008.
- JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (Ed.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981, v. 5. p. 415-471.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The Effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V: Method for measuring soil biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 8, p. 209-213, 1976.

- JENSEN, L. S. et al. Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 273, p. 307-326, 2005.
- JOERGENSEN, R. G.; EMMERLING, C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, p. 295-309, 2006.
- JOHNSON, J. M. -F.; BARBOUR, N. W.; WEYERS, S. L. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 1, p. 155-162, 2007.
- KAISER, M.; ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H. Cation exchange capacity and composition of soluble soil organic matter fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 5, p. 1278-1285, 2008.
- KAPPES, C.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Coberturas vegetais, manejo do solo, doses de nitrogênio e seus efeitos na nutrição mineral e nos atributos agronômicos do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 37, p. 1322-1333, 2013.
- KALBITZ, K., W. GEYER, W.; GEYER, S. Spectroscopic properties of dissolved humic substances – A reflection of land use history in a fen area. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 47, p. 219-238, 1999.
- KARAVANOVA, E. I. Dissolved organic matter: fractional composition and sorbability by the soil solid phase. **Eurasian Soil Science**, New York, v. 46, n. 8, p. 924-936, 2013.
- KÄTTERER, T. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 141, 184-192, 2011.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. et al. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.
- KLUTHCOUSKI, J. et al. **Sistema Santa Fé - Tecnologia Emprapa: Integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageira, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p. (Circular Técnica, n. 38).
- KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 34, p. 139-162, 2002.
- LAL, R. Soils and the greenhouse effect. In: LAL, R. (Ed.). **Soil Carbon and the greenhouse effect**. Madison: Soil Science Society of America, 2001. p. 1-8. (SSSA Special Publication Number 57).
- LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, SSSA, 1994. p. 37-51. (Special, 35).

LEAL, A. J. F. et al. Adubação nitrogenada para milho com o uso de plantas de cobertura e modos de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 37, p. 491-501, 2013.

LECO CORPORATION. **TruSpec CHN/CHNS Carbon/Hydrogen/Nitrogen/Sulfur Determinators**: Instruction Manual. 1. ed. St JOSEPH, 2011. 532p.

LIANG, B.C. et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern canadian soils. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 26, p. 88-94, 1998.

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

MacCARTHY, P. The principles of humic substances. **Soil Science**, Hagerstown, v. 166, n. 11, p. 738-751, 2001.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, p. 495-502, 2008.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. II – Decomposição e liberação de nutrientes na entressafra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 36, p. 1568-1582, 2012.

MARSCHNER, B.; KALBITZ, K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 113, p. 211-235, 2003.

MARSCHNER, P.; KANDELER, E.; MARSCHNER, B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 35, p. 453-461, 2003.

MARTIN-NETO, L. et al. **Ressonância magnética nuclear e eletrônica aplicadas a estudos da matéria orgânica em amostras de solos intactas e fracionadas fisicamente**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1998. (Boletim de Pesquisa, n. 7/98).

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo**: Métodos de análises. 1. ed. Viçosa-MG, UFV, 2005. 107p.

MENDONÇA, L. A. R. et al. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 89-98, 2009.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 1, p. 1-6.

MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L.; BAYER, C. **Fluorescência induzida por laser para análise da matéria orgânica de solos intactos**. 1.ed. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2002a. 18 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 3).

- MILORI, D. M. B. P. et al. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Philadelphia, v. 16, n. 11, p. 1-11, 2002b.
- MILORI, D. M. B. P. et al. **Índice de humificação obtido através da fluorescência induzida por laser**. 1.ed. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. 17 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 7).
- MILORI, D. M. B. P. et al. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 57-63, 2006.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2. ed. New York: Oxford University Press; 1997. 378 p.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D. L. et al. **Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods-SSSA Book Series nº 5**. Madison: Soil Science Society of America [etc.], 1996. p. 961-1010.
- NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um Latossolo argiloso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 5, p. 1410-1415, 2006.
- NICOLOSO, R. S. et al. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, p. 2425-2433, 2008.
- NUNES, R. S. et al. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p. 1407-1419, 2011.
- OADES, J. M.; JENKINSON, D. S. Adenosine triphosphate content of the soil microbial biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 11, p. 201-204, 1979.
- PACHECO, L. P. et al. Produção e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p. 1787-1799, 2011.
- PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; McMANUS, C. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 567-573, 2004.
- PEOPLES, M. B.; BALDOCK, J. A. Nitrogen dynamics of pastures: nitrogen fixation inputs, the impact of legumes on soil nitrogen fertility, and the contributions of fixed nitrogen to Australian farming systems. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 41, p. 327-346, 2001.
- PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 508-514, 2010.
- PERIN, A. et al. Sunnhemp and millet as green manure for tropical maize production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 5, p. 453-459, 2006.

- PIVETTA, L. A. et al. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 11, p. 1547-1554, 2011.
- PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, Aracaju, v. 7, n. 5, 2011.
- RAIJ, B. van. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 28, n. 8, p. 85-112, 1969.
- RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 284p.
- RANGEL, O. J. P. et al. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 429-437, 2008.
- REIS JUNIOR, F. B.; TEIXEIRA, K. R. S.; REIS, V. M. **Fixação biológica de nitrogênio associada a pastagens com braquiária e outras gramíneas forrageiras**. 1. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 27p. (Documentos, n. 52).
- RIGON, J. P. G. **Emissão de gases de efeito estufa em áreas de Sistema Semeadura Direta com aportes diferenciados de carbono e nitrogênio**. Botucatu: UNESP, 2013. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agronomia (Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2013.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.
- ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Leaching of nitrate and ammonium from cover crop straws as affected by rainfall. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 36, p. 819–831, 2005.
- SÁ, J. C. M. et al. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. **Soil Science Society Of America Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 1486-1499, 2001.
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 313-319, 1995.
- SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, v. 11-21, 2008.
- SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n.10, p.1349-1356, 2011.

SEGNINI, A. **Estrutura e estabilidade da matéria orgânica em áreas com potencial de sequestro de carbono no solo**. São Carlos, 2007, 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2007.

SEGNINI, A. et al. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 321-326, 2013.

SESSITSCH, A. et al. Activity of microorganisms in the rhizosphere of herbicide treated and untreated transgenic glufosinate-tolerant and wild type oilseed rape grown in containment. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 266, p. 105-116, 2004.

SHICK, J. et al. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 427-436, 2000.

SILVA, C. F. et al. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 36, p. 1680-1689, 2012.

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

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; De-POLLI, H. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 6p. (Comunicado Técnico, 98).

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A.C. **Análise de alimentos (métodos químicos e biológicos)**. 3.ed. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002.

SIX, J.; JASTROW, J. D. Organic matter turnover. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of soil science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 936-942.

SIX, J. et al. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 52, p. 607-618, 2001.

SMAGIN, A. V. et al. The effect of organic matter on the water-retention capacity of soils. **Eurasian Soil Science**, Silver Spring, v. 37, n. 3, p. 267-275, 2004.

SODRÉ FILHO, J. et al. Fitomassa e cobertura do solo de culturas de sucessão ao milho na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 4, p. 327-334, 2004.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C labelled cells. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 20, p. 337-343, 1988.

STENBERG, B. et al. Microbial biomass and activities in soil as affected by frozen and cold storage. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 393-402, 1998.

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

SWIFT, R. S. Effects of humic substances and polysaccharides on soil aggregation In: WILSON, W. S. (Ed.). **Advances in soil organic matter research: the impact on agriculture and the environment**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1991. p. 153-162.

SWIFT, R. S. Organic Matter Characterization. In: SPARKS, D. L. et al. (Ed.). **Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods-SSSA Book Series n° 5**. Madison: Soil Science Society of America [etc.], 1996. p. 1011-1069.

SUZUKI, L. E. A. S.; ALVES, M. C. Fitomassa de plantas de cobertura em diferentes sucessões de culturas e sistemas de cultivo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 121-127, 2006.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 38, p. 139-151, 1992.

TIMOSSI, P. C.; DURIGAN, J. C.; LEITE, G. J. Formação de palhada por braquiárias para adoção do sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 617-622, 2007.

TORRES, J. L. R. et al. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 29, p. 609-618, 2005.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 6. p. 703-707, 1987.

VEZZANNI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 33, p. 743-755, 2009.

VIOLANTE, A. et al. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 10, n. 3, p. 268-292, 2010.

WANG, W.; DALAL, R. C.; MOODY, P. W. Evaluation of the microwave irradiation method for measuring soil microbial biomass. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1696-1703, 2001.

WENG, L. et al. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. **Environmental Science & Technology**, Washington-D.C., v. 36, n. 22, p. 4804-4810, 2002.

WOHLENBERG, E. V. et al. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, p. 891-900, 2004.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, Washington-D.C., v. 28, p. 337-351, 1936.

ZSOLNAY, A. et al. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. **Chemosphere**, Oxford, v. 38, p. 45-50, 1999.