

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

**ESTOQUES E LABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E ACIDIFICAÇÃO  
DE UM ARGISSOLO SOB PLANTIO DIRETO AFETADOS POR SISTEMAS  
DE CULTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA**

**Frederico Costa Beber Vieira  
(Tese)**

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

**ESTOQUES E LABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E ACIDIFICAÇÃO  
DE UM ARGISSOLO SOB PLANTIO DIRETO AFETADOS POR SISTEMAS  
DE CULTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA**

FREDERICO COSTA BEBER VIEIRA  
Engenheiro-Agrônomo (UFSM)

Tese apresentada como  
um dos requisitos à obtenção do  
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Março de 2007

FREDERICO COSTA BEBER VIEIRA  
Engenheiro Agrônomo - UFSM

## TESE

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO


Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo


Faculdade de Agronomia


Universidade Federal do Rio Grande do Sul

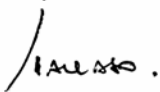
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 05.03.2007  
Pela Banca Examinadora

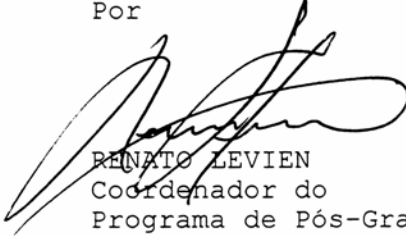
  
CIMÉLIO BAYER  
Orientador-PPG Ciência do Solo


  
CARLOS ALBERTO BISSANI  
PPG Ciência do Solo/UFRGS

  
PAULO ROBERTO ERNANI  
PPG Ciência do Solo/UDESC

  
TELMO JORGE CARNEIRO AMADO  
PPG Ciência do Solo/UFSM

Homologado em: 25.04.2007  
Por

  
RENATO LEVIEN  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo

  
GILMAR A. B. MARODIN  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*Aos meus pais, **Deli e Roque**, exemplos de amor aos filhos e  
maiores incentivadores da realização deste sonho,  
aos meus irmãos **Filipe e Renan**, e à  
minha amada **Patrícia**  
dedico este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por ter me proporcionado tantas oportunidades.

Ao professor Cimélio Bayer, pela orientação, ensinamentos, apoio, compreensão, convívio, amizade e pelo seu exemplo de dedicação profissional. Pela sua disponibilidade, empolgação e por nos fazer acreditar que é possível.

Ao professor João Mielniczuk, pela tranquilidade e segurança na co-orientação. Por lições de vida, de humildade e de valorização do ser humano.

Aos professores do Departamento de Solos e demais professores da minha vida acadêmica. Em especial, agradeço as contribuições ao trabalho pelos professores Humberto Bohnen, Paulo Ernani e João Mielniczuk na avaliação da qualificação. Aos professores Carlos Bissani, Paulo Ernani e Telmo Amado, que constituíram a banca examinadora, agradeço pelas valiosas contribuições para o trabalho e para a redação final.

À UFSM e à UFRGS, pelo ensino público gratuito e de qualidade.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro na iniciação científica, mestrado, doutorado e doutorado sandwich.

Ao Dr. Zhenli He e à Universidade da Flórida, pela acolhida e suporte, extendidos ao Dr. Peter Stoffella, Dr. Chris Wilson, Douglas Banks e Maria Solis.

Ao professor Carlos Alberto Ceretta, por me possibilitar os primeiros passos rumo à Ciência do Solo.

Aos amigos, colegas de curso e de orientação, em especial ao Cacequi, Fabiano, Josi, Diekow, PC, Madalena, Julio, Falberni, Juliana, Nilvânia, Michely, Carlos Gustavo, Elizandra, Adriana, Carlos Leguizamón, Aurélio, Mirla, Rodrigo, Márcia, Mariel, Rafael, Alejandra, Éder e a tantos outros, obrigado pelos momentos de trabalho, diversão, amizade. Pela troca de idéias e ensinamentos em nossas ricas discussões. Ao Paulo Pavinato, companheiro de todas as horas, extendendo também à Naracelis Poletto, Miguel Herbes, Tatiana Fiorin e demais ex-colegas de iniciação científica, pelos bons momentos que vivenciamos.

Ao Diego, Mateus, Siumar, Eliane, Fernando e Tiago, acadêmicos de Agronomia da UFRGS, obrigado pelo auxílio nas atividades de campo e de laboratório e obrigado pela amizade.

Ao Jader Amaro, Luiz Antonio da Silveira (Tonho), Adão dos Santos e José da Silva (Tio Zé), pela disponibilidade constante e auxílio nas atividades.

À minha família, que tantas vezes foi porto seguro na jornada. Pelo amor e apoio incondicionais. Por me ensinarem a sonhar e a correr atrás dos meus sonhos. Por todo o sacrifício que fizeram para que seus filhos conseguissem crescer e almejar um melhor futuro.

À Patrícia, pelo amor e convívio. Pelo contínuo estímulo e apoio. Por embarcar junto nos meus sonhos, mesmo que isso significasse, às vezes, abrir mão temporariamente de suas aspirações em prol das minhas.

A todos que de alguma forma colaboraram, direta ou indiretamente, para que este trabalho se concretizasse.

# ESTOQUES E LABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA E ACIDIFICAÇÃO DE UM ARGISSOLO SOB PLANTIO DIRETO AFETADOS POR SISTEMAS DE CULTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA <sup>1/</sup>

Autor: Frederico Costa Beber Vieira

Orientador: Prof. Cimélio Bayer

## RESUMO

A presente pesquisa foi realizada em experimento de longa duração (19 anos) conduzido em Argissolo Vermelho (220 g kg<sup>-1</sup> argila) sob plantio direto (PD), e teve como principais objetivos (i) estimar os parâmetros da dinâmica da MO e verificar o papel de sistemas de cultura e da adubação nitrogenada no acúmulo de C orgânico no solo; (ii) avaliar o fracionamento físico densimétrico e granulométrico como alternativos à oxidação química com KMnO<sub>4</sub> na determinação da labilidade da MO do solo; (iii) avaliar a qualidade dos sistemas de manejo a partir do Índice de Manejo de C (IMC), o qual integra índices de estoque e de labilidade da MO; e (iv) acessar o papel dos sistemas de culturas e adubação nitrogenada na acidificação do solo e a participação dos ciclos do C e do N nesse processo. O experimento engloba 10 sistemas de culturas em plantio direto, e para essa pesquisa foram selecionados tratamentos com uma ampla variação no aporte de C ao solo [pousio/ milho (M), aveia/M, aveia+ervilhaca /M, lablab+M, guandu+ M, aveia+ervilhaca/ M+caupi e pangola], sendo que os quatro primeiros foram amostrados nos tratamentos sem e com aplicação de N mineral no milho (0 e 180 kg N-uréia ha<sup>-1</sup>) e nos três últimos apenas sem N mineral. O solo foi amostrado em seis subcamadas até a profundidade de 0,3 m, tendo sido amostrada também uma área de campo nativo como referência da condição natural do solo. A adição anual de C pelas culturas variou de 2,61 a 7,84 Mg C ha<sup>-1</sup> e teve efeito positivo nos estoques de C orgânico e na labilidade da MO do solo em PD. Considerando as condições de clima quente e úmido, a taxa de decomposição da MO no solo foi relativamente baixa (k<sub>2</sub> = 1,4%), o que pode ser decorrente em parte da proteção física da MO no solo. Aproximadamente 12% do C adicionado foi incorporado na MO do solo, sendo estimada a necessidade de adição de 3,70 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para contrabalançar as perdas de C do solo. Os métodos de fracionamento físico da MO e por oxidação química (KMnO<sub>4</sub> 60 mmol L<sup>-1</sup>) mostraram-se adequados à avaliação da labilidade da MO, enquanto a solução de KMnO<sub>4</sub> 333 mmol L<sup>-1</sup> superestimou o C lábil deste solo. Com base no IMC, verificou-se que a qualidade do sistema de manejo foi diretamente relacionada ao aporte de resíduos vegetais, com destaque nesse sentido para o papel das leguminosas e da adubação nitrogenada. A acidificação do solo foi mais intensa nos sistemas com leguminosas e/ou com adubação nitrogenada, e isto foi decorrente da maior extração de material vegetal alcalino pela colheita de grãos de milho, e não devido à lixiviação de nitrato.

<sup>1/</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (124 p.) Março, 2007. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

# ORGANIC MATTER STOCKS AND LABILITY AND ACIDIFICATION OF A NO-TILLED BRAZILIAN SOIL AS AFFECTED BY CROPPING SYSTEMS AND NITROGEN FERTILIZATION <sup>1/</sup>

Author: Frederico Costa Beber Vieira

Adviser: Prof. Cimélio Bayer

## ABSTRACT

The research was performed in a long term experiment (19 years) in a Paleudult soil (220 g kg<sup>-1</sup> clay) under no tillage and aimed (i) to estimate parameters of OM dynamic and to verify the role of cropping systems and nitrogen fertilization in accumulating organic C in the soil; (ii) to evaluate the density and particle size fractionation as alternative to the chemical oxidation with KMnO<sub>4</sub> in determining soil OM lability; (iii) to evaluate the quality of management systems using the C Management Index (CMI), which integrates C pool index and Lability index of OM; and (iv) to access the role of cropping systems and N fertilization in the soil acidification, as well as the contribution of C and N cycles in this process. The experiment is composed by 10 no-till cropping systems and, among them, the fallow/maize (M), oat/M, oat+vetch/M, lablab/M, pigeonpea+M, oat+vetch/cowpea+M and digitaria systems were selected in order to obtain a wide range of annual C input to the soil, being the first four systems sampled where the soil receives 0 and 180 kg N-urea ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, while the others were sampled only in the absence of N fertilization. The soil was sampled in six layers from 0-30 cm depth and an adjacent area with native grassland was sampled as reference of natural soil condition. The annual C input by crop systems ranged from 2.61 to 7.84 Mg C ha<sup>-1</sup> and had positive effect on organic C stocks and OM lability in this no-tilled soil. Taking the warm and humid weather into account, the OM decomposition rate in the soil was relatively low ( $k_2 = 1.4\%$ ), which might be due to the OM physical protection in the soil. About 12% of the added C has incorporated as soil OM, and a requirement of 3.70 Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> was estimated in order to counterbalance the soil C loss. The OM physical fractionation methods and the chemical oxidation (60 mmol L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub>) seemed to be suitable to the OM lability evaluation, while the 333 mmol L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> overestimated the labile C at this soil. Based on the CMI, it was found that the quality of management systems was directly related to the input of phytomass by the plants, which was higher when leguminous species and N fertilization were present. The soil acidification was more intense where leguminous-based crop systems and/or N fertilization were present and it was due to the higher exportation of alkaline plant material through the corn grain harvest, and not due to nitrate leaching.

<sup>1/</sup> Doctoral thesis in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (124 p.) March, 2007. This work had financial support from CNPq-Brazil.



## SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1 Dinâmica da matéria orgânica em solos agrícolas .....	4
2.2 Frações da matéria orgânica do solo .....	8
2.3 Acidificação do solo e ciclos do carbono e nitrogênio .....	11
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL</b> .....	17
3.1 Condições de clima e solo .....	17
3.2 Experimento de longa duração .....	17
<b>4. ESTUDO I Estoques de C em Argissolo Vermelho sob plantio     direto afetados por sistemas de culturas e     adubação nitrogenada</b> .....	21
4.1 Introdução .....	21
4.2 Material e métodos .....	24
4.2.1 Tratamentos avaliados .....	24
4.2.2 Análise de C e cálculo dos estoques desse elemento no solo .....	24
4.2.3 Produção de fitomassa pelas culturas .....	25
4.2.4 Estimativa dos coeficientes $k_1$ e $k_2$ .....	26
4.2.5 Análise estatística .....	28
4.3 Resultados e Discussão .....	28
4.3.1 Efeito dos sistemas de culturas e adubação nitrogenada nos teores e estoques de C no solo .....	28
4.3.2 Evolução do conteúdo de C do solo no tempo .....	35
4.3.3 Modelagem dos estoques de C no solo .....	37
4.3.4 Simulação dos estoques de C orgânico no solo .....	38
4.4 Conclusões .....	43
<b>5. ESTUDO II Índice de Manejo de Carbono baseado em     fracionamento físico da matéria orgânica do     solo em um Argissolo sob sistemas de cultura     em plantio direto há longo prazo</b> .....	44
5.1 Introdução .....	44
5.2 Material e Métodos .....	47
5.2.1 Tratamentos e análise de C .....	47
5.2.2 Oxidação química com $\text{KMnO}_4$ .....	48
5.2.3 Fracionamentos físicos densimétrico e granulométrico .....	50
5.2.4 Índice de Manejo de Carbono (IMC) .....	50
5.2.5 Análise estatística .....	51
5.3 Resultados e Discussão .....	51

5.3.1 Adição de C e índice de estoque de carbono (IEC) .....	51
5.3.2 Carbono lábil do solo determinado por métodos químicos e físicos .....	53
5.3.3 Efeito dos sistemas de cultura e fertilização nitrogenada no IMC .....	59
5.3.4 Relação entre os valores de IMC e características físicas, químicas e biológicas do solo .....	60
5.4 Conclusões .....	63
<b>6. ESTUDO III Acidificação de um Argissolo Vermelho em plantio direto e sua relação com os ciclos do C e N .....</b>	<b>65</b>
6.1 Introdução .....	65
6.2 Material e Métodos .....	68
6.2.1 Amostragem do solo .....	68
6.2.2 Análises realizadas .....	68
6.3 Resultados e Discussão .....	72
6.3.1 Sistemas de cultura e acidificação do solo .....	72
6.3.2 Adubação nitrogenada mineral e acidificação do solo ..	76
6.3.3 Poder tampão de pH e acidificação líquida do solo .....	78
6.4 Conclusões .....	91
<b>7. PERSPECTIVAS FUTURAS DE PESQUISA .....</b>	<b>92</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>
<b>9. APÊNDICES .....</b>	<b>106</b>
<b>10. RESUMO BIOGRÁFICO .....</b>	<b>124</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
4.1. Densidade do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. ....	25
4.2. Aporte anual de C (parte aérea + 30% equivalente ao aporte de raízes) ao solo por sistemas de culturas em duas doses de adubação nitrogenada mineral. Média de 19 anos. ....	29
4.3. Estoque de carbono orgânico em Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto e adubação nitrogenada mineral há 19 anos. ....	35
4.4. Estoques de C orgânico do solo observados e estimados pelo modelo. ....	38
4.5. Análises de falta de ajuste (LOFIT) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para avaliar a acurácia da simulação realizada pelo modelo unicompartmental utilizando os coeficientes $k_1$ e $k_2$ . ....	42
5.1. Adição anual de C, produtividade média de grãos de milho e características químicas, físicas e biológicas de Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral. ....	49
5.2. Teor de carbono orgânico (CO) e de C lábil do solo determinados por oxidação química e fracionamento físico da matéria orgânica de Argissolo em plantio direto sob sistemas de culturas e adubação nitrogenada há 19 anos, e percentagem de C lábil em relação ao CO. ....	56
5.3. Correlação entre Índice de Manejo de Carbono (IMC) determinado por oxidação química e fracionamentos físicos da matéria orgânica, e características químicas, físicas e biológicas de Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. ....	61
6.1. Poder tampão e atributos de acidez da camada superficial (0-2,5 cm) de um Argissolo com sistemas de culturas em plantio direto há 19 anos. ....	79

<b>6.2.</b>	Valores de pH-H <sub>2</sub> O, carbono orgânico total, densidade do solo e pH-SMP utilizados para a estimativa da acidificação líquida de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto há 19 anos e adubação nitrogenada mineral. ....	81
<b>6.3.</b>	Acidificação líquida do solo e fontes de acidez ou alcalinidade <sup>1</sup> (equivalente Mg CaCO <sub>3</sub> ha <sup>-1</sup> ) para a camada de 0-30 cm de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. ....	82

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
2.1. Diagrama de representação do ciclo do carbono e seu efeito na acidificação do solo. Adaptado de Helyar & Porter (1989). .....	12
2.2. Diagrama de representação do ciclo do nitrogênio e seu efeito na acidificação do solo. Adaptado de Helyar & Porter (1989). .....	13
2.3. Efeito do pH na adição de ácido carbônico em diferentes pressões parciais de CO <sub>2</sub> no ar do solo (□ = 1, ○ = 10 e ● = 25 vezes o CO <sub>2</sub> atmosférico de 0,0003 atm) e taxas de remoção de íons Al + H <sup>+</sup> (—) de camadas de solo, comparadas com taxa de adição de H <sup>+</sup> pelos ciclos de C e N (----) de um sistema de rotação lavoura/pecuária da Austrália com lixiviação anual de 210 mm. Adaptado de Helyar (2003). .....	15
3.1. Sistemas de culturas que compõem o experimento, conduzido em sistema de plantio direto. ....	20
4.1. Representação esquemática da relação entre estoque de C orgânico do solo e adição anual de C pelas culturas e a sua analogia ao modelo unicompartmental, utilizada para obtenção dos coeficientes k <sub>1</sub> e k <sub>2</sub> . .....	27
4.2. Relação entre adição anual de C pelas culturas e estoque de C orgânico em 2002, na camada de 0-17,5 cm de profundidade, em Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi, G=guandu, Pan=pangola e L=lablab. Nota: o sistema L+M não foi considerado na regressão. ....	30
4.3. Teor de carbono orgânico em Argissolo Vermelho distrófico em plantio direto sob diferentes sistemas de cultura e adubação nitrogenada mineral há 19 anos. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu. ns = não significativo. Barras horizontais demonstram diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5%. * = difere significativamente pelo teste de Tukey 5%. .....	33

4.4.	Teor de C orgânico na camada de 0-17,5 cm de Argissolo Vermelho distrófico em plantio direto sob sistemas de culturas e sem adubação nitrogenada mineral durante 19 anos. Dados obtidos de Medeiros (1985), Teixeira (1988), Testa (1989), Pavinato (1993), Burle (1995), Pillon (2000) e obtidos neste trabalho. Barras verticais demonstram diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5%. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu. ....	36
4.5.	Relação entre os estoques de C orgânico observados analiticamente e os estoques de C orgânico estimados pelo modelo na camada de 0-17,5 cm e no 19° ano do experimento. ....	39
4.6.	Simulação dos estoques de C total, C original e C advindo dos sistemas de culturas no período de 40 anos a partir do início do experimento em 1983, em Argissolo Vermelho distrófico em PD sob sistemas de culturas. Barras verticais representam o erro padrão dentro de cada sistema de culturas em cada ano ( $n=3$ ). P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. ....	41
5.1.	Relação entre adições anuais de C por sistemas de culturas e índices de estoque de C em Argissolo sob plantio direto há 19 anos. Média de três repetições. M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> , respectivamente. ....	53
5.2.	Relação entre adição anual de C pelas plantas e C lábil determinado por oxidação química e fracionamento físico da matéria orgânica de Argissolo em plantio direto sob sistemas de cultura e adubação nitrogenada há 19 anos. M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> , respectivamente. C-FL = C na fração leve. C-MOP = C na matéria orgânica particulada. ....	56
5.3.	Relação entre a adição anual de C pelas plantas e o Índice de Manejo de Carbono (IMC) estimado utilizando valores de C lábil obtidos por (A) oxidação por KMnO <sub>4</sub> 60 mM e fracionamentos físicos (B) densimétrico (C-FL) e granulométrico (C-MOP) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> , respectivamente. ....	58

<b>6.1.</b>	Valores de pH-H <sub>2</sub> O (A), Al trocável (B), saturação por bases (C) e saturação por alumínio (D) na camada de 0-17,5 cm de Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto. Resultados do 5º e 10º ano foram obtidos de Testa (1989) e Burle (1995). P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu. ....	73
<b>6.2.</b>	Valores de pH-H <sub>2</sub> O (A), Al trocável (B), saturação por bases (C) e saturação por Al (D) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto há 19 anos. Linhas horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (5%) para cada camada de solo. ns = não significativo. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu. ....	75
<b>6.3.</b>	Valores de pH-H <sub>2</sub> O e Al trocável de Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto e adubação nitrogenada mineral há 19 anos. *Teste de Tukey a 5%. NS = sem diferença significativa. ....	77
<b>6.4.</b>	Relação entre poder de tamponamento de pH do solo (PTH) e conteúdo de carbono orgânico em Argissolo Vermelho com sistemas de culturas há 19 anos em plantio direto. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu. ....	80
<b>6.5.</b>	Relação entre a acidificação total estimada pelo PTH a partir das curvas de titulação (0-30 cm de profundidade) e pelo pH SMP (0-17,5 cm de profundidade), em equivalente CaCO <sub>3</sub> (Mg ha <sup>-1</sup> ), em um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. ....	87
<b>6.6.</b>	Produtividade de grãos de milho no ano agrícola de 2002/2003 em sistemas de culturas há 19 anos em plantio direto, sem e com adubação nitrogenada mineral. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. Barras verticais indicam o erro padrão da produtividade de grãos nos sistemas de cultura (n=3). ....	89

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas duas décadas, a agricultura do Brasil sofreu grandes mudanças em virtude da adoção do plantio direto como sistema conservacionista de manejo do solo. Desde o início da década de 90, a área cultivada em plantio direto no país passou de aproximadamente 2 milhões de hectares para 22 milhões atualmente, sendo que quase 50% destes estão localizados na Região Sul do país (FEBRAPDP, 2006). Cerca de metade da área atual em plantio direto apresenta-se com mais de 10 anos de adoção deste sistema, tempo suficiente para que ocorram alterações no solo decorrentes da sua adoção.

O plantio direto minimiza a oxidação da matéria orgânica e constitui-se numa estratégia promissora para manter ou mesmo aumentar os estoques de C orgânico no solo, favorecendo a manutenção da capacidade produtiva do mesmo. A rotação de culturas e a inclusão de espécies com elevado aporte anual de C ao solo são fundamentais para o sucesso do sistema. A matéria orgânica se relaciona com as características químicas, físicas e biológicas do solo e, por isto, tem sido empregada como um importante indicador de qualidade de solo e do sistema de manejo adotado. A magnitude com que a matéria orgânica afeta as características do solo depende tanto da sua quantidade como da sua labilidade.

O primeiro estudo do presente trabalho diz respeito ao efeito dos sistemas de cultura e de adubação nitrogenada mineral sobre os estoques de C orgânico no solo sob plantio direto há longo prazo, e os seus resultados e interpretações colaboram no sentido de solidificar e refinar as informações



existentes da dinâmica do C orgânico em solos do Sul do Brasil. Através de experimentos de longa duração, com o passar do tempo, as diferenças na matéria orgânica decorrentes de diferentes manejos tendem a ser maiores quantitativamente e novas interpretações vão sendo possíveis de serem obtidas. Por isso, através de dados do presente estudo e de avaliações anteriores no mesmo experimento, foram obtidos parâmetros da dinâmica da matéria orgânica do solo, o que permitiu a simulação de estoques futuros de C orgânico em diferentes sistemas de cultura. Estudos desta ordem, além do importante cunho agrônomo, se justificam para buscar explorar melhor o potencial de mitigação de gases do efeito estufa através do seqüestro de C nos solos agrícolas.

O segundo estudo diz respeito ao efeito de sistemas de cultura e adubação nitrogenada mineral sobre os estoques de frações lábeis da matéria orgânica do solo. O cenário de preocupação da humanidade com as condições ambientais leva à necessidade de buscar formas objetivas de avaliar a qualidade do manejo do solo, e o índice de manejo de carbono (IMC) apresenta um bom potencial nesse sentido por englobar num único indicador o componente de quantidade (estoque) e de qualidade (labilidade) da matéria orgânica do solo. Entretanto, este índice não tem sido amplamente adotado e acredita-se que a forma de estimativa da labilidade do C orgânico utilizada no método original pode estar sendo um entrave. Portanto, além da interpretação do efeito dos sistemas de cultura e da adubação nitrogenada mineral sobre as frações lábeis da matéria orgânica, nesse estudo visou-se comparar diferentes métodos de determinação da labilidade do C orgânico e avaliar a viabilidade de se utilizar métodos de fracionamento físico da matéria orgânica em substituição ao método químico de oxidação branda da fração lábil com  $\text{KMnO}_4$ .

O terceiro estudo tratou de buscar um melhor entendimento de como se dá o processo de acidificação do solo sob sistemas de manejo com diferentes fluxos de C e de N no sistema solo-planta-atmosfera, através de diferentes sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada por longo tempo, sem reaplicação de calcário. Na interpretação dos resultados, buscou-se verificar quais foram os fatores que mais contribuíram para o processo de acidificação do solo durante o período. Desta forma, os resultados obtidos colaboram com o entendimento do papel das plantas leguminosas de

cobertura de inverno e de verão em sistemas de rotação de culturas no que se refere ao seu efeito na qualidade química do solo, racionalização do emprego de corretivos e fertilizantes, bem como do rendimento do milho em plantio direto.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Dinâmica da matéria orgânica em solos agrícolas**

O solo é um dos recursos básicos dos ecossistemas naturais e agropecuários, constituindo-se num recurso finito, frágil e não renovável (Lal et al., 1995). Termodinamicamente, o solo é um sistema aberto, caracterizado por constantes trocas de energia e matéria com o meio, estando sujeito ao intemperismo e à influência dos seres vivos, como as plantas, os microrganismos e, em grande parte dos casos, à ação antrópica (Vezzani, 2001). Por isso, o solo é um sistema dinâmico e heterogêneo no espaço e no tempo, sendo fortemente influenciado pelas práticas de manejo.

A matéria orgânica (MO) é um componente fundamental para a capacidade produtiva do solo, aumentando a resiliência do mesmo e afetando processos físicos, químicos e biológicos que interagem entre si. A MO tem um papel fundamental na fertilidade dos solos, pois é a principal responsável pela CTC de solos tropicais e subtropicais (Testa, 1989; Burle et al., 1997), caracterizados pelo avançado grau de intemperismo, tornando-a fonte de nutrientes às plantas e atenuando a perda destes por lixiviação. A MO diminui a toxidez de elementos nocivos para as plantas, especialmente o alumínio (Adams, 1984; Vance et al., 1995). A MO é a fonte de energia e nutrientes para a fauna e a microbiota do solo que, por sua vez, influenciam em importantes atributos físicos do solo, tais como a agregação, a aeração, a densidade, a infiltração e a retenção de água (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Haynes & Beare, 1996; Silva & Mielniczuk, 1997) e, por tudo isso, elevados níveis de MO

proporcionam qualidade de solo (Vezzani, 2001; Conceição, 2003). Isto explica a razão pela qual, entre os indicadores de qualidade do solo e de manejo de solo, a MO se sobressai (Conceição et al., 2005).

A MO é oriunda principalmente de resíduos orgânicos adicionados ao solo pelas plantas que, através da fotossíntese, convertem o CO<sub>2</sub> atmosférico em compostos vegetais contendo carbono. Parte destes compostos é exsudada pelas raízes durante o desenvolvimento vegetal, enquanto o restante do C é incorporado ao solo após a sua senescência ou manejo. Os resíduos orgânicos, à medida que vão sendo depositados ao solo, são fracionados pela fauna do solo e parcialmente decompostos pelos microrganismos, onde parte do C incorporado retorna à atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> (Bayer et al., 2000a) e o restante é incorporado à MO do solo.

Por isso, além da importância de ordem agrônômica, o aumento dos estoques de MO no solo é desejável devido ao potencial de armazenar C no solo em detrimento de uma diminuição da quantidade de C presente na atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>, o qual é responsável por cerca de metade do efeito estufa que está promovendo o aquecimento no planeta (Lal et al., 1995; Lal, 2004b). A quantidade de C armazenada nos solos na forma de MO é tão representativa que ultrapassa em duas vezes a quantidade de C presente na atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> e em três vezes a quantidade de C presente na biota da superfície terrestre (Lal et al., 1999).

O estoque de MO no solo, portanto, é o resultado do balanço entre as quantidades de C adicionadas e perdas, podendo o solo funcionar como um dreno ou fonte de CO<sub>2</sub> dependendo do sistema de manejo (Mielniczuk et al., 2003). Enquanto as adições de C são diretamente dependentes da taxa de adição de resíduos vegetais ao solo, as perdas de C do solo ocorrem principalmente pela oxidação microbiana, erosão e lixiviação da MO, sendo esta última pouco importante do ponto de vista quantitativo em curto e médio prazo. A variação do conteúdo de MO no solo no tempo pode ser expresso pela equação abaixo (Dalal & Mayer, 1986):

$$CO = C_0 e^{-k_2 t} + \left( \frac{A k_1}{k_2} \right) (1 - e^{-k_2 t}) \quad (2.1)$$

onde:  $CO$  representa, em  $Mg\ ha^{-1}$ , o estoque de C orgânico no solo em um determinado tempo  $t$ ;  $C_0$  é o estoque de CO inicial ( $t = zero$ ) do solo, em  $Mg\ ha^{-1}$ ,  $A$  representa o C fotossintetizado adicionado ao solo na forma de resíduos, exsudatos e raízes ( $Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ );  $k_1$  é o coeficiente de humificação, ou seja, a fração do C adicionado ( $A$ ) efetivamente retido no solo na forma de MO, e o  $k_2$  é a taxa de perda, ou seja, a fração do CO do solo que é perdido anualmente por decomposição microbiana, erosão e lixiviação. Normalmente, as estimativas de  $k_1$  e  $k_2$  são feitas a partir de estudos que utilizam técnicas isotópicas através de C marcado ( $^{14}C$ ) ou pela discriminação do isótopo  $^{13}C$  pelas plantas de rota metabólica C3 e C4 (Balesdent, 1992; Veldkamp, 1994; Gregorich et al., 1995). Porém, esses coeficientes também podem ser obtidos de forma aproximada através de experimentos de longa duração onde são conhecidos os valores de  $A$  e  $CO$ , bem como o estoque inicial ( $C_0$ ) de CO (Bayer et al., 2000a; Mielniczuk et al., 2003). Uma vez conhecidos esses coeficientes, pode ser realizada a simulação dos estoques de CO em cenários de manejo futuros (Lovato, 2001).

Os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  são afetados principalmente pelas condições climáticas (temperatura, precipitação), tipo de solo (textura e mineralogia) e práticas de manejo, especialmente o grau de revolvimento (Bayer, 1996; Lovato, 2001; Mielniczuk et al., 2003). Valores médios de  $k_1$  para parte aérea variam entre 7,7 e 23% (Gregorich et al., 1995; Bolinder et al., 1999), sendo que valores de  $k_1$  do sistema radicular são geralmente maiores que os da parte aérea, principalmente devido à proteção física da raiz pelos agregados contra o ataque microbiano, mas também devido ao maior teor de lignina (Balesdent & Balabane, 1996). Valores de  $k_2$ , por sua vez, podem variar desde menos de 2% em regiões temperadas e frias (Balesdent et al., 1990) a até 10% em regiões tropicais (Cerri, 1986). Em solos subtropicais do Sul do Brasil, Bayer (1996) determinou valor de  $k_2$  em Argissolo Vermelho sob preparo convencional (PC) de 5,4%, o que correspondeu a quase o dobro em relação ao  $k_2$  do C do mesmo solo sob plantio direto (2,9%), estimados utilizando um valor fixo para o  $k_1$  de 20%. Além disso, o autor encontrou relação inversa entre os valores de  $k_2$  e o teor de argila de três solos analisados para um mesmo sistema de preparo, encontrando um valor de  $k_2$  de 1,4% para um Latossolo Roxo sob PC, cerca de quatro vezes inferior ao do Argissolo sob o mesmo

sistema de preparo. Lovato et al. (2004), estimando conjuntamente os valores de  $k_1$  e  $k_2$ , encontraram diferença muito pequena do  $k_1$  obtido no PC e PD, mas, em contrapartida, verificaram um valor de  $k_2$  duas vezes superior no PC em relação ao do PD.

Neste contexto, estratégias de manejo de solo com o intuito de elevar os teores de MO preconizam, principalmente, a redução do preparo do solo e a adição de elevadas quantidades de resíduos por culturas. Como no sistema plantio direto o revolvimento do solo é mínimo, o fator preponderante para o estoque de MO no solo é o aporte de C por sistemas de culturas. Assim sendo, deve-se buscar o cultivo de espécies comerciais em rotação com culturas de cobertura que aportem elevadas quantidades de C e N ao solo (Aita, 1997; Bayer et al., 2000a; Amado et al., 2001; Mielniczuk et al., 2003; Amado et al., 2006). Burle et al. (1997) encontraram adição anual média de C pelo sistema aveia/milho de  $3,36 \text{ Mg ha}^{-1}$  durante 10 anos de cultivo sem adubação nitrogenada mineral, enquanto esta adição aumentou para  $4,81 \text{ Mg ha}^{-1}$  no sistema aveia+vica/milho e para  $6,12 \text{ Mg ha}^{-1}$  no sistema aveia+vica/milho+caupi, resultando em diferentes estoques de C e N no solo após este período de cultivo e ressaltando a importância da inclusão de culturas de cobertura no esquema de rotação, especialmente de espécies leguminosas. Dentre as leguminosas, as espécies de verão se destacam frente às espécies de inverno devido à maior produção de fitomassa e maior quantidade de N fixado biologicamente (Aita, 1997; Burle et al., 1997).

No solo, a dinâmica do N está intimamente relacionada com a dinâmica do C. Pela capacidade de fixar  $\text{N}_2$  atmosférico através da associação simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium*, as leguminosas aumentam tanto a adição de N quanto de C ao solo através de seus resíduos, promovendo aumento no estoque destes elementos no solo. Tal incremento eleva a disponibilidade de N ao milho e demais espécies não leguminosas, o que acarreta em maior adição de fitomassa por estas plantas e maior produtividade de grãos (Teixeira, 1988; Pavinato, 1993; Lovato, 2001). De forma semelhante ao uso de leguminosas, a adubação nitrogenada mineral também favorece a manutenção e/ou incremento nos estoques de C e N no solo (Lovato, 2001).

## 2.2 Frações da matéria orgânica do solo

A magnitude com que a MO influencia os processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no solo é função tanto da quantidade quanto da qualidade da MO presente no solo. No que diz respeito à qualidade, sabe-se que a MO do solo é uma mistura de frações orgânicas que diferem quanto à estrutura química, grau de decomposição, grau de interação com minerais e proteção física e química à oxidação biológica (Baldock & Skjemstad, 2000; Six et al., 2001; Conceição, 2006).

Além do aspecto quantitativo, diferentes manejos promovem a ocorrência de alterações na qualidade da MO do solo (Bayer et al., 2001), no que se refere a sua labilidade à decomposição microbiana (Blair et al., 1995). Nesse sentido, estudos realizados no Sul do Brasil têm evidenciado efeito do manejo no acúmulo de frações mais lábeis da MO obtidas por técnicas de fracionamento físico (Bayer et al., 2001; Bayer et al., 2002b; Freixo et al., 2002) e químico (Bayer et al., 2002a) e submetidas à análise espectroscópica.

Em estudos da MO, avaliações da sua labilidade são fundamentais, dada a importância da fração lábil em processos chave que ocorrem no solo. O acúmulo de frações lábeis de MO constitui-se num aspecto extremamente benéfico em relação à qualidade do solo como um todo. A constante decomposição microbiana e reposição destas frações lábeis pela vegetação determinam um importante fluxo de C e N no solo, o qual reflete-se na formação de compostos orgânicos solúveis que têm importante papel na formação de complexos com metais, no fornecimento de energia e C ao metabolismo microbiano e, conseqüentemente, na excreção de polissacarídeos que atuam como substâncias estabilizadoras de agregados, entre outros fatores (Golchin et al., 1994; Six et al., 1998; Blair & Crocker, 2000; Six et al., 2001).

A fração lábil da MO é a mais rapidamente alterada por práticas de manejo aplicadas ao solo (Bayer et al., 2001; Bayer et al., 2002a; Bayer et al., 2002b) e, portanto, o estudo da mesma como indicadora de qualidade de manejo do solo tem recebido destaque. Buscando melhor entendimento sobre o comportamento desta fração, Loginow et al. (1987) utilizaram o método de oxidação branda da MO usando soluções de  $\text{KMnO}_4$  em diferentes

concentrações (33, 166 e 333 mmol L<sup>-1</sup>) para promover o fracionamento da MO com base na sua suscetibilidade à oxidação. Posteriormente, Lefroy et al. (1993), ao utilizarem este mesmo fracionamento por KMnO<sub>4</sub> e estudo de incorporação de <sup>13</sup>C, sugeriram a utilização de alterações na labilidade do carbono do solo como sendo medida de sustentabilidade agrícola, pois as frações lábeis são mais sensíveis a mudanças de manejo do que teores totais de CO. Baseados nisto, Blair et al. (1995) propuseram um Índice de Manejo de C (IMC) que contempla o efeito dos sistemas de uso e manejo de solo sobre a quantidade (Índice de Estoque de C, IEC) e a qualidade (Índice de Labilidade, IL) da MO, sendo esta estimada a partir da oxidação de frações lábeis da MO com KMnO<sub>4</sub> na concentração de 333 mmol L<sup>-1</sup>. Segundo os autores, o IMC é calculado em relação a um solo de referência não cultivado (campo nativo, mata).

O grande mérito do IMC é de contemplar no mesmo índice o componente quantitativo e o componente qualitativo da MO. Entretanto, apesar da sua grande coerência à construção teórica da importância da quantidade e labilidade da MO no solo, este índice não tem sido intensivamente utilizado pela comunidade científica. Isto pode ser devido ao fato de que o método utilizado para a estimativa da labilidade exige calibrações, ou ao menos testes, para cada tipo de solo. Alia-se a isto as dificuldades operacionais da análise, pois o emprego de KMnO<sub>4</sub> exige uma série de cuidados especiais a fim de evitar a oxidação do reagente pela luz e pela presença de MnO<sub>2</sub>, tornando o método trabalhoso e delicado.

A necessidade de prévia calibração do método se refere à concentração do oxidante a ser utilizado na determinação da fração lábil de C, o tempo de agitação e ao grau de umidade do solo – natural ou submetido à secagem (Shang & Tiessen, 1997; Weil et al., 2003). A obtenção de IMC utilizando a oxidação da fração lábil do C por KMnO<sub>4</sub> 333 mmol L<sup>-1</sup>, como sugerido por Blair et al (1995), pode não ser adequada para solos com características de MO diferentes àqueles solos com os quais o método foi desenvolvido. Em condições tropicais (Chapada de Araripe, Pernambuco), Shang & Tiessen (1997) avaliaram o C oxidado por KMnO<sub>4</sub> 333 e 33 mmol L<sup>-1</sup> e verificaram que na concentração de 333 mmol L<sup>-1</sup> a oxidação foi intensa e pouco eficiente para discriminar as diferenças qualitativas da MO. Por isso, os



autores relataram a necessidade de utilizar-se o oxidante em concentração menor do que a sugerida por Blair et al. (1995) para demonstrar as mudanças na qualidade da MO do solo analisado, afirmando ainda que a MO de solos tropicais é relativamente mais lábil que a de solos temperados como o que foi utilizado no desenvolvimento do método de oxidação. Weil et al. (2003) analisaram amostras de 209 solos das Américas do Norte, Central e do Sul, contemplando ampla diversidade de solos, clima e manejo, e afirmaram que a concentração de 20 mmol L<sup>-1</sup> pode ser utilizada para estimar a fração lábil de C em diversos solos com elevada sensibilidade.

Além da avaliação de labilidade de C, a oxidação da MO com KMnO<sub>4</sub> tem sido utilizada também para avaliar a disponibilidade de N no solo (Westerhof et al., 1998). Santos (2001) correlacionou os teores de CO oxidado por soluções de KMnO<sub>4</sub> com os teores de N extraídos por estas soluções em solos tropicais em Minas Gerais, sendo obtidas as melhores correlações nas concentrações de KMnO<sub>4</sub> 33 e 60 mmol L<sup>-1</sup>. No entanto, o autor ressalta que pode ser necessário o uso de concentrações mais elevadas do oxidante quando se busca a estimativa quantitativa do N potencialmente mineralizável.

Além do método químico, o fracionamento da MO pode ser realizado por métodos físicos e, atualmente, existe uma forte tendência em se adotar esses métodos para o fracionamento de solo em estudos da matéria orgânica. Os métodos físicos podem ser granulométricos e densimétricos, ou a combinação de ambos (Roscoe & Machado, 2002), os quais permitem a obtenção de frações lábeis (particulada e fração leve, respectivamente) e estáveis da MO (associada aos minerais e pesada, respectivamente). Nesse sentido, de forma alternativa à proposição de Blair et al. (1995) para o cálculo de Índices de Manejo de Carbono, a labilidade da MO pode ser obtida a partir da quantidade de C presente em frações lábeis da MO obtidas por essas técnicas de fracionamento físico (Diekow et al., 2005b).

As frações FL (fração leve - fracionamento físico densimétrico) e MOP (MO particulada - fracionamento físico granulométrico) apresentam mudanças mais rápidas nos seus teores do que os teores totais de CO do solo depois de determinado manejo (Cambardella & Elliot, 1992; Six et al., 1998), indicando que estas frações são mais lábeis à decomposição microbiana. A FL e a MOP, apesar da diferença metodológica para a obtenção, apresentam

semelhanças na sua constituição e características. Cambardella e Elliott (1992) relataram que a maioria da MOP flutuou em líquido de densidade de  $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ , além de apresentarem uma relação C/N semelhante. Além disso, a maior labilidade destas frações em relação à fração pesada (FP) e ao C associado aos minerais (CAM) é comprovada em trabalhos que utilizaram análises com técnicas espectroscópicas, microscopia eletrônica de varredura e discriminação de  $^{13}\text{C}$  (Bayer et al., 2000b; Six et al., 2001; Bayer et al., 2002a; Bayer et al., 2002b).

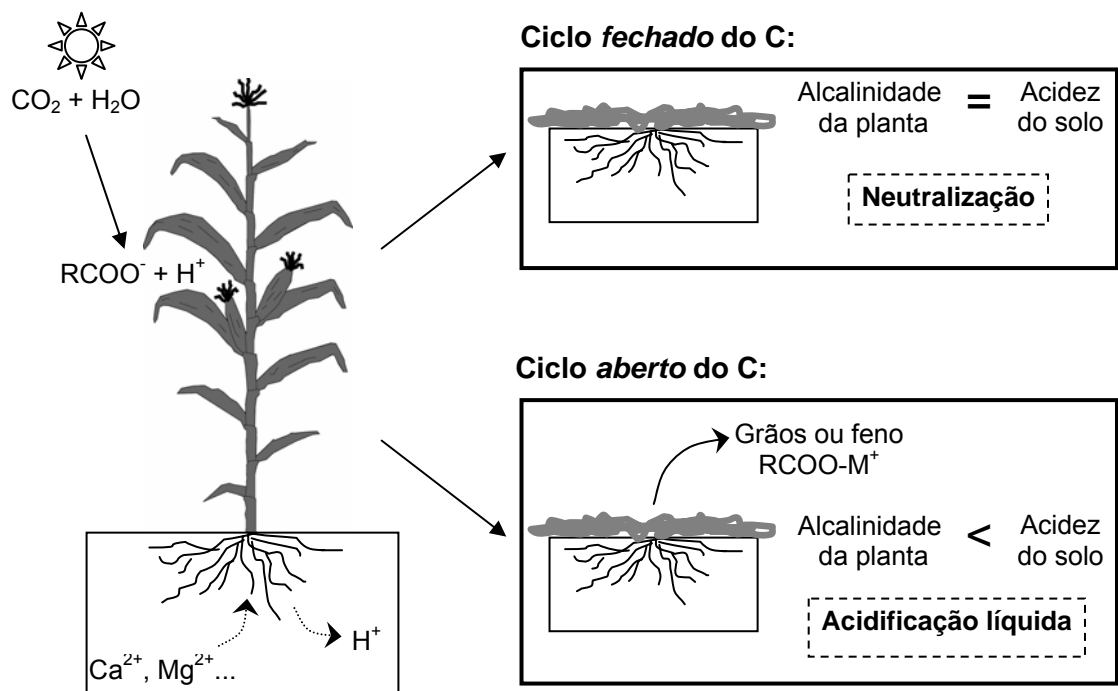
### 2.3 Acidificação do solo e ciclos do carbono e nitrogênio

Entende-se por acidificação do solo o acúmulo de acidez no mesmo. A acidificação do solo é um processo que ocorre naturalmente em ecossistemas naturais e agrícolas. Geralmente, o estabelecimento de exploração agrícola resulta em maiores taxas de acidificação do solo, podendo ser notadamente afetadas pelo manejo efetuado no solo (Helyar, 2003).

A acidificação do solo inicia quando as superfícies das rochas são colonizadas com algas e líquens, onde ácidos derivados do ciclo do C e N são envolvidos na dissolução de solo e minerais da rocha durante o processo de desenvolvimento. As reações de dissolução dos minerais consomem íons  $\text{H}^+$ . Com o tempo, as plantas também passam a se fazer presentes, alterando os ciclos do C e N e o intemperismo, afetando diretamente a acidificação do solo (Fenton & Helyar, 2002). Os ciclos do C e do N são os principais agentes causadores de acidificação na maioria dos ecossistemas agrícolas, sendo que a magnitude da acidificação depende basicamente das formas e quantidades com que cada elemento entra ou sai do sistema solo-planta. A fundamentação teórica dos principais mecanismos pelos quais os ciclos do C e do N acidificam o solo serão comentados a seguir.

No ciclo do C (Figura 2.1), a planta transforma água e gás carbônico em açúcares através da fotossíntese. Estes açúcares são convertidos em parte a ácidos orgânicos que dissociam em íons  $\text{H}^+$  e ânions orgânicos. A carga negativa destes ânions é balanceada por cátions “básicos”,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  para formar sais de ácidos orgânicos. Esses cátions básicos são absorvidos pelas raízes, enquanto íons  $\text{H}^+$  são excretados pelas

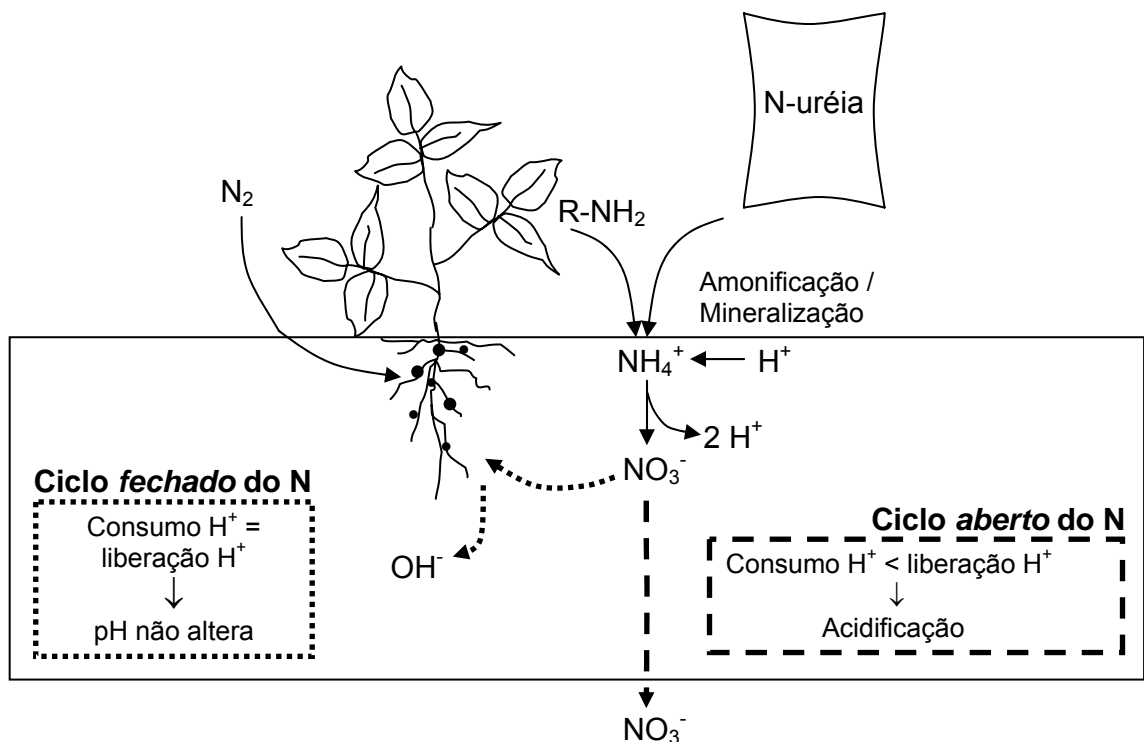
mesmas para manter a sua neutralidade elétrica. Com isso, há geração de acidez no solo e formação de material vegetal potencialmente alcalino. Quando a planta senesce ou é manejada, o resíduo vegetal retorna ao solo e é incorporado à MO do solo que, ao ser mineralizada, se torna novamente água e gás carbônico, liberando a sua alcalinidade e neutralizando a acidez do solo, fazendo com que a acidificação líquida seja nula. Entretanto, se parte ou todo o material vegetal for removido do ecossistema pela colheita de grãos e feno/silagem, não haverá alcalinidade suficiente para neutralizar a acidez gerada no solo quando o material vegetal retornar ao mesmo, ocorrendo então a acidificação do ecossistema (Fenton & Helyar, 2002; Helyar, 2003). Segundo Slattery et al. (1991), são necessários 9 kg de  $\text{CaCO}_3$  para neutralizar a acidificação gerada pela extração de material alcalino equivalente a uma tonelada de grãos de milho ou trigo, 20 kg para cada tonelada de grãos de soja e 40 kg para cada tonelada de feno de trevo ou silagem de milho.



**FIGURA 2.1** Diagrama de representação do ciclo do carbono e seu efeito na acidificação do solo. Adaptado de Helyar & Porter (1989).

No ciclo do N (Figura 2.2), o N do ar atmosférico é fixado biologicamente pela simbiose entre leguminosas e bactérias *Rhizobium*.

Quando a planta senesce e há a mineralização dos resíduos, o N é liberado na forma de amônio, o qual é posteriormente transformado em nitrato, ocorrendo liberação líquida de acidez ao solo. Se este nitrogênio na forma de nitrato é absorvido pela raiz das plantas, há excreção de ânions  $\text{OH}^-$  ou  $\text{HCO}_3^-$  pelas raízes ao solo para manter a neutralidade elétrica das mesmas. Por isso, é importante ressaltar que, se todo o nitrato produzido é absorvido pela planta, o balanço entre álcalis e ácidos no ecossistema continuará sem promover acidificação do solo. Entretanto, se o nitrato lixiviar para fora do alcance do sistema radicular das plantas, o solo se tornará mais ácido (Fenton & Helyar, 2002).



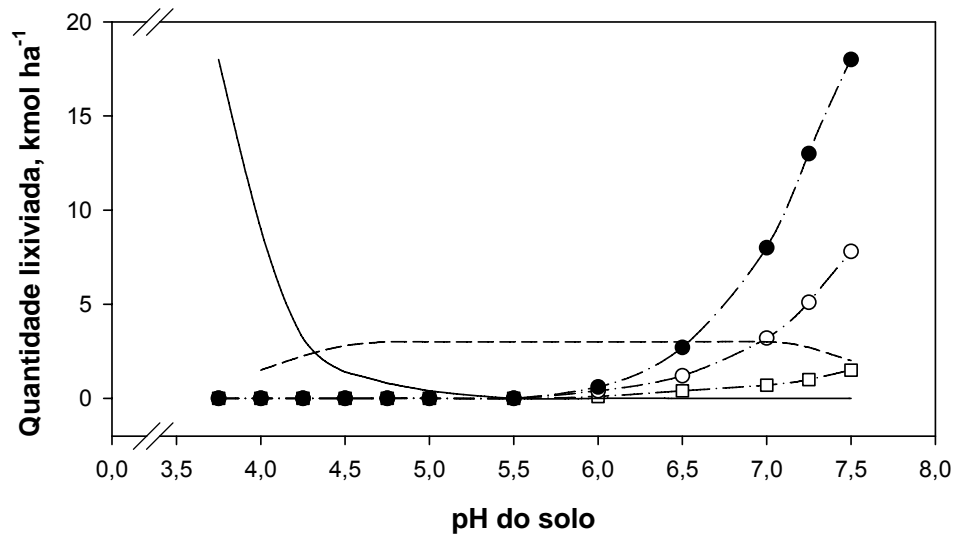
**FIGURA 2.2** Diagrama de representação do ciclo do nitrogênio e seu efeito na acidificação do solo. Adaptado de Helyar & Porter (1989).

No caso do N ser adicionado ao solo como fertilizante mineral, a acidificação dependerá tanto da quantidade de nitrato lixiviada como da fonte de N mineral adicionada. Da mesma forma que o N fixado biologicamente, a acidificação é nula se não houver lixiviação de nitrato quando a fonte de N for uréia e nitrato de amônia. Entretanto, se após a adição destas fontes houver lixiviação de 100% do N na forma de nitrato, há uma acidificação líquida onde seriam necessários 3,6 kg de  $\text{CaCO}_3$  para neutralizar a acidez gerada por cada kg de  $\text{N-NO}_3$  lixiviado. Porém, se a fonte de N mineral utilizada for sulfato de

amônio, há acidificação do solo mesmo se todo o N for absorvido, sendo que a acidificação gerada aumenta proporcionalmente quanto maior for a percentagem de nitrato perdido por lixiviação. Por outro lado, a adição de N na forma de nitrato de cálcio ou sódio é alcalinizante se todo o N for absorvido e apresenta efeito nulo sobre a acidificação do solo se 100% do N for lixiviado como nitrato (Fenton & Helyar, 2002).

A acidificação do solo gerada pelos ciclos do C e N normalmente é mais efetiva na acidificação do solo quando estes se encontram em uma faixa de valores de pH entre 4,0 a 7,0, enquanto outros fatores de acidificação podem se tornar mais expressivos em valores de pH fora desta faixa (Figura 2.3). Sabiamente, a própria natureza tende a manter o pH do solo dentro deste intervalo, favorecendo a manutenção do pH dentro de limites que possibilitam o desenvolvimento de plantas. Quando o pH do solo é maior que 6, aumenta significativamente a concentração de íons carbonatos ( $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ) e hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) em solução e, se houver percolação de água, estes serão lixiviados no perfil do solo. Após a lixiviação, a solução tende a entrar novamente em equilíbrio com o  $\text{CO}_2$  do ar do solo, promovendo paulatinamente a acidificação do solo após cada ciclo de lixiviação e re-equilíbrio.

Por outro lado, quando o solo apresenta pH menor que 4,0, aumenta a dissolução de aluminossilicatos e de óxidos de Al, consumindo íons  $\text{H}^+$  e aumentando a lixiviação dos produtos da dissolução contendo Al e H. Com isso, o pH do solo tende a ser aumentado a valores onde há menor taxa de intemperismo de minerais. Em adição, valores de pH menores que 4,0 reduzem a produtividade das culturas e o tendem a inibir o processo de nitrificação, fazendo com que a acidificação pela exportação de material vegetal alcalino e pela lixiviação de nitrato seja diminuída (Helyar, 2003).



**FIGURA 2.3** Efeito do pH na adição de ácido carbônico em diferentes pressões parciais de CO<sub>2</sub> no ar do solo (□ = 1, ○ = 10 e ● = 25 vezes o CO<sub>2</sub> atmosférico de 0,0003 atm) e taxas de remoção de íons Al + H<sup>+</sup> (—) de camadas de solo, comparadas com taxa de adição de H<sup>+</sup> pelos ciclos de C e N (----) de um sistema de rotação lavoura/pecuária da Austrália com lixiviação anual de 210 mm. Adaptado de Helyar (2003).

Devido a estes processos, o solo em um ecossistema natural que vem sofrendo a ação do intemperismo durante milhares de anos encontra-se em uma condição relativamente estável (“steady state”) em termos de pH, pois há um equilíbrio entre a geração e o consumo de acidez. A implantação de sistemas de exploração agrícolas, entretanto, altera este equilíbrio, sendo que em ecossistemas agrícolas, os principais mecanismos responsáveis pela acidificação são a remoção de resíduos vegetais pela colheita de grãos, produção de feno e/ou silagem, lixiviação de nitrato e erosão de solo fértil (Helyar, 1976).

Os sistemas de culturas cultivados em plantio direto podem afetar as taxas de acidificação de um solo por possuírem diferentes capacidades de aporte de C e N ao solo, devido à produção de fitomassa e à fixação de N biologicamente pelas leguminosas (Aita, 1997; Burle et al., 1997; Lovato et al., 2004). Este fato, aliado a propriedades intrínsecas de cada cultura, tais como o tipo de sistema radicular, a quantidade e qualidade de material exportado, a qualidade dos resíduos vegetais aportados ao solo, etc., faz com que os

sistemas de culturas afetem diretamente a acidificação do solo (Helyar, 1976; Slattery et al., 1991; Burle et al., 1997).

O cultivo de espécies leguminosas e a adubação nitrogenada mineral podem favorecer a acidificação dos solos tanto devido ao maior potencial de lixiviação de nitratos quanto à maior exportação de material alcalino quando a parte aérea é retirada através de colheita de grãos ou feno, já que leguminosas geralmente promovem incremento na produção pela maior disponibilidade de N (Haynes, 1983; Loss et al., 1993a; Dolling, 1995; Tang et al., 1999a; Tang et al., 1999b; Tang & Yu, 1999). Por isso, Burle et al. (1997) encontraram maiores taxas de acidificação do solo por sistemas de culturas que envolviam leguminosas em detrimento a sistemas compostos exclusivamente por gramíneas. Dolling et al. (1995) verificaram um aumento de praticamente 50% na taxa de acidificação anual devido à inclusão do tremoço em um sistema de rotação entre pastagens e cultivo de trigo. Avaliando o efeito de doses anuais de N (0 a 180 kg ha<sup>-1</sup>) aplicados em duas formas (uréia e NH<sub>3</sub> anidra) sobre a acidificação do solo em 9 anos, Bouman et al. (1995) verificaram uma relação direta entre a dose de N aplicada e a acidificação ocorrida no solo, além de encontrarem maior acidificação proporcionada pela aplicação de NH<sub>3</sub> anidra em relação à uréia. De forma semelhante, Barak et al. (1997) verificaram diminuição do pH e do teor de cátions básicos trocáveis e aumento da acidez trocável à medida que se aumentou a dose de N mineral de 0 para 168 kg ha<sup>-1</sup>. Segundo Helyar (2003), taxas de acidificação de solo devido aos ciclos do C e do N normalmente encontradas em ecossistemas agrícolas variam, em média, de 2 a 5 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (necessitando de um equivalente a 100 a 250 kg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para neutralizar tais quantidades de acidez gerada), podendo ultrapassar 20 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em condições extremas, especialmente quando há elevada adição de N na forma de sulfato de amônio.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL**

#### **3.1 Condições de clima e solo**

O presente estudo foi desenvolvido em experimento localizado na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, no município de Eldorado do Sul, RS. As coordenadas geográficas da estação são 30° 50' 52" Sul e 51° 38' 08" Oeste. O clima da região é subtropical úmido – Cfa, segundo a classificação climática de Köeppen. A temperatura média anual é de 19,4°C, com uma variação de 13,9 a 24,9° C entre as temperaturas médias mensais. A precipitação média anual é de 1.490 mm, com variações médias mensais de 95,2 a 168 mm (Bergamaschi & Guadagnin, 1990). O solo é um Argissolo Vermelho Distrófico típico e apresenta textura franco-argilo-arenosa, com 220 g kg<sup>-1</sup> de argila. A fração argila é composta basicamente por caulinita e óxidos de Fe (720 e 109 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

#### **3.2. Experimento de longa duração**

O experimento foi instalado em 1983. Antes da implantação, o solo foi cultivado intensivamente durante aproximadamente 14 anos e apresentava sinais de degradação física (Medeiros, 1985). No início do experimento, o solo (0-10 cm) apresentou 19 mg dm<sup>-3</sup> de P, 130 mg dm<sup>-3</sup> de K, 23 mg MO kg<sup>-1</sup> de solo e pH 5,8 (Medeiros, 1985).

O delineamento do experimento é o de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas principais (8 m X 5 m) são

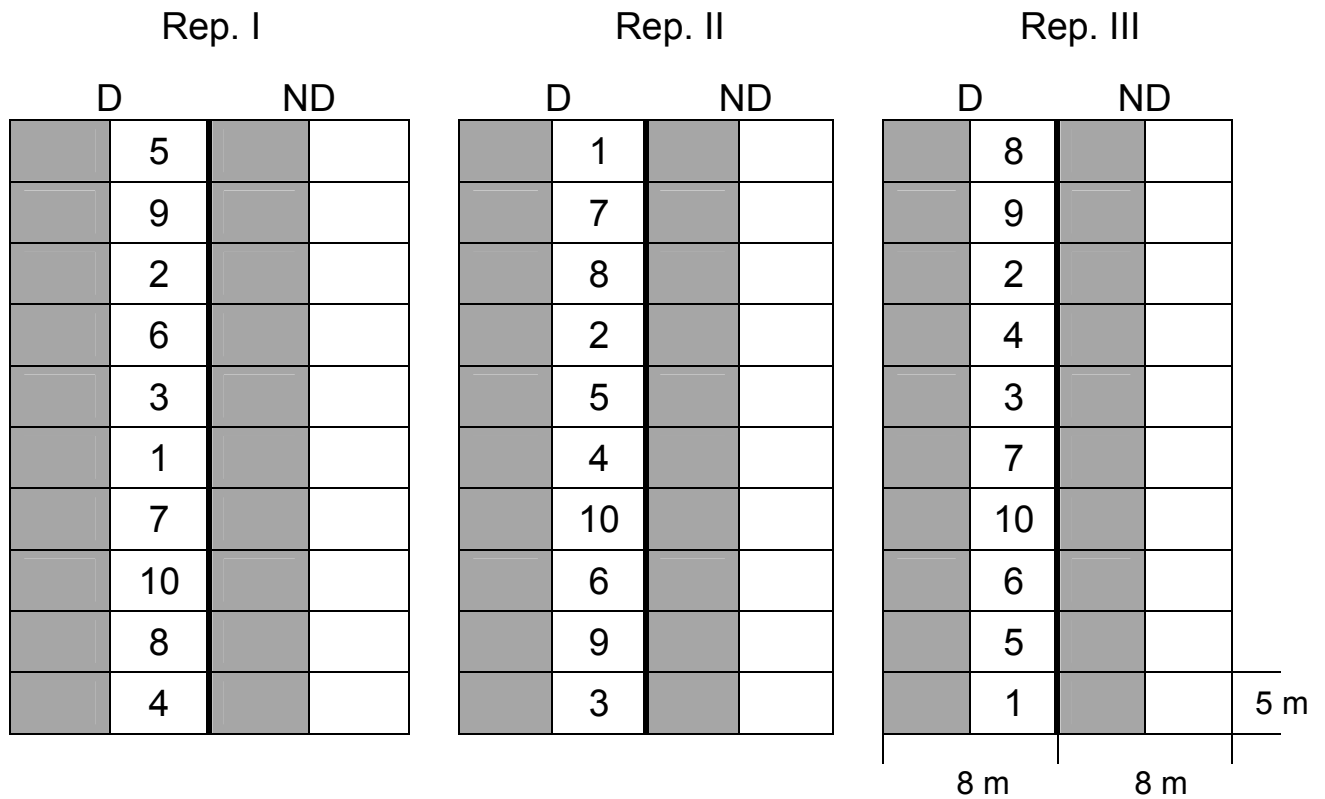


cultivadas com 10 seqüências de cultura, todas em sistema de plantio direto desde 1983, conforme a Figura 3.1. No início do experimento, os blocos foram divididos longitudinalmente e em metade dos mesmos foi realizada uma descompactação profunda, enquanto a outra parte não recebeu descompactação. Em faixas nos blocos em cada nível de compactação (5 m X 4 m) são aplicados dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N-uréia ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). A uréia é aplicada a lanço quando o milho se apresenta no estágio vegetativo V6 (seis folhas desenroladas). Os tratamentos selecionados para cada estudo são citados nas suas respectivas seções de material e métodos específicas.

O manejo das culturas segue um padrão particular para cada sistema. No sistema pousio/milho, o solo permanece sujeito ao desenvolvimento de vegetação espontânea durante o intervalo entre as culturas de milho de um ano agrícola e do próximo (março a setembro). Nos sistemas aveia/milho, aveia+vica/milho e aveia+vica/milho+caupi, as culturas de inverno são semeadas em abril, através de semeadura mecânica (Semeadora/Azubadora Semeato® SHM 11/13). A semeadura do milho é realizada em novembro, utilizando a mesma semeadora citada, regulada para espaçamento de 0,90 m nas entrelinhas. Na colheita do milho, realizada manualmente, todas as espigas da parcela são removidas. O caupi, o lablab e o guandu são semeados nas entrelinhas do milho, normalmente uns 30-45 dias após a semeadura do milho, através de saraquá, com covas distanciadas de 50 cm e com cerca de três a quatro sementes por cova. Após a colheita do milho, o caupi e o lablab permanecem se desenvolvendo até a sua senescência no inverno, com a ocorrência de geadas. O guandu é renovado a cada 2-3 anos, sendo que anualmente a cultura recebe uma poda leve (1 m de altura) alguns dias antes de semear o milho. Durante o cultivo do milho, é realizada a suplementação de água através de irrigação por aspersão. A adubação do solo do experimento é realizada anualmente através da aplicação de 50 kg de K<sub>2</sub>O e 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na ocasião da implantação do milho, incorporado na linha de semeadura. É importante salientar que desde a instalação do experimento, em 1983, não foi realizada nenhuma aplicação de calcário ao solo. O controle de ervas daninhas, quando necessário, é realizado pelo método químico através de aplicação de dessecante glifosate em abril, precedendo a semeadura das

culturas de inverno, e em outubro, após o manejo das mesmas com rolo-faca, precedendo a semeadura do milho.

Duas particularidades da condução do experimento são relevantes na interpretação de alguns resultados dos estudos. Uma delas é que, no decorrer dos 19 anos de condução do experimento, o milho foi cultivado quatro vezes no sistema pangola, enquanto nos demais sistemas selecionados para os estudos o milho foi cultivado todos os anos. A segunda particularidade é que o atual sistema aveia+vica/milho, deste 1983 até 1993, era constituído de aveia preta+trevo/milho, sendo o trevo subterrâneo substituído pela vica a partir desta data.



### Legendas:


#### Compactação:

D = descompactado

ND = não descompactado

#### Adubação nitrogenada:

 0 kg ha<sup>-1</sup> N

 180 kg ha<sup>-1</sup> N

#### Sistemas de cultura atuais:

1. Aveia + vica / milho (revolvido)

2. Aveia + milho

3. Aveia + vica / milho + caupi

4. Lablab + milho

5. Aveia + vica / milho

6. Lablab

7. Guandu + milho

8. Pousio + milho

9. Pangola

10. Solo descoberto

Sendo: milho: *Zea mays*; aveia preta: *Avena strigosa*; vica: *Vicia sativa*; caupi: *Vigna unguiculata* subsp. *Unguiculata*; lablab: *Lablab purpureus*; guandu: *Cajanus cajan*; pangola: *Digitaria decumbens*.

**FIGURA 3.1** Sistemas de culturas que compõem o experimento, conduzido em sistema de plantio direto.

## **4. ESTUDO I**

### **Estoques de C em Argissolo Vermelho sob plantio direto afetados por sistemas de culturas e adubação nitrogenada**

#### **4.1 Introdução**

A matéria orgânica (MO) é um componente fundamental para a qualidade e a produtividade dos solos agrícolas, apresentando marcada influência em processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo e dando origem a várias propriedades emergentes (Addiscott, 1995). Desta forma, é imprescindível que se busque a manutenção e/ou incremento dos estoques de MO no solo, através de práticas de manejo que privilegiem elevadas adições de C e N ao solo e ao mesmo tempo diminuam as suas perdas. Para isto, sabe-se que a adoção de sistemas de culturas que proporcionam elevadas produções de fitomassa e a adição de N ao solo via fixação biológica ou adubação mineral são importantes estratégias de manejo para aumentar a adição do C e N ao solo (Bayer et al., 2000a; Lovato, 2001; Diekow, 2003). O cultivo de espécies de cobertura, especialmente leguminosas estivais, merece ser destacado devido à elevada produção de fitomassa e à elevada quantidade de N fixado biologicamente (Aita, 1997; Burle et al., 1997; Amado et al., 2001). A diminuição das perdas, por outro lado, pode ser alcançada através da adoção do sistema de plantio direto, onde o mínimo revolvimento do solo proporciona sensíveis reduções nas taxas de mineralização da MO e diminuição da erosão (Lovato et al., 2004). As elevadas

adições de C e N, em adição a menores taxas de perdas dos mesmos, proporcionam maiores estoques destes elementos no solo (Mielniczuk et al., 2003).

Apesar do nível de conhecimento e do significativo volume de trabalhos sobre o efeito dos sistemas de culturas e da adubação nitrogenada sobre a dinâmica da MO no sul do Brasil (Medeiros, 1985; Teixeira, 1988; Pavinato, 1993; Burle et al., 1997; Bayer et al., 2000a; Bayer et al., 2000c; Pillon, 2000; Lovato, 2001; Diekow, 2003; Mielniczuk et al., 2003), ainda existem lacunas do conhecimento que devem ser melhor elucidadas. O acúmulo de MO em profundidade, por exemplo, é um processo que necessita de melhor compreensão, haja vista que as camadas mais profundas do solo representam um importante reservatório de C para mitigação de gases de efeito estufa, além de proporcionar melhorias das condições do solo às plantas em profundidade. Além disso, a busca de um conhecimento sólido a respeito da dinâmica da MO do solo se faz necessária para possibilitar a simulação de cenários futuros da MO do solo sob diferentes manejos. Para isto, necessita-se que os coeficientes da dinâmica da MO sejam obtidos e ajustados para serem utilizados como parâmetros para modelagem. Nesse sentido, ressalta-se a importância de um maior aprofundamento do conhecimento sobre o assunto, principalmente em um momento em que o mercado de créditos de carbono atrai a atenção não só de cientistas, mas também de governantes e empresários de todas as partes do Planeta.

O seqüestro de C na MO do solo tem sido apontado como sendo uma importante opção para a mitigação da emissão de gases do efeito estufa (Lal, 2002). Devido à dinâmica das alterações nos estoques de MO a partir de uma determinada prática de manejo no tempo ser relativamente lenta, experimentos de longa duração são ferramentas extremamente importantes para tais estudos. Com o avançar do tempo, as diferenças entre tratamentos tendem a ser quantitativamente maiores e possibilitam a obtenção de novas interpretações. Sabendo o estoque inicial de carbono no solo, a adição anual de C pelas culturas e o estoque de C orgânico (CO) no solo num tempo  $t$ , pode-se estimar por métodos simples as perdas anuais de CO ( $k_2$ ) e a taxa anual do C adicionado que é incorporado na MO do solo ( $k_1$ ) (Bayer et al.,

2006b), permitindo a simulação de cenários futuros a respeito de estoques de C em solo sobre determinado manejo.

### **Hipóteses e objetivos**

As hipóteses que nortearam este estudo foram:

- O acúmulo de C no solo é dependente da quantidade deste elemento adicionada ao solo através dos sistemas de cultura e de adubação nitrogenada mineral.
- Sistemas de cultura que englobam o uso de plantas leguminosas, especialmente leguminosas de verão, proporcionam maiores taxas de acúmulo de C ao solo do que sistemas de cultura compostos essencialmente por gramíneas.
- O acúmulo de C em camadas mais profundas do solo em PD é dependente, além da quantidade de C adicionada ao solo, do teor deste elemento nas camadas superficiais do solo.

Este estudo teve por objetivos:

- Avaliar o efeito do cultivo de sistemas de cultura e da adubação nitrogenada mineral sobre os estoques de CO de Argissolo em PD.
- Estimar parâmetros da dinâmica da MO em Argissolo Vermelho de textura franco-arenosa em plantio direto nas condições climáticas da Depressão Central do RS.
- Simular os estoques de CO visando estimar o potencial de recuperação do solo em longo prazo sob sistemas de cultura e adubação nitrogenada.
- Verificar o ajuste do modelo unicompartmental de simulação da dinâmica de CO no solo em experimentos de longa duração sob manejo constante, através da comparação entre os estoques observados e os estimados pelo modelo.

## **4.2 Material e métodos**

### **4.2.1 Tratamentos avaliados e análises realizadas**

As informações referentes ao experimento de longa duração foram descritas no Capítulo 3 (Material e Métodos Geral).

Para este estudo, o solo foi coletado, em outubro de 2002, nos tratamentos pousio/milho (P/M), aveia/milho (A/M), aveia+vica/milho (A+V/M), lablab+milho (L+M), aveia+vica/milho+caupi (A+V/M+C), guandu+milho (G+M) e pangola (Pan), sendo: milho: *Zea mays* L.; aveia: *Avena strigosa* Schreb; vica: *Vigna sativa* L.; lablab: *Lablab purpureum* L. Sweet; caupi: *Vigna unguiculata* (L.) Walp.; guandu: *Cajanus cajan* L. Millsp.. Nos quatro primeiros sistemas de culturas, o solo foi amostrado nos tratamentos sem e com adubação nitrogenada mineral, enquanto nos demais, apenas nos tratamentos sem adubação nitrogenada. As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-2,5, 2,5-5,0, 5,0-7,5, 7,5-12,5, 12,5-17,5 e 17,5-30,0 cm. A coleta foi realizada manualmente, com o auxílio de espátulas e transversalmente às linhas de semeadura do milho, numa área de 20 X 40 cm. O solo foi seco ao ar, moído e peneirado a 2 mm. Após homogeneizado, uma porção de cada amostra foi moída em almofariz (0,5 mm) e submetida à análise de CO e N total.

### **4.2.2 Análise de C e cálculo dos estoques desse elemento no solo**

O CO do solo foi analisado por combustão seca em equipamento Shimadzu TOC-V CSH. Os estoques de CO foram calculados utilizando o método da massa equivalente (Bayer, 2003), empregando os valores de densidade do solo da Tabela 4.1. Os solos dos sistemas A+V/M e A+V/M+C, que apresentaram os mesmos valores de densidade entre eles, apresentaram maior massa na camada de 0-30 cm de profundidade que os solos dos demais sistemas. Por isso, a massa de solo destes tratamentos foi utilizada como referência para o ajuste da espessura de cada camada dos demais tratamentos para atingir a massa equivalente do solo de referência.

**TABELA 4.1** Densidade do solo sob sistemas de culturas em plantio direto.

Profundidade	Sistema de cultura						
	P/M <sup>1</sup>	A/M	A+V/M+C	L+M	A+V/M	G+M	Pan
---- cm ----	----- Mg m <sup>-3</sup> -----						
0-2,5	1,54	1,54	1,54	1,55	1,54	1,44	1,14
2,5-5,0 <sup>2</sup>	1,56	1,56	1,58	1,61	1,58	1,65	1,36
5,0-7,5	1,56	1,56	1,58	1,67	1,58	1,65	1,57
7,5-12,5	1,62	1,62	1,66	1,66	1,66	1,65	1,55
12,5-17,5	1,62	1,62	1,66	1,66	1,66	1,65	1,61
17,5-30,0	1,62	1,59	1,66	1,63	1,66	1,65	1,64

<sup>1</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi, L=lablab, G=guandu e Pan=pangola;

<sup>2</sup> Os valores das camadas 2,5-5,0, 5,0-7,5, 7,5-12,5 e 12,5-17,5 foram obtidos a partir de densidade da camada de 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm, exceto L+M e pangola.

#### 4.2.3 Produção de fitomassa pelas culturas

A avaliação de massa seca das culturas de cobertura de inverno foi realizada em setembro de 2002. Coletou-se uma área equivalente a 0,5 m<sup>2</sup> em cada parcela.

A adição média anual de C ao solo pelos sistemas de cultura para o período de 1983 a 2002 foi calculada somando o aporte de fitomassa ao solo pelo milho com os aportes das demais culturas de cobertura. Para tal, a estimativa da adição de C pelo milho foi feita a partir de compilação dos dados históricos de produtividade de milho dos 19 anos de condução, utilizando a equação de Lovato (2001) para obter a adição de fitomassa do milho a partir das produtividades de grãos. A adição média de C ao solo pelas demais culturas foi estimada utilizando-se as médias dos dados de Bragagnolo (1986), Testa (1989), Pavinato (1993) e Burle (1995), além dos dados coletados no presente estudo. Utilizou-se para a estimativa da adição de C pelo milho e pelas culturas de cobertura um teor médio de 40% deste elemento na matéria seca. Considerou-se a contribuição média do sistema radicular em 30% do total do C contido na parte aérea.



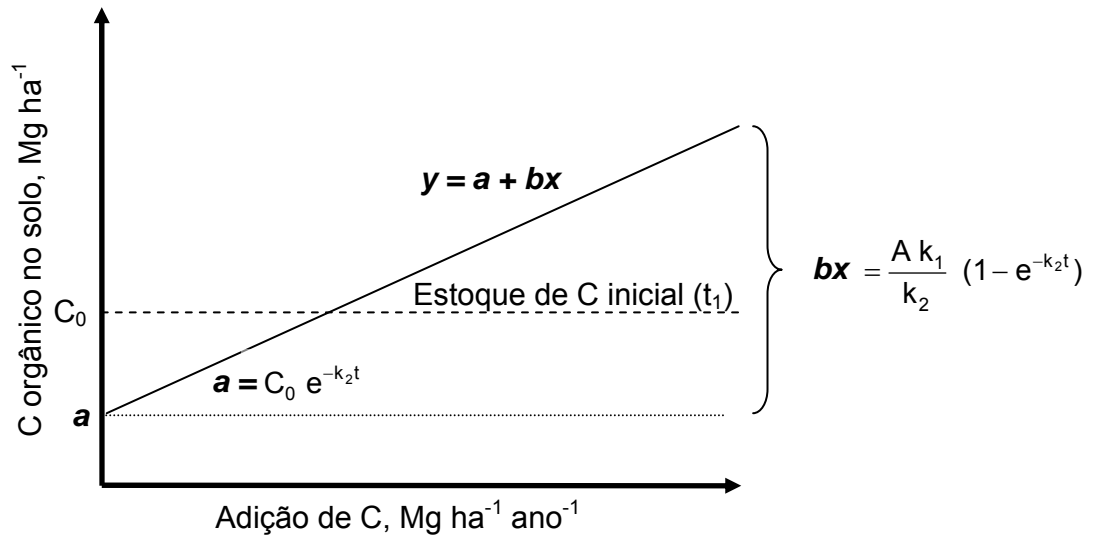
#### 4.2.4 Estimativa dos coeficientes $k_1$ e $k_2$

Para o estudo de modelagem da matéria orgânica do solo, utilizou-se o modelo unicompartmental proposto por Dalal & Mayer (1986), cuja equação pode ser apresentada da seguinte forma:

$$CO = C_0 e^{-k_2 t} + \left( \frac{A k_1}{k_2} \right) (1 - e^{-k_2 t}) \quad (4.1)$$

onde: CO: estoque de C orgânico de determinada camada de solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $C_0$  = estoque de CO inicial ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $k_1$  = coeficiente de humificação (adimensional);  $k_2$  = taxa de decomposição ( $\text{ano}^{-1}$ );  $A$  = adição anual de C pelas culturas ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $t$  = tempo (anos). Nesta equação,  $C_0 e^{-k_2 t}$  significa a redução do CO original do solo com o passar do tempo, enquanto  $(A k_1/k_2) (1 - e^{-k_2 t})$  equivale à contribuição do C adicionado pelas culturas no estoque de C orgânico do solo.

Os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  foram estimados a partir da relação entre o CO do solo com a adição anual de C pelos sistemas de cultura (Figura 4.1), através da equação linear da reta obtida ( $y = a + bx$ ). O decréscimo no estoque de C no tempo se a adição de C ao solo fosse nula, no período avaliado, resultaria num estoque de C no solo que seria equivalente ao “a” da equação linear e, assim sendo, poder-se-ia afirmar que “ $a = C_0 e^{-k_2 t}$ ”. Deste modo, conhecendo-se o  $C_0$  (estoque de C inicial) e o estoque de C no solo em  $t = 19$  anos, pode-se obter o valor de  $k_2$  substituindo os termos desta equação.



**FIGURA 4.1** Representação esquemática da relação entre estoque de C orgânico do solo e adição anual de C pelas culturas e a sua analogia ao modelo unicompartmental, utilizada para obtenção dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ .

De forma semelhante, o incremento no estoque de C dado pelo aporte de C ao solo é equivalente ao termo “bx” da equação linear, e logo “bx =  $(A k_1/k_2) (1 - e^{-k_2 t})$ ”. Substituindo os termos, pode-se estimar o valor de  $k_1$ .

No presente estudo, a estimativa de  $k_1$  e  $k_2$  foi realizada utilizando dados de estoque de CO correspondentes à camada de 0-17,5 cm de profundidade em 2002 (19 anos de condução do experimento).

A partir dos parâmetros da dinâmica do C no solo ( $k_1$  e  $k_2$ ) estimados e dos aportes anuais de C foram realizadas simulações dos estoques de CO no solo no período de 40 anos pelo ajuste do modelo unicompartmental de Dalal & Mayer (1986). Os resultados das simulações foram comparados com resultados obtidos no 3º ano (1986), 5º (1988), 8º (1991), 10º (1993), 16º (1999) e com os resultados obtidos no presente estudo (19º ano, 2002). Além disso, estimaram-se os valores em que o estoque de C sob cada sistema tenderia a estabilizar ( $C_e$ , em Mg ha<sup>-1</sup>), mantidas as atuais condições de manejo e clima, onde  $C_e = (k_1 A) / k_2$ .

#### **4.2.5 Análise Estatística**

A análise de variância para efeito de sistemas de cultura foi realizada considerando somente os sistemas de culturas sem aplicação de N mineral, enquanto para verificar o efeito do N, considerou-se somente os tratamentos que foram analisados nos dois níveis de adubação nitrogenada. As diferenças entre tratamentos foram avaliadas pelo teste de Tukey com nível de significância de 5%. A performance dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  obtidos foi analisada por regressão linear entre os resultados de estoque de CO do solo das simulações e os resultados obtidos no 19º ano para a camada de 0-17,5 cm. As análises estatísticas de falta de ajuste (lack of fit, LOFIT) e raiz quadrada do erro (RMSE) foram utilizadas para verificar a acurácia das simulações em relação aos dados mensurados, segundo proposição de Smith et al. (1997) para experimentos onde há disponibilidade de dados de repetições, através do programa MODEVAL 1.1.

### **4.3 Resultados e discussão**

#### **4.3.1 Efeito dos sistemas de culturas e adubação nitrogenada nos teores e estoques de C no solo**

Os sistemas de culturas proporcionaram aportes anuais médios de C pela parte aérea e raízes variando entre 2,61 e 7,84 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 4.2), o que equivaleria a cerca de 6,5 a 19,6 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca se considerarmos um teor médio de 40% de C. Na ausência de aplicação de N mineral, os sistemas que englobam o uso de leguminosas apresentaram maiores aportes de C do que sistemas compostos essencialmente com gramíneas, sendo que sistemas com presença de leguminosas estivais (L+M, G+M e A+V/M+C) destacaram-se quanto ao maior aporte em comparação ao sistema com leguminosa hiberna (A+V/M). É importante ressaltar que as leguminosas, além de colaborarem diretamente no aporte de C ao solo, proporcionam uma maior disponibilidade de N no solo e, por conseguinte, maior aporte de C ao solo pela cultura em sucessão.

A aplicação de 180 kg N-uréia ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> proporcionou um incremento no aporte de C ao solo pela cultura do milho de 0,65 a 1,21 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A aplicação deste fertilizante teve efeito positivo sobre o aporte anual de C nos quatro sistemas de cultura avaliados, porém, efeitos mais pronunciados foram encontrados nos sistemas P/M e A/M (1,19 e 1,21 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente), que não incluem o uso de leguminosas.

**TABELA 4.2** Aporte anual de C (parte aérea + 30% equivalente ao aporte de raízes) ao solo por sistemas de culturas em duas doses de adubação nitrogenada mineral. Média de 19 anos.

Sistema de cultura	Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )					
	0			180		
	C. cob. <sup>1</sup>	Milho	Total	C. cob.	Milho	Total
	----- Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----					
1. P/M <sup>2</sup>	0,73	1,88	2,61	0,73	3,07	3,80
2. A/M	1,79	2,60	4,39	1,79	3,81	5,60
3. A+V/M	2,37	3,17	5,54	2,37	3,95	6,32
4. L+M	3,06	3,21	6,27	3,06	3,86	6,92
5. A+V/M+C	3,20	3,40	6,60	-	-	-
6. G+M	5,03	2,81	7,84	-	-	-
7. Pan	3,39	0,39 <sup>3</sup>	3,78	-	-	-

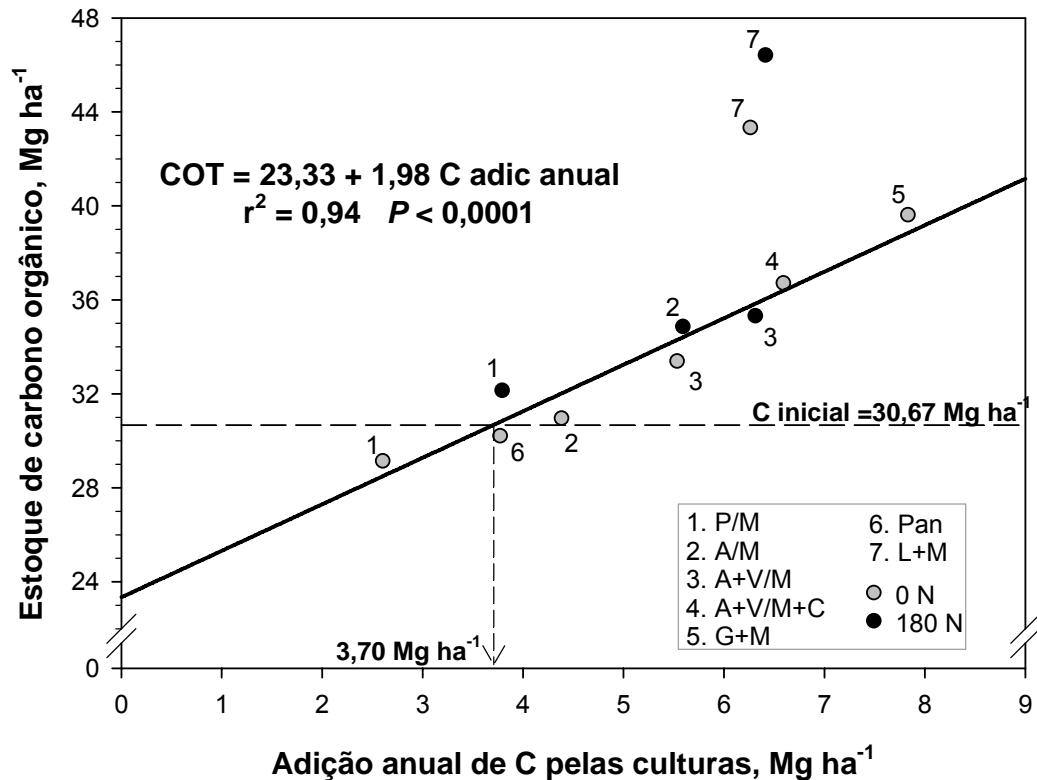
<sup>1</sup> Adição das culturas de cobertura de inverno e verão, se for o caso, com exceção do milho;

<sup>2</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi, L=lalab, G=guandu e Pan=pangola;

<sup>3</sup> Contribuição de 4 safras de milho ao longo de 19 anos.

Os estoques de CO do solo na camada de 0-17,5 cm de profundidade em 2002 apresentaram significativa relação ( $r^2 = 0,94$ ,  $P < 0,0001$ ) com a adição média anual de C ao solo pelos sistemas de culturas (Figura 4.2). Verifica-se que, nas condições do experimento, sob clima subtropical, solo com baixo teor de argila (220 g kg<sup>-1</sup>) e mínimo revolvimento do solo devido ao emprego do sistema de plantio direto, necessita-se de uma adição anual média de 3,70 Mg ha<sup>-1</sup> de C para que se consiga manter o estoque inicial de CO, o que é equivalente à necessidade de adição de 9 Mg de massa seca ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. O coeficiente linear da equação apresentada na figura, de 23,33, representa o provável estoque de CO, em Mg ha<sup>-1</sup>, que o solo teria

ao final de 19 anos se o mesmo não tivesse recebido nenhum ou desprezível aporte de C desde 1983.



**FIGURA 4.2** Relação entre adição anual de C pelas culturas e estoque de C orgânico em 2002, na camada de 0-17,5 cm de profundidade, em Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi, G=guandu, Pan=pangola e L=lablab. Nota: o sistema L+M não foi considerado na regressão.

O sistema lablab+milho não foi incluído na regressão devido a incertezas sobre o real valor de adição de C ao solo por este sistema, já que o lablab apresenta uma constante senescência e renovação de folhas no período vegetativo e, portanto, a amostragem pontual no tempo possivelmente resulte numa subestimativa do real valor de adição de C ao solo por esta cultura

Na ausência de adubação nitrogenada mineral, os sistemas de cultura que englobam leguminosas apresentaram os maiores estoques de C orgânico do solo (Figura 4.2). Os solos sob L+M, G+M e A+V/M+C, que são os sistemas com presença de leguminosa de verão, obtiveram estoques de C orgânico mais elevados que nos demais sistemas de culturas, apresentando na

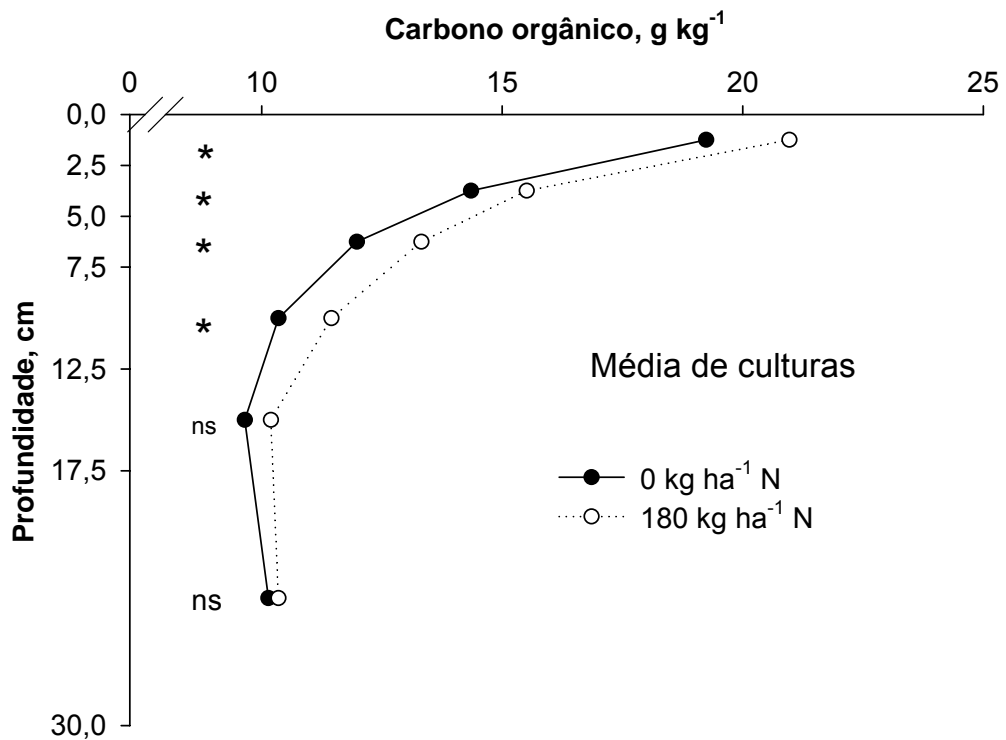
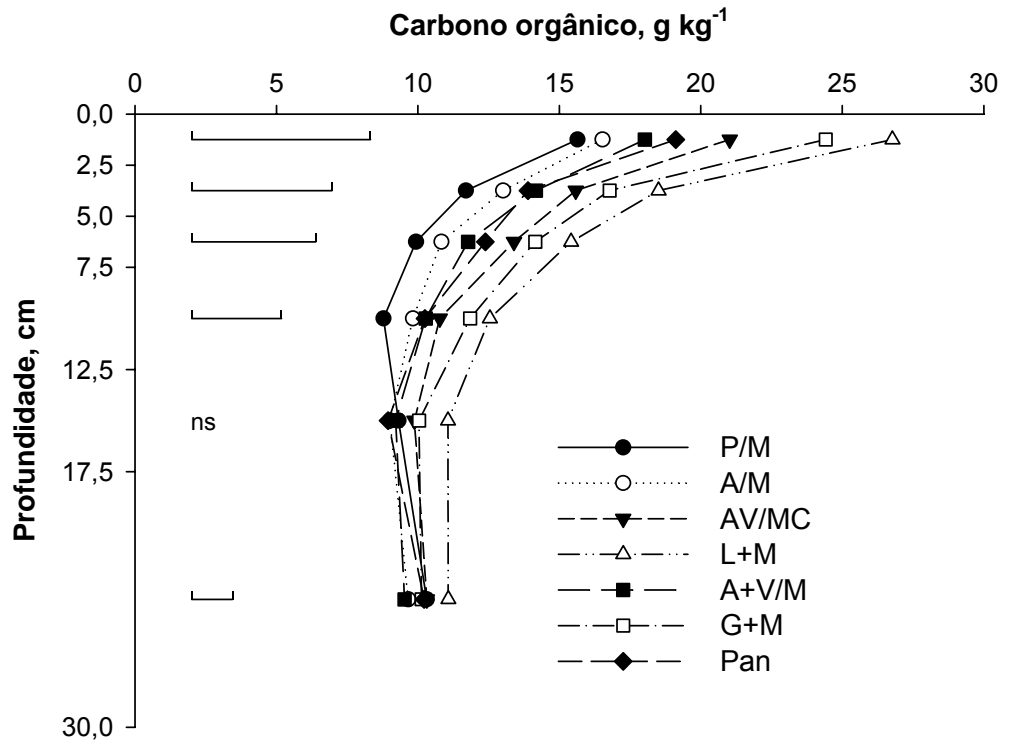
camada de 0-17,5 cm, respectivamente, 55, 36 e 26% a mais de C orgânico do que o sistema P/M.

A aplicação de N mineral promoveu maiores estoques de CO no solo em comparação à ausência desta prática (Figura 4.2), sendo mais efetiva em promover aumento dos estoques de C orgânico no solo em sistemas de cultura que não envolvem leguminosas (P/M e A/M, média de 11,5%) do que em sistemas com leguminosas (L+M e A+V/M, média de 5,5%). Isto indica que nos tratamentos P/M e A/M, principalmente, a menor disponibilidade de N está restringindo a produção de fitomassa e o conseqüente acúmulo de CO no solo. Os incrementos encontrados são semelhantes aos de Lovato et al. (2004), que encontraram aumento no estoque de CO na camada de 0-17,5 cm de 6,8 e 5% para os sistemas A/M e A+V/M, respectivamente, em função da adubação nitrogenada, no experimento adjacente ao do presente estudo. Convém ressaltar que tais incrementos nos estoques de CO são desejáveis agronomicamente, porém, com relação à mitigação das emissões dos gases do efeito estufa, quando os incrementos se dão às custas de aplicações de N mineral, há de se levar em consideração os custos de C para produção e aplicação do fertilizante, podendo resultar em efeito líquido negativo no seqüestro de C (Lal, 2004a; Zanatta et al., In press).

O ciclo do C no sistema solo-planta está intimamente ligado ao ciclo do N. Por isso, quando se objetiva a recuperação dos estoques de MO de um solo degradado, a adição de N ao sistema é um passo fundamental. Entre a utilização de fertilizantes nitrogenados minerais e a inclusão do cultivo de plantas leguminosas no sistema de rotação de culturas, o que se observa é que o N adicionado via fixação simbiótica é mais eficiente que o N via fertilizante em promover acúmulo de C no solo. Um exemplo disto pode ser obtido ao se observar o sistema A/M 0 N. Com a adição anual de 180 kg ha<sup>-1</sup> de N-uréia, o estoque de CO na camada de 0-17,5 passou de 31,42 para 35,39 Mg ha<sup>-1</sup>, o que equivale a um aumento de 1,16 kg de C fixado para cada kg de N-uréia adicionado. Por outro lado, a adição de vica no sistema A/M proporcionou aumento no estoque de CO de 31,42 para 33,36 Mg ha<sup>-1</sup>. Em experimento adjacente ao do estudo, Lovato (2001) verificou que a vica fixou biologicamente 68 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na média de 13 anos. Pressupondo que este valor é semelhante à quantidade de N fixada biologicamente pela vica no presente

estudo, tal fixação promoveu o aumento de 1,9 kg de CO no solo para cada kg de N fixado. Sendo assim, a eficiência do N em acumular C foi 66% maior quando o N foi proveniente da fixação biológica do que quando adveio de aplicação de fertilizante mineral. Possivelmente, isto ocorra devido à sincronia entre a oferta de N e a demanda pelas plantas. No caso do fertilizante mineral, embora este seja aplicado de forma parcelada em duas aplicações no milho, pode haver baixa eficiência no aproveitamento deste nutriente pelas plantas. O N fixado pela associação simbiótica é adicionado ao solo já em formas orgânicas. Possivelmente, quantidade significativa do N aplicado via fertilizante deve estar sendo perdida por volatilização de amônia e lixiviação de nitrato e, neste último caso, as conseqüências em relação a lençóis freáticos e contaminação de águas potáveis pode ser um sério problema.

Em todos os sistemas de culturas, os teores são mais elevados nas camadas próximas à superfície do solo, reduzindo gradativamente à medida que aumenta a profundidade (Figura 4.3). Este comportamento é esperado em sistemas conservacionistas como o plantio direto, onde há mínimo revolvimento do solo no ato de semeadura e, portanto, pouca incorporação mecânica dos resíduos vegetais. Além disso, percebe-se uma tendência de que sistemas de culturas que apresentam maiores teores de CO na camada superficial proporcionam teores mais elevados em subsuperfície e, com o passar do tempo, os teores das camadas mais profundas também passam a diferir estatisticamente. Na média, quando comparados com a camada superficial (0-2,5 cm), as concentrações de CO reduziram-se a aproximadamente 75% na camada de 2,5-5,0 cm e a 50% nas camadas de 12,5-17,5 e 17,5-30,0 cm. Além da contribuição do sistema radicular, os maiores teores de MO em superfície alimentam a fauna do solo, favorecendo a abertura de galerias e a incorporação da MO em profundidade, bem como a descida de CO solúvel. A diferença estatística dos teores de CO entre os sistemas de cultura na camada mais profunda avaliada (17,5-30,0 cm) reforça a idéia de que, embora a maior variação no conteúdo de CO em solos sob plantio direto se dê nas camadas superficiais, estudos da dinâmica da MO



**FIGURA 4.3** Teor de carbono orgânico em Argissolo Vermelho distrófico em plantio direto sob diferentes sistemas de cultura e adubação nitrogenada mineral há 19 anos. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu. ns = não significativo. Barras horizontais demonstram diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5%. \* = difere significativamente pelo teste de Tukey 5%.



em experimentos de longa duração devem, necessariamente, englobar camadas ainda mais profundas, devido à considerável quantidade de CO que pode estar armazenada nestas camadas.

O efeito da adubação nitrogenada sobre o incremento nos teores de CO no perfil se restringiu às camadas mais superficiais do solo, apresentando apenas uma tendência de acúmulo de C nas camadas mais profundas do solo devido à aplicação de N mineral.

O armazenamento do C no solo em camadas mais profundas amplia o potencial do PD e das culturas de cobertura no seqüestro de CO<sub>2</sub> na forma de CO, contribuindo para melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo também em camadas mais profundas. Na Tabela 4.3 estão demonstrados os estoques de CO da camada de 0-17,5 cm em comparação à camada de 0-30 cm de profundidade. Por diferença, verificou-se que o solo da camada de 17,5-30 cm (que representa em torno de 41% do solo presente em 0-30 cm de profundidade) continha cerca de 36 e 37% do CO total da camada de 0-30 cm de profundidade, na média dos sistemas de cultura sob 0 e 180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente, o que é um valor bastante significativo. Diekow et al. (2005a) avaliaram a camada de 0-107,5 cm de profundidade do solo sob plantio direto no mesmo experimento do presente estudo e verificaram que as camadas mais profundas atuaram como fonte ou dreno de C-CO<sub>2</sub> atmosférico, dependendo do sistema de culturas empregado. Os autores verificaram que o sistema G+M, por exemplo, apresentou um acúmulo de 21,2 Mg ha<sup>-1</sup> de C em relação ao sistema A+V/M com aplicação de N mineral, sendo 63% deste acúmulo em profundidades maiores que 17,5 cm. Além do efeito de sistemas de culturas, diferentes sistemas de preparo podem fazer com que as camadas profundas do solo atuem como dreno ou fonte de C-CO<sub>2</sub> atmosférico, sendo que têm sido encontrado maiores estoques de CO nas camadas profundas de solo sob plantio direto do que sob preparo convencional (Sisti et al., 2004; Jantalia et al., In press).

**TABELA 4.3** Estoque de carbono orgânico em Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto e adubação nitrogenada mineral há 19 anos.

Sistema de cultura	Camada do solo considerada					
	0-17,5 cm			0-30 cm		
	0 N <sup>1</sup>	180 N	Média	0 N	180 N	Média
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----					
1. P/M <sup>2</sup>	29,11 c <sup>3</sup>	32,11	30,61 B	49,99 b	53,71	51,85 B
2. A/M	30,93 bc	34,83	32,88 B	50,12 b	54,53	52,32 B
3. L+M	45,23 a	47,56	46,40 A	67,80 a	69,07	68,43 A
4. A+V/M	33,36 bc	35,29	34,32 B	53,14 b	56,62	54,88 B
5. A+V/M+C	36,68 ab	-	-	58,10 ab	-	-
6. G+M	39,59 abc	-	-	60,48 ab	-	-
7. Pangola	30,18 bc	-	-	51,13 b	-	-
Média	35,01	37,44	-	55,82	58,48	-

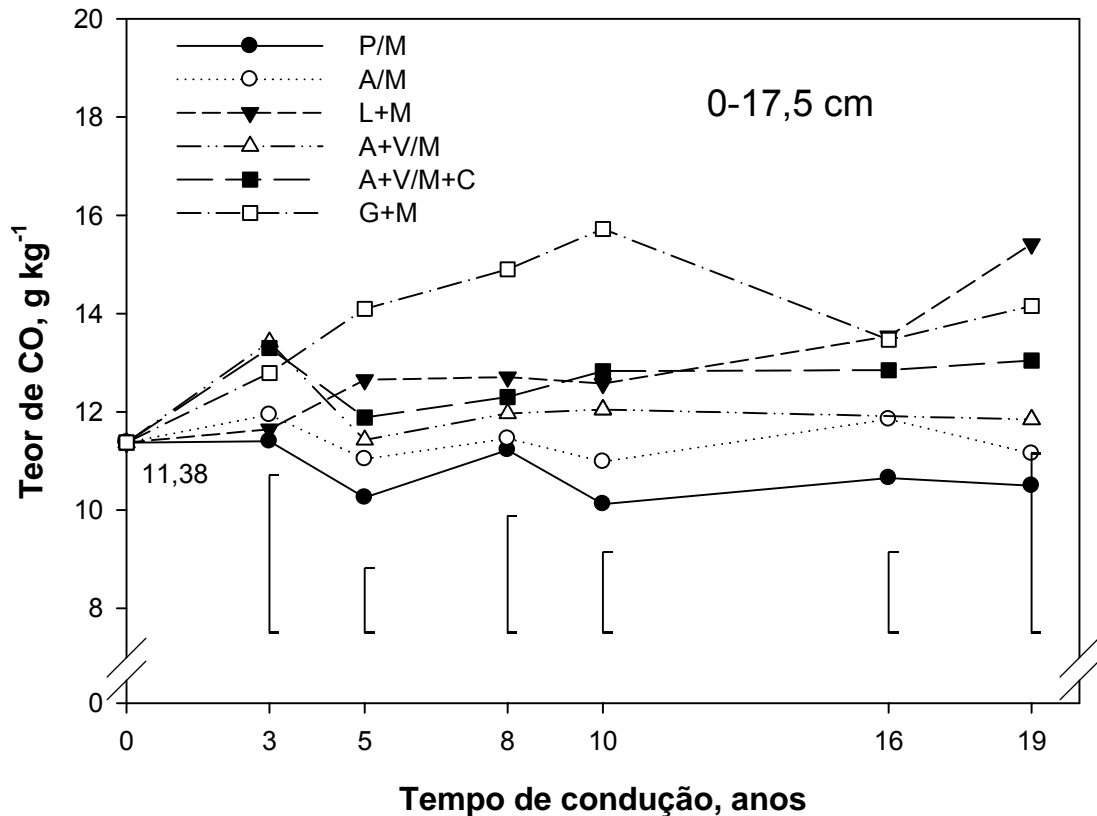
<sup>1</sup> 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N-uréia ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente;

<sup>2</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu;

<sup>3</sup> Médias seguidas de diferentes letras na coluna diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

#### 4.3.2 Evolução do conteúdo de C do solo no tempo

Em razão do intenso revolvimento do solo nos anos anteriores, na implantação do experimento o solo se encontrava com teor de C orgânico de 11,38 g kg<sup>-1</sup> na camada de 0-17,5 cm do solo (Figura 4.4), o que corresponde a um valor relativamente baixo (CQFS RS/SC, 2004). Devido a isto, a implantação dos sistemas de culturas promoveu, em geral, aumento nos teores de C do solo já a partir do 3º ano de condução do experimento. Nas avaliações subseqüentes, praticamente não houve mudança na ordem dos sistemas de cultura quanto aos teores, ou seja, os sistemas de cultura que tenderam a um maior incremento dos teores de C do solo nos 3 primeiros anos são praticamente os mesmos sistemas de cultura que apresentam maiores teores no 19º ano, e vice-versa.



**FIGURA 4.4** Teor de C orgânico na camada de 0-17,5 cm de Argissolo Vermelho distrófico em plantio direto sob sistemas de culturas e sem adubação nitrogenada mineral durante 19 anos. Dados obtidos de Medeiros (1985), Teixeira (1988), Testa (1989), Pavinato (1993), Burle (1995), Pillon (2000) e obtidos neste trabalho. Barras verticais demonstram diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5%. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu.

O solo nos sistemas P/M e A/M apresentou os menores teores de C no 19º ano, sendo inclusive menores que o teor original, o que se deve ao reduzido aporte anual de fitomassa ao solo pelas culturas destes sistemas. O sistema G+M apresentou uma redução destacada nos teores de CO nos últimos nove anos apresentados. A razão para este decréscimo é que, a partir do 10º ano de condução, aproximadamente, começou-se a manejar o guandu de forma a privilegiar a adição de fitomassa pelo mesmo em detrimento à produtividade de milho. Por isso, a participação do milho na adição de fitomassa passou a ser pequena se comparada ao total adicionado ao solo por este sistema de culturas. Apesar da grande quantidade de fitomassa aportada pelo guandu, esta apresenta uma relação C/N baixa e decomposição

relativamente rápida, o que pode ter favorecido a diminuição do teor de C a partir do 10º ano.

#### 4.3.3 Modelagem dos estoques de C no solo

Os parâmetros da equação linear que relaciona a adição média anual de C ao solo pelos sistemas de culturas e os estoques de CO do solo na camada de 0-17,5 cm de profundidade em 2002 (Figura 4.1) foram utilizados para a obtenção dos parâmetros da dinâmica da MO no solo. Estimou-se um  $k_2$  de 0,0144, ou seja, nas condições do estudo, aproximadamente 1,4% do C orgânico do solo foi perdido anualmente por decomposição microbiana, supondo-se que as perdas por erosão e lixiviação no experimento sejam desprezíveis. O  $k_1$  obtido, por sua vez, foi de 0,1191, o que significa que aproximadamente 12% do C adicionado permaneceu efetivamente retido no solo na forma de MO.

O valor obtido para o  $k_1$ , de 11,9%, encontra-se dentro do intervalo de valores médios de  $k_1$  de 7,7 e 23% para parte aérea das culturas citado por Bolinder et al. (1999) e Gregorich et al. (1995), que reportam um valor médio de 12,2%. Balesdent & Balabane (1996) ressaltam, porém, que valores de  $k_1$  do sistema radicular são geralmente maiores que os da parte aérea, devido ao maior teor de lignina das raízes e à proteção física exercida pelos agregados do solo sobre esses resíduos. Após 13 anos de condução de um experimento em área adjacente ao do presente estudo, Lovato et al. (2004) encontraram valor de  $k_1$  de 14,6% para o solo em PD, o que é bem próximo do valor encontrado no presente estudo. Possivelmente, a qualidade dos resíduos vegetais aportados ao solo no presente estudo favoreça um menor coeficiente de humificação, devido à maior labilidade do material em virtude de haver maior presença de leguminosas em comparação ao o experimento avaliado por Lovato et al. (2004).

O valor de  $k_2$  obtido, por sua vez, foi um pouco menor que valores citados na literatura. Valores de  $K_2$  podem variar desde menos de 2% em regiões temperadas e frias (Balesdent et al., 1990) a até 10% em regiões tropicais (Cerri, 1986). Em condição subtropical do Sul do Brasil, em área adjacente à do presente estudo, Bayer (1996) determinou valor de  $k_2$  em solo

sob plantio direto de 2,9%, utilizando um valor fixo para o  $k_1$  de 20%. Lovato et al. (2004), estimando conjuntamente os valores de  $k_1$  e  $k_2$ , encontraram um valor de  $k_2$  de 1,9% em PD, o que também é ligeiramente maior do que o valor de 1,44% estimado no presente estudo.

#### 4.3.4 Simulação dos estoques de C orgânico no solo

Uma vez estimados o  $k_1$  e  $k_2$ , calculou-se os estoques de C do solo para  $t = 19$  anos pelo modelo unicompartmental (Tabela 4.4), através da soma do C original remanescente ( $C_{orig} = C_0 e^{-k_2 t}$ ) e do C proveniente das culturas ( $C_{cult} = k_1 A / k_2 (1 - e^{-k_2 t})$ ), e estes foram comparados aos estoques de C observados (Figura 4.5). Verificou-se que a regressão apresentou elevado coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,96$ ,  $P < 0,0035$ ) e boa relação de grandeza de valores, dada pelo valor do coeficiente angular da reta (b) próximo a 1. Isto indica que os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  obtidos em experimentos de longa duração e o modelo unicompartmental utilizado são coerentes com a dinâmica do C no solo, podendo ser utilizados para a estimativa dos estoques de C em cenários futuros sob diferentes manejos de solo.

**TABELA 4.4** Estoques de C orgânico do solo observados e estimados pelo modelo.

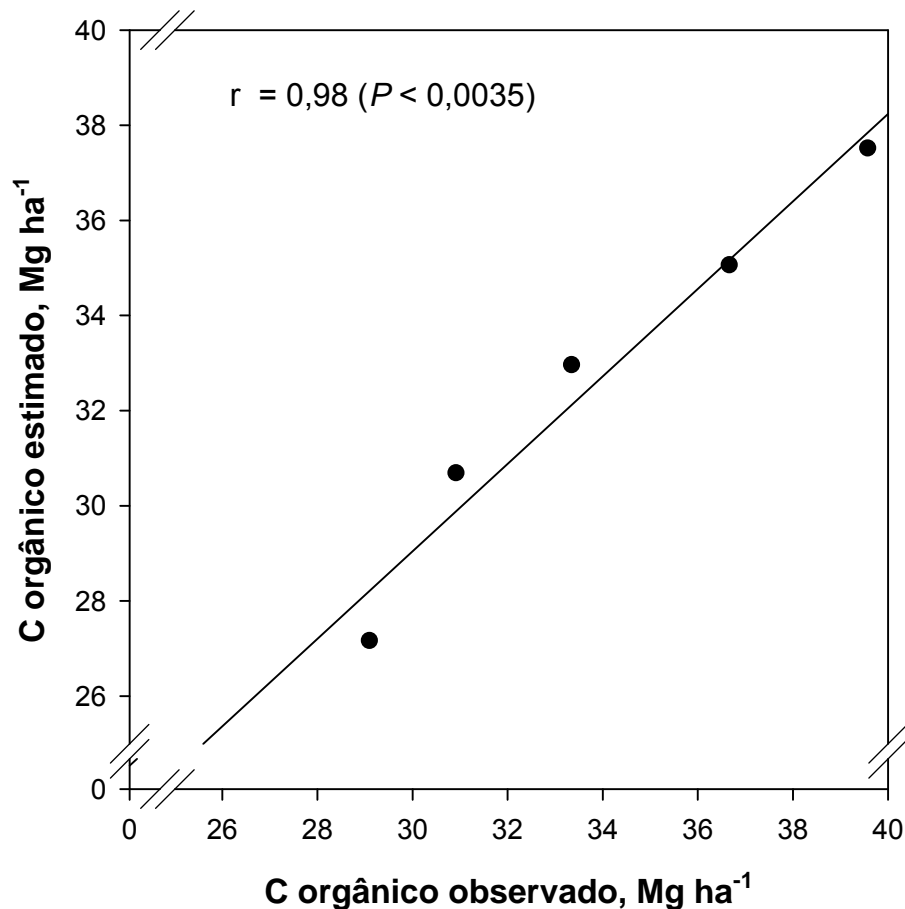
Sistema de cultura	C orgânico no solo no 19º ano (0-17,5 cm)				$C_e$ <sup>3</sup>
	Observado	Estimado			
		C total	C total	C original <sup>1</sup>	
			Mg ha <sup>-1</sup>		
P/M <sup>4</sup>	29,11	27,15	21,98	5,17	21,58
A/M	30,93	30,67	21,98	8,69	36,31
A+V/M	33,36	32,94	21,98	10,96	45,82
A+V/M+C	36,68	35,05	21,98	13,07	54,59
G+M	39,59	37,50	21,98	15,52	64,84

<sup>1</sup> C orgânico original remanescente até o 19º ano;

<sup>2</sup> C proveniente das culturas acumulado no solo;

<sup>3</sup> Estoque de C orgânico total a que o solo tende após longo período sob os diferentes sistemas de manejo;  $C_e = (k_1 A) / k_2$ ;

<sup>4</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu.



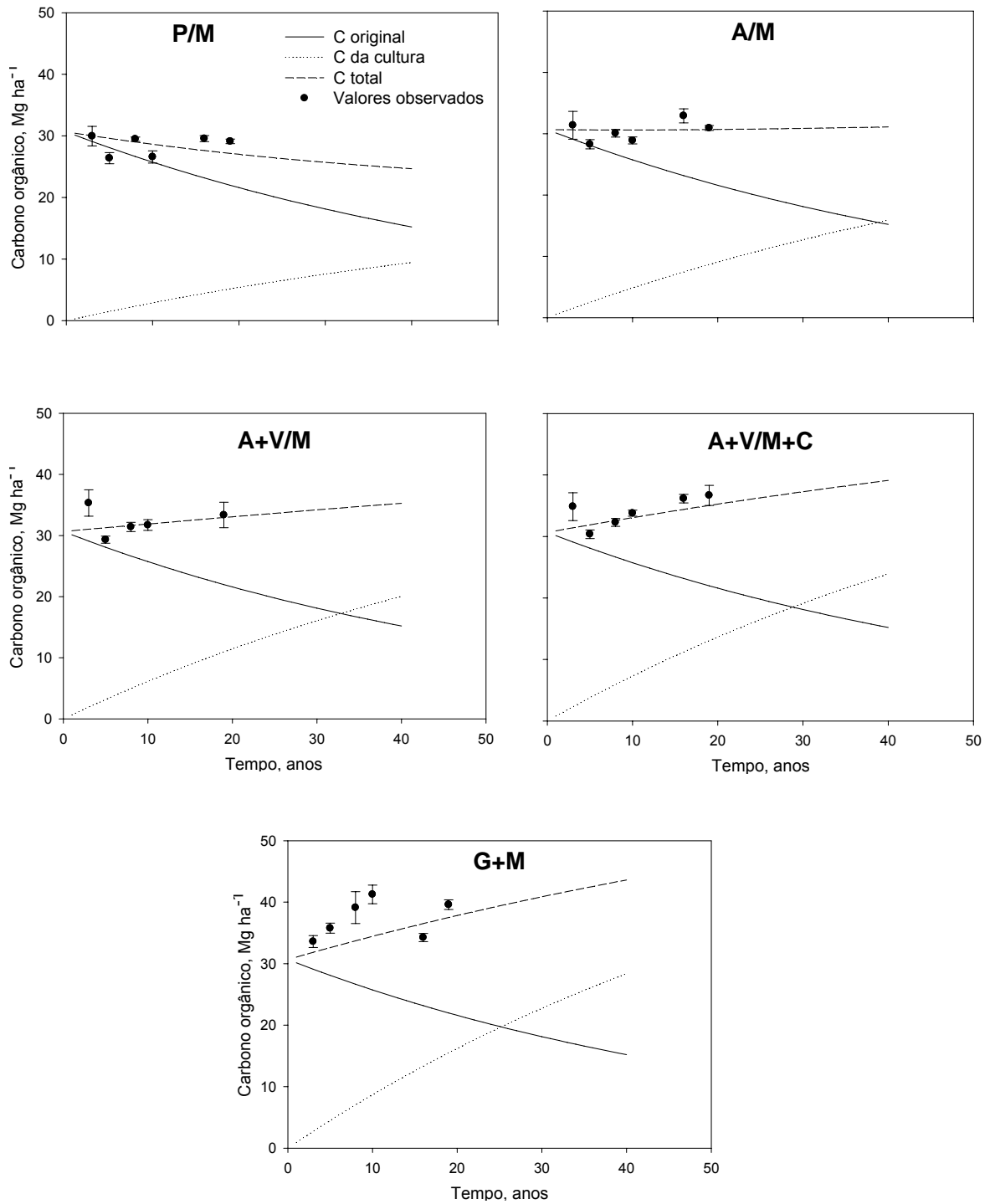
**FIGURA 4.5** Relação entre os estoques de C orgânico observados analiticamente e os estoques de C orgânico estimados pelo modelo na camada de 0-17,5 cm no 19º ano do experimento.

Os resultados obtidos pelo modelo unicompartmental (Tabela 4.4) indicaram que do estoque de CO estimado para a camada de 0-17,5 cm de solo, cerca de 22 Mg de CO ha<sup>-1</sup> seriam provenientes do C original que remanesceu após os 19 anos de cultivo. Este valor é semelhante ao valor de 23,3 Mg ha<sup>-1</sup> obtido a partir da equação linear da Figura 4.2. Além disso, o modelo indicou que o CO que foi adicionado pelas culturas durante este período e acumulou no solo variou de 5,17 Mg ha<sup>-1</sup> no sistema P/M a 15,52 Mg ha<sup>-1</sup> no sistema G+M. Portanto, no sistema G+M, cerca de 40% do CO presente no solo na camada de 0-17,5 cm após 19 anos de cultivo seria proveniente das adições de C por estas duas espécies que constituem este sistema.

Segundo o modelo, o solo sob G+M tenderá a ter seu estoque de C estabilizado no valor de cerca de 65 Mg ha<sup>-1</sup>, apresentando o maior valor de

$C_e$  entre os sistemas avaliados, enquanto, no extremo inferior, o estoque de C do sistema P/M tenderá a cerca de  $21 \text{ Mg ha}^{-1}$ , o que equivale a menos de um terço do estoque do G+M na camada de 0-17,5 cm de profundidade. São mais de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  de C que deixam de ser fixadas no solo considerando apenas a camada de 0-17,5 cm, e este valor seria ainda maior se considerasse também na estimativa as camadas mais subsuperficiais, como indicado na Figura 4.3 e em literatura (Jantalia et al., In press; Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2005a). Estes resultados evidenciam a importância de se utilizar sistemas de cultura que proporcionam elevadas adições de fitomassa ao solo e de se utilizar cultivos em consórcio quando se objetiva manter ou elevar os estoques de MO no solo. Com a inclusão da aveia preta no sistema de rotação P/M, o valor estimado de  $C_e$  aumentaria de cerca de 21 para  $36 \text{ Mg ha}^{-1}$  (equivalente a 70% de aumento), mas este valor ainda poderia ser elevado expressivamente se alguma espécie leguminosa fosse adicionada ao sistema de rotação.

A simulação dos estoques de C no solo no período de 40 anos a partir do início do experimento em 1983 (Figura 4.6) foi realizada através da equação 1, utilizando-se os valores de  $k_1$  e  $k_2$  estimados neste estudo e valores de adição anual de C pelas culturas da Tabela 4.4. De forma geral, os valores estimados se encontram próximos dos valores observados. O sistema G+M, entretanto, apresentou maior variação nos estoques de CO do solo observados, por razões discutidas anteriormente, e que não foi acompanhada pela tendência dos valores simulados.



**FIGURA 4.6** Simulação dos estoques de C total, C original e C advindo dos sistemas de culturas no período de 40 anos a partir do início do experimento em 1983, em Argissolo Vermelho distrófico em PD sob sistemas de culturas. Barras verticais representam o erro padrão dentro de cada sistema de culturas em cada ano ( $n=3$ ). P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu.



Para avaliar a acurácia das simulações em relação aos resultados observados, as análises estatísticas de falta de ajuste (lack of fit, LOFIT) e raiz quadrada do erro médio foram utilizadas, segundo a proposição de Smith et al. (1997) para experimentos onde há disponibilidade de repetições (Tabela 4.5). O teste de F para significância do LOFIT indicou que, nos sistemas A/M, A+V/M e A+V/M+C ( $F < F_{5\%}$ ), o erro total nos valores simulados era significativamente menor do que o erro inerente dos valores observados no campo. Com exceção do G+M, os demais sistemas avaliados apresentaram  $RMSE < RMSE_{95\%}$ , indicando que os valores simulados se encontram dentro do intervalo de confiança (95%) dos resultados mensurados. Portanto, de forma geral, a estimativa dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  e a posterior simulação utilizando os valores destes coeficientes no modelo unicompartimental demonstraram que a metodologia é viável e condizente com a dinâmica do C no solo nas condições do estudo.

**TABELA 4.5** Análises de falta de ajuste (LOFIT) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para avaliar a acurácia da simulação realizada pelo modelo unicompartimental utilizando os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ .

Sistema de cultura <sup>(a)</sup>	$n^{(b)}$	LOFIT	$F^{(c)}$	$F_{5\%}$	RMSE <sup>(d)</sup>	RMSE 95%
P/M	6	54,56	3,77	3,00	6,08	8,69
A/M	6	49,26	1,95	3,00	5,47	10,53
A+V/M	5	65,81	2,06	3,33	6,50	14,41
A+V/M+C	6	64,51	2,28	3,00	5,57	10,23
G+M	6	291,19	8,31	3,00	10,81	10,41

<sup>(a)</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu.

<sup>(b)</sup> Número de avaliações (anos dentro do período de condução do experimento) considerados nas análises estatísticas.

<sup>(c)</sup> O teste F determina a significância da falta de ajuste (LOFIT). Valores de  $F < F_{5\%}$  indicam que os valores simulados não diferem significativamente dos valores observados.

<sup>(d)</sup> Valores de RMSE menores que RMSE 95% indicam que os valores das simulações se encontram dentro dos intervalos de confiança (95%) dos valores observados.

#### 4.4 Conclusões

A inclusão de leguminosas nos sistemas de culturas proporcionou maiores estoques de CO no solo, com destaque para as leguminosas estivais.

A adubação nitrogenada mineral favoreceu maiores estoques de CO no solo, principalmente nos sistemas de cultura compostos exclusivamente por gramíneas.

A adição anual de C ao solo por sistemas de culturas necessária para manter os estoques de C foi de  $3,70 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , o que é equivalente a mais de 9 Mg de massa seca  $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

É viável a estimativa aproximada do coeficiente de humificação e da taxa de decomposição da MO no solo a partir de experimentos de longa duração, nos quais são conhecidos o estoque inicial de CO do solo, a adição anual média de C pelas culturas e os estoques de CO do solo em um determinado tempo de condução do experimento. Os resultados gerados pelo modelo unicompartmental foram adequados com os valores observados.

## **5. ESTUDO II**

### **Índice de Manejo de Carbono baseado em fracionamento físico da matéria orgânica do solo em um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto há 19 anos**

#### **5.1 Introdução**

Tanto o estoque quanto a labilidade do carbono orgânico (CO) do solo influenciam diretamente a capacidade de auto-organização do sistema solo, já que a atividade de microrganismos heterotróficos, dependente do estoque e da labilidade do CO presente, determina os fluxos de energia no solo, influenciando as suas propriedades físicas, químicas e biológicas (Addiscott, 1995; Blair & Crocker, 2000; Vezzani, 2001). Estes dois componentes da matéria orgânica (MO) – quantitativo e qualitativo – podem ser integrados no Índice de Manejo de Carbono (IMC) originalmente proposto por Blair et al. (1995), o qual pode ser empregado como uma ferramenta útil para indicar qualidade de sistemas de manejo de solo (Blair et al., 1995; Diekow et al., 2005a).

Em solos subtropicais submetidos ao manejo conservacionista, o estoque de C (Bayer et al., 2000a, c; Lovato et al., 2004) e o conteúdo de C lábil (Lefroy et al., 1993; Bayer et al., 2001, 2002a,b) são notavelmente dependentes da adição anual de C ao solo pelos sistemas de culturas. Por isso, rotações de culturas com espécies de elevada produção de fitomassa e

cultivo de leguminosas como culturas de cobertura são práticas recomendadas para promover uma melhoria extra na qualidade do solo sob sistemas conservacionistas de manejo. Entretanto, apesar da existência de um razoável número de experimentos de sistemas de preparo conservacionistas de longa duração e de dados gerados, poucos são os estudos de qualidade do solo que integraram o estoque e a labilidade do C em um único indicador, como o IMC.

A labilidade do C é a razão entre a quantidade de C lábil e não lábil, sendo este último estimado por diferença entre o estoque de CO total e o conteúdo de C lábil. Entretanto, a concentração de  $333 \text{ mmol L}^{-1}$  de  $\text{KMnO}_4$  empregada por Blair et al. (1995) para estimativa do C lábil pelo método de oxidação é, frequentemente, muito forte e pouco sensível para detectar mudanças na labilidade do C em alguns solos tropicais e, portanto, concentrações mais baixas de  $\text{KMnO}_4$  têm sido propostas objetivando discriminar melhor a labilidade de C entre os mesmos (Shang e Tiessen, 1997; Weil et al., 2003). A necessidade de calibração no que diz respeito à concentração da solução, tempo de reação e umidade da amostra para cada tipo de solo (Shang e Tiessen, 1997; Weil et al., 2003), bem como a oxidação de  $\text{KMnO}_4$  devido à presença de luz ou  $\text{MnO}_2$  (Blair et al., 1995) constituem dificuldades relacionadas ao emprego deste método de oxidação para determinação da labilidade do C do solo. Tais dificuldades podem ser a principal razão pelo qual o IMC, que depende da estimativa da labilidade do C, não tem sido amplamente adotado em estudos de avaliação de qualidade do solo.

Neste contexto, o fracionamento físico da MO do solo pode ser utilizado na determinação do conteúdo de C lábil – e portanto na labilidade de C – em diferentes solos, superando os problemas relacionados com o método de fracionamento por oxidação com  $\text{KMnO}_4$  e, por conseguinte, facilitando a adoção do IMC. Apesar dos princípios destas técnicas serem completamente diferentes e de que o C lábil determinado por fracionamento físico não corresponde exatamente ao determinado pela oxidação com  $\text{KMnO}_4$ , a idéia principal é de que ambos os métodos permitem a estimativa de um índice relativo de labilidade de C, possibilitando a avaliação comparativa da qualidade de sistemas de manejo. Além disso, o fracionamento físico pode estar mais adequado para estimativa de estoques de C lábil do que a oxidação por  $\text{KMnO}_4$

porque o C lábil determinado por métodos de fracionamento físico parece estar mais relacionado com as funções deste C com as características químicas, físicas e biológicas do solo (Six et al., 1998; Blair & Crocker, 2000; Conceição, 2006). Este fato, adicionado às vantagens práticas da realização do fracionamento físico, indica o grande potencial desta técnica para a estimativa da labilidade do C.

O fracionamento físico é baseado na densidade e/ou no tamanho das partículas de MO (Christensen, 1992). A fração leve obtida no fracionamento densimétrico é composta principalmente de resíduos de plantas, raízes e hifas de fungos em diferentes estágios de decomposição (Gregorich & Janzen, 1996; Baldock & Skjemstad, 2000; Dieckow et al., 2005b; Dieckow et al., 2006). Por apresentar uma taxa de ciclagem mais elevada do que a fração pesada (Balesdent, 1996), considera-se que a fração leve contém maior proporção de C lábil. A fração grosseira obtida no fracionamento granulométrico apresenta características similares e é também considerada como contendo C lábil (Cambardella & Elliot, 1992; Christensen, 1996; Feller & Beare, 1997).

### **Hipóteses e objetivos**

As hipóteses que nortearam este estudo foram:

- Métodos de fracionamento físico para determinação da labilidade da MO do solo são mais sensíveis às mudanças na fração lábil decorrentes do manejo do solo que métodos químicos, possibilitando serem utilizados na estimativa do Índice de Manejo de C.
- A labilidade da MO aumenta em solo sob plantio direto submetido a sistemas de cultura com alto aporte de C e N.
- A presença de leguminosas em sistemas de culturas e a adubação nitrogenada favorecem o aumento tanto do estoque de CO total quanto de frações lábeis no solo e, por conseguinte, promovem qualidade ao mesmo.

Este estudo teve por objetivos:

- Avaliar o fracionamento físico granulométrico e densimétrico da MO do solo para estimativa da labilidade do C do solo como métodos alternativos ao método de oxidação convencional.
- Verificar a relação entre a adição anual de resíduos ao solo pelos sistemas de culturas e os índices de estoque e de labilidade do C em solo sob plantio direto.
- Avaliar a relação entre os índices de manejo de C e as características químicas, físicas e biológicas de um Argissolo sob diferentes sistemas de cultura em plantio direto e fertilização nitrogenada mineral há 19 anos.

## **5.2 Material e métodos**

### **5.2.1 Tratamentos e análise de C**

As informações referentes ao experimento de longa duração e as coletas de solo foram descritas no Capítulo 3 (Material e Métodos Geral).

Para o estudo II, as análises foram realizadas em amostras de solo dos sistemas aveia/milho (A/M), aveia+vica/milho (A+V/M), aveia+vica/milho+caupi (A+V/M+C) e guandu+milho (G+M). Os dois primeiros sistemas de cultura foram avaliados sem e com adubação nitrogenada mineral (0 e 180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), enquanto os dois últimos foram avaliados somente na ausência da adubação nitrogenada.

Amostras de solo da camada de 0-12,5 cm foram coletadas em outubro de 2002, imediatamente antes da dessecação das espécies de inverno e semeadura do milho. Portanto, no momento da amostragem, havia sobre o solo resíduos de aveia preta no sistema A/M, aveia preta e vica no sistema A+V/M e A+V/M+C e resíduos de guandu no sistema G+M, em quantidades de 1,8, 2,4 e 5,0 Mg C ha<sup>-1</sup>. A aveia e a vica encontravam-se nos estádios fenológicos de grão leitoso e pleno florescimento, respectivamente, enquanto o caupi encontrava-se em estágio vegetativo. As amostras de solo foram coletadas manualmente com o auxílio de espátulas e de forma transversal às linhas de semeadura do milho, sob um retângulo de 20 X 40 cm. O solo foi

seco ao ar, moído e peneirado a 2 mm. O solo de uma área sob campo nativo adjacente ao experimento, onde *Paspalum* sp. e *Andropogon* sp. eram os gêneros de plantas predominantes, foi também amostrado na mesma profundidade e foi utilizado como referência do efeito dos sistemas de manejo no estoque e labilidade de CO do solo. A concentração de CO foi determinada por combustão seca utilizando um analisador de CO total Shimadzu VCSH. O carbono lábil foi determinado através de oxidação por  $\text{KMnO}_4$  ou por fracionamento físico.

Algumas características físicas, químicas e biológicas do solo sob diferentes sistemas de cultura em plantio direto, obtidas a partir de estudos anteriores realizados no mesmo experimento de longa duração, são apresentados na Tabela 5.1.

### 5.2.2 Oxidação química com $\text{KMnO}_4$

Duas concentrações de  $\text{KMnO}_4$  foram utilizadas: a concentração original de  $333 \text{ mmol L}^{-1}$  sugerida por Blair et al. (1995) e uma concentração mais baixa, de  $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , proposta neste estudo como sendo mais sensível para determinar C lábil, de acordo com sugestões de Shang & Tiessen (1997) e Weil et al. (2003).

Amostras de solo contendo 15 mg de CO foram dispostas em frascos snap-caps de 100 mL, aos quais foram adicionados 25 mL de solução de  $\text{KMnO}_4$ , ajustada nas concentrações de 333 ou  $60 \text{ mmol L}^{-1}$ . As suspensões foram agitadas horizontalmente por uma hora ( $60 \text{ ciclos min}^{-1}$ ) e centrifugadas em  $715 g$  por 5 minutos. A solução sobrenadante foi separada, diluída com água destilada nas proporções de 1:1000 e 1:250 para as concentrações de  $\text{KMnO}_4$  333 e  $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , respectivamente, e então a absorvância em 565 nm foi determinada através de um colorímetro (Spectronic 20 Genesys). A depleção da concentração de  $\text{KMnO}_4$  foi diretamente relacionada com a concentração de C oxidado, denominado como C lábil do solo, assumindo que  $1 \text{ mmol L}^{-1}$  de  $\text{MnO}_4^-$  é consumido para oxidar 9 mg de C. A fim de evitar a fotooxidação do  $\text{KMnO}_4$ , cuidados foram tomados para impedir a incidência de luz na solução.

**TABELA 5.1** Adição anual de C (parte aérea), produtividade média de grãos de milho e características químicas, físicas e biológicas de Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Parâmetro	N mineral	Tempo <sup>(a)</sup>	Profundidade	Sistema de cultura <sup>(b)</sup>			
				A/M	A+V/M	A+V/M+C	G+M
	(kg ha <sup>-1</sup> )	(anos)	(cm)				
Adição anual de C (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) <sup>(c)</sup>	0	19	-	3,4	4,3	5,1	6,0
	180	19	-	4,3	4,9		
Produtividade média de milho (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>(c)</sup>	0	19	-	2,4	3,8	4,4	4,7
	180	19	-	7,1	6,9	-	-
<b>Características de solo</b>							
<i>Biológicas</i> <sup>(d)</sup>							
Biomassa microbiana (mg C-CO <sub>2</sub> kg solo <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	410	-	469	428
Respiração microbiana (mg C-CO <sub>2</sub> kg solo <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	100	-	135	154
β-glucosidase (μg p-nitrofenol g solo <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	97	-	135	146
Urease (μg N-NH <sub>4</sub> g solo <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	40	-	51	53
Fosfatase ácida (μg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	404	-	518	617
Amidase (μg N-NH <sub>4</sub> g solo <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	199	-	228	267
Arilsulfatase (μg p-nitrofenol g solo <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0	17	0-10	134	-	169	209
<i>Químicas</i>							
N orgânico (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>(e)</sup>	0	19	0-7,5	1,4	1,7	1,8	2,0
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) solo <sup>(f)</sup>	0	10	0-2,5	4,2	4,3	5,0	7,5
CTC pH 7,0, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> solo <sup>(f)</sup>	0	10	0-7,5	7,2	7,7	7,8	10,0
<i>Físicas (agregados)</i> <sup>(g)</sup>							
DMP seco (mm) <sup>(h)</sup>	0	10	0-7,5	3,4	-	4,4	4,6
DMP úmido (mm) <sup>(h)</sup>	0	10	0-7,5	1,5	-	1,7	2,6
Macroagregados > 0,025 mm, %	0	10	0-7,5	70,3	-	73,7	74,4

<sup>(a)</sup> Refere-se à idade do experimento quando a informação foi obtida; <sup>(b)</sup> M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu; <sup>(c)</sup> Média obtida de compilação a partir de dados históricos (não publicados); <sup>(d)</sup> Schmitz (2003); <sup>(e)</sup> Zanatta et al. (2003); <sup>(f)</sup> Burle et al. (1997); <sup>(g)</sup> Méndez (1996); <sup>(h)</sup> Diâmetro médio ponderado.



### 5.2.3 Fracionamentos físicos densimétrico e granulométrico

Para o método densimétrico, baseado em Six et al. (1998), uma suspensão com 20 g de solo (seco ao ar e peneirado a < 2 mm) e 70 mL de solução de iodeto de sódio (NaI, densidade de 1,8 Mg m<sup>-3</sup>), em um tubo de centrífuga, foi sonicada até completa dispersão do solo, empregando um nível de energia de 250 J mL<sup>-1</sup>. Após a centrifugação da suspensão a 2000 g por 30 min, o sobrenadante contendo a fração leve foi filtrada a vácuo através de filtro de fibra de vidro de 0,45 µm (Whatman 1822, previamente seco a 50 °C e pesado). O filtro mais a fração leve de cada amostra foram enxaguados com água destilada para remover os sais de NaI, secos a 50 °C, moídos em um ral de ágata e analisados quanto ao C orgânico total presente utilizando o analisador de CO total Shimadzu VCSH.

Para o fracionamento granulométrico, 20 g de solo (seco ao ar e peneirado a < 2 mm) e 70 mL de solução de hexametáfosfato de sódio foram dispostos em frascos snap-cap de 100 mL de capacidade e foram agitados horizontalmente por 15 h (60 ciclos min<sup>-1</sup>). A suspensão foi peneirada em peneira de 53 µm e a fração grosseira retida foi enxaguada com aspensão de água destilada, seca a 50 °C, moída e analisada quanto ao CO total (Cambardella & Elliott, 1992).

### 5.2.4 Índice de Manejo de Carbono (IMC)

O IMC foi obtido de acordo com os procedimentos matemáticos sugeridos por Blair et al. (1995), os quais estão presentes abaixo:

$$IMC = IEC \times IL \times 100 \quad (5.1)$$

onde IEC é o índice de estoque de C e IL é o índice de labilidade. O IEC e o IL são calculados conforme segue:

$$IEC = \frac{C \text{ orgânico no tratamento}}{C \text{ orgânico na referência}} \quad (5.2)$$

$$IL = \frac{L \text{ no tratamento}}{L \text{ na referência}} \quad (5.3)$$

onde L refere à labilidade do C, calculado como:

$$L = \frac{C \text{ orgânico lábil}}{C \text{ orgânico não lábil}} \quad (5.4)$$

O solo sob campo nativo foi utilizado como referência e um IMC=100 foi atribuído para este tratamento. O C lábil foi considerado como sendo a porção de CO que foi oxidada por  $\text{KMnO}_4$  60 ou 333  $\text{mmol L}^{-1}$  no método de fracionamento químico, a fração leve no fracionamento densimétrico, ou a fração grosseira no fracionamento granulométrico. O conteúdo de C não lábil foi estimado a partir da diferença entre o estoque de C orgânico e o C lábil.

### 5.2.5 Análise estatística

As análises de variância (ANOVA) para estoque de C e fração lábil de C foram realizadas utilizando o software SAS. Diferenças entre médias foram avaliadas pelo teste de Duncan no nível de significância de 5%. Análises de regressão linear foram empregadas para verificar as relações entre a adição anual de C pelas culturas e os estoques de C orgânico total e lábil do solo, e entre valores de IMC e características químicas, físicas e biológicas do solo.

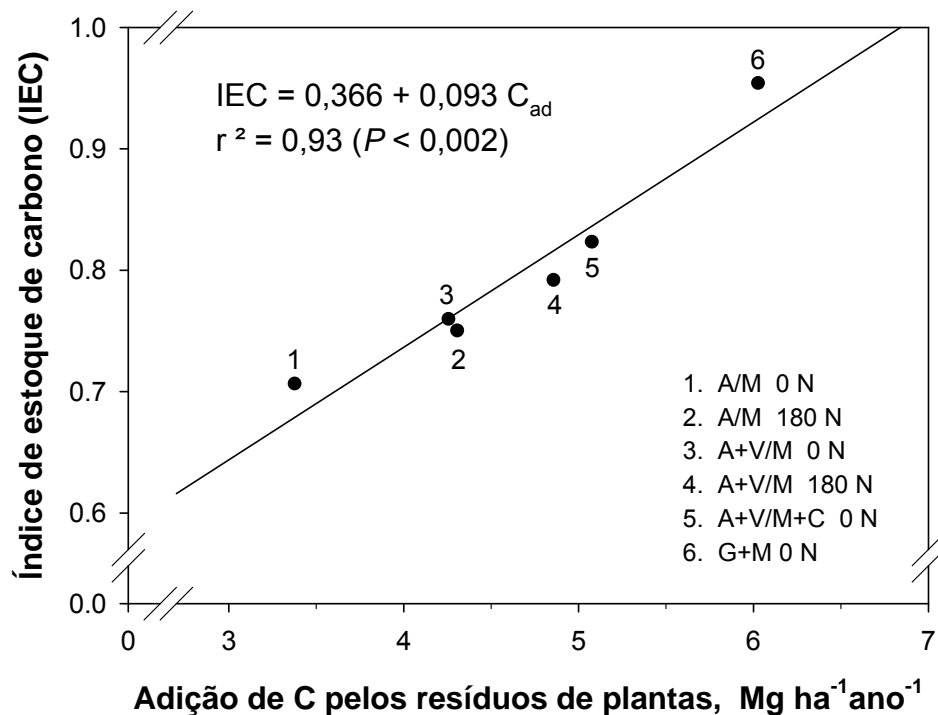
## 5.3 Resultados e discussão

### 5.3.1 Adição de C e Índice de Estoque de Carbono (IEC)

Os sistemas de cultura avaliados apresentaram ampla faixa de adição anual de C pela parte aérea, a qual variou de 3,4 a 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  na média dos 19 anos (Tabela 5.1). As mais elevadas adições ocorreram nos sistemas de cultura que englobam leguminosas (A+V/M, A+V/M+C e G+M) do que sistemas compostos exclusivamente por gramíneas (A/M). Os benefícios

do cultivo de leguminosas incluiu aumento da adição de C e da disponibilidade de N de forma que as espécies não leguminosas do sistema de cultura, cultivadas em subsequência, produzissem mais fitomassa. De forma similar, a fertilização nitrogenada aumentou significativamente a adição de C, especialmente em sistemas de cultura que não envolvem cultivo de leguminosas, onde a adição foi quase  $1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  mais elevada em parcelas com adubação nitrogenada do que em parcelas que não receberam N.

O IEC apresentou estreita correlação com a adição anual de C ( $r^2 = 0,93$ ,  $P < 0,0019$ ) neste solo subtropical avaliado (Figura 5.1). O IEC do sistema G+M (0,95) foi o mais próximo do IEC do campo nativo (1,00), destacando o potencial do uso de consórcios de plantas gramíneas e leguminosas cultivadas concomitantemente para a restauração dos estoques de CO original do solo. A aplicação de N foi também uma prática de manejo importante para aumentar o IEC e recuperar os estoques de C no solo, como observado nos sistemas A/M e A+V/M (Figura 5.1). Estes resultados são similares aos obtidos por Larson et al. (1972), Paustian et al. (1992), Burle et al. (1997) e Bayer et al. (2000a) e, considerando as condições de clima úmido e quente onde o estudo foi desenvolvido, estes resultados demonstram que a recuperação dos estoques de MO em solos degradados submetidos ao plantio direto e ao uso de sistemas de cultura com culturas de cobertura é viável inclusive em solos tropicais e subtropicais (Bayer et al., 2000a; Lal, 2002; West & Post, 2002; Bayer et al., 2006a; Bayer et al., 2006c).



**FIGURA 5.1** Relação entre adições anuais de C por sistemas de culturas e índices de estoque de C em Argissolo sob plantio direto há 19 anos. Média de três repetições. M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , respectivamente.

### 5.3.2 Carbono lábil do solo determinado por métodos químico e físicos

A proporção de C lábil determinado por oxidação química variou com a concentração da solução de  $\text{KMnO}_4$  utilizada. Na concentração de  $333 \text{ mmol L}^{-1}$ , a porcentagem do CO total estimada como sendo C lábil variou entre 16,8 e 38,0%, apresentando média de 29% (Tabela 5.2). Com a concentração de  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , apenas aproximadamente 9% do CO total foi oxidado. Entretanto, este valor foi similar às quantidades de C lábil obtidas pelos fracionamentos físicos densimétrico (7%) e granulométrico (13%).

A maior recuperação de C lábil pelo método granulométrico que pelo densimétrico possivelmente se deve ao fato de que a solução de NaI empregada na separação densimétrica não é tão eficiente em recuperar frações leves da MO do solo (Shang & Tiessen, 2001). Corroborando com isso, recentes estudos do grupo de pesquisa em Manejo de Solos da UFRGS têm

indicado vantagem no uso de politungstato ao invés do NaI na obtenção de melhor separação das frações leves, demonstrando que a solução de politungstato possibilita obter relativamente mais C lábil que o NaI mesmo com o uso da mesma densidade de  $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ , e extrai quantidade ainda maior quando densidades de  $2,0$  e  $2,2 \text{ Mg m}^{-3}$  são empregadas (Conceição, 2006). Outra possível explicação para as maiores quantidades de C lábil obtidas pelo fracionamento granulométrico em relação ao densimétrico é de que o método utilizado para isolar CO pelo tamanho de partículas não leva em consideração a estrutura do solo. A fração grosseira retida na peneira de  $53 \mu\text{m}$  pode conter CO que se encontrava encapsulado ou associado com agregados que, muitas vezes, não seriam considerados como lábeis ou acessíveis à decomposição por microrganismos do solo, no caso da dispersão não ter sido efetiva. Entretanto, análises visuais da fração grosseira retida na peneira não forneceu evidências da presença de agregados de solo, e é importante ressaltar que este solo apresenta textura arenosa, com relativamente baixa concentração de óxidos, o que facilita a sua dispersão.

Baseado em estudos de Bayer et al. (2000b; 2002a), foi assumido que o conteúdo de C lábil em solo sob diferentes sistemas de cultura em plantio direto possui uma relação estreita e direta com a adição anual de C ao solo. Estes autores verificaram, através de técnicas espectroscópicas como ressonância magnética nuclear e ressonância eletrônica de spin, que este solo subtropical em plantio direto submetido a elevadas adições anuais de C por um longo período apresentou maior quantidade de MO lábil em comparação a baixas adições anuais de C. Considerando esta pressuposição, utilizou-se a correlação entre a adição anual de C e o conteúdo de C lábil como um modo de avaliar se os correspondentes métodos de determinação de frações lábeis de C são adequados ou não. Com isto, verificou-se que a oxidação química com solução de  $\text{KMnO}_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$  não foi adequada, ou confiável, para determinar C lábil, dado pela ausência de correlação entre a adição de C e o C lábil correspondente (Figura 5.2A). Por outro lado, as correlações significativas de C lábil determinados por oxidação com  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$  (Figura 5.2B) e por métodos de fracionamento físico densimétrico e granulométrico (Figura 5.2C) com a adição de C sugerem que estes métodos podem ser confiáveis para avaliação do conteúdo de C lábil no solo estudado.

**TABELA 5.2** Teor de carbono orgânico (CO) e de C lábil do solo determinados por oxidação química e fracionamento físico da matéria orgânica de Argissolo em plantio direto sob sistemas de culturas e adubação nitrogenada há 19 anos, e percentagem de C lábil em relação ao CO.

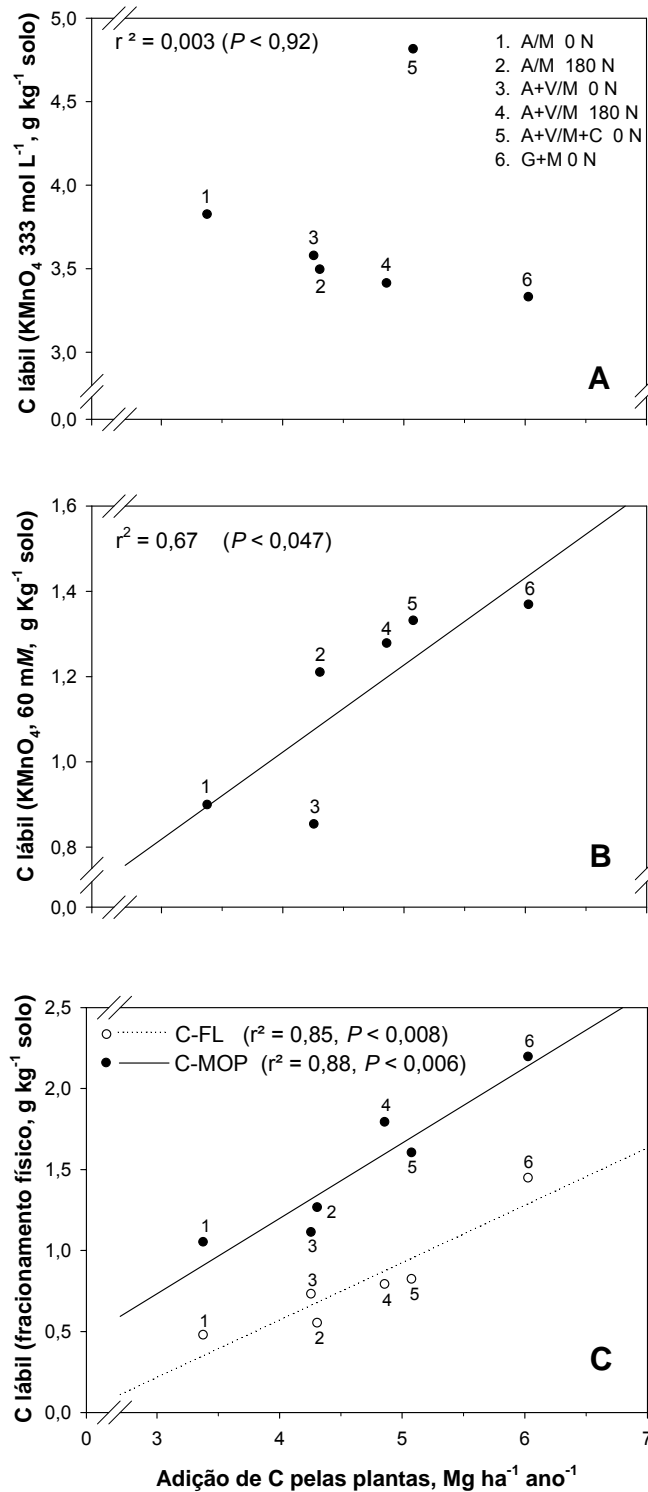
Sistema de Cultura <sup>(a)</sup>	Dose de N kg ha <sup>-1</sup>	CO g kg <sup>-1</sup>	C-KMnO <sub>4</sub>				C-FL <sup>(d)</sup>		C-MOP	
			333 mmol L <sup>-1</sup>		60 mmol L <sup>-1</sup>		g C kg <sup>-1</sup>	% CO	g C kg <sup>-1</sup>	% CO
			g C kg <sup>-1</sup>	% CO	g C kg <sup>-1</sup>	% CO				
A/M	0	10,88 c <sup>(b)</sup>	3,82 a	35,2	0,90 b	8,3	0,48 b	4,4	1,05 b	9,7
	180	11,55	3,49	30,2	1,21	10,5	0,55	4,8	1,26	10,9
A+V/M	0	11,70 bc	3,58 a	30,6	0,85 b	7,3	0,73 b	6,2	1,11 b	9,5
	180	12,19	3,41	28,0	1,28	10,5	0,79	6,5	1,79	14,7
A+V/M+C	0	12,68 b	4,81 a	38,0	1,33 a	10,5	0,82 b	6,5	1,60 ab	12,6
G+M	0	14,69 a	3,33 a	22,7	1,37 a	9,3	1,45 a	9,8	2,20 a	14,9
CN <sup>(c)</sup>	0	15,40	2,59	16,8	1,38	9,0	1,60	10,4	2,72	17,7
Média	0	11,29 A	3,70 A	28,8	0,88 B	9,3	0,61 A	6,9	1,08 B	12,9
	180	11,87 A	3,45 A		1,25 A		0,67 A		1,53 A	

<sup>(a)</sup> M = milho, A = aveia preta, V = vica, C = caupi e G = guandu;

<sup>(b)</sup> Sistemas de cultura e níveis de fertilização nitrogenada mineral seguidos de mesma letra na coluna (letras minúsculas e maiúsculas, respectivamente) não diferem pelo teste de Duncan em 5% de significância;

<sup>(c)</sup> Solo sob campo nativo coletado em local adjacente ao experimento e tomado como solo de referência para o cálculo do IMC.

<sup>(d)</sup> C-FL = C da fração leve, obtida pelo fracionamento densimétrico. C-MOP = C na matéria orgânica particulada, obtida pelo fracionamento granulométrico.



**FIGURA 5.2** Relação entre adição anual de C pelas plantas e C lábil determinado por oxidação química e fracionamento físico da matéria orgânica de Argissolo em plantio direto sob sistemas de cultura e adubação nitrogenada há 19 anos. M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente. C-FL = C na fração leve. C-MOP = C na matéria orgânica particulada.

O método de oxidação por  $\text{KMnO}_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$  provavelmente proporcionou uma superestimativa do C lábil no solo devido ao seu forte poder de oxidação da MO, o que também foi sugerido por Shang & Tiessen (1997) e Weil et al. (2003). Portanto, concentrações mais baixas de  $\text{KMnO}_4$ , tais como de  $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , podem fornecer melhores estimativas de C lábil do solo, como evidenciado pela correlação significativa com a adição de C ( $r^2=0,67$ ,  $P<0,047$ ; Figura 5.2B). Entretanto, correlações ainda mais estreitas foram obtidas com os resultados de fracionamento densimétrico e granulométrico ( $r^2=0,85$ ,  $P<0,0084$  e  $r^2=0,88$ ,  $P<0,0057$ , respectivamente; Figura 5.2C), indicando a confiabilidade destes métodos físicos para a estimativa do C lábil do solo. É difícil estabelecer explicação plausível de porquê os métodos físicos apresentaram melhor correlação com a adição anual de C do que o método por oxidação com  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , já que o C lábil determinado por cada método é de alguma forma diferente. Provavelmente, as frações físicas da MO estão relacionadas principalmente com a adição anual de C ao solo (Bayer et al., 2001; Bayer et al., 2002b; Bayer et al., 2004; Bayer et al., 2006c), enquanto a formação e estabilização do C lábil do solo como açúcares, aminoácidos, alguns ácidos orgânicos e proteínas determinados pelo método químico dependem também da qualidade dos resíduos das culturas (Aita & Giacomini, 2003; Caravaca et al., 2005; Dieckow et al., 2005a; Dieckow et al., 2005b; Dieckow et al., 2006). De acordo com os princípios de cada método de determinação de C lábil, cabe ressaltar que tecidos estruturais das plantas provavelmente não foram completamente oxidados pelo método químico, ao mesmo tempo que a oxidação de açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, microrganismos, alguma celulose e outros tipos de C lábil podem não ter sido incluídos na fração particulada do fracionamento granulométrico.

Os valores do índice de labilidade (IL) obtidos a partir do C lábil estimado pelo método granulométrico (variando entre 0,44 e 0,75) ou densimétrico (variando entre 0,41 e 0,94) apresentaram alta correlação com a adição anual de C pelas plantas ( $r^2=0,76$ ,  $P<0,02$ ; e  $r^2=0,84$ ,  $P<0,01$ , respectivamente), enquanto os valores de IL obtido a partir do C lábil determinado pela oxidação por  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$  (variando entre 0,79 e 1,21) não apresentaram boa relação ( $r^2=0,15$ ,  $P<0,46$ ) (dados não demonstrados).

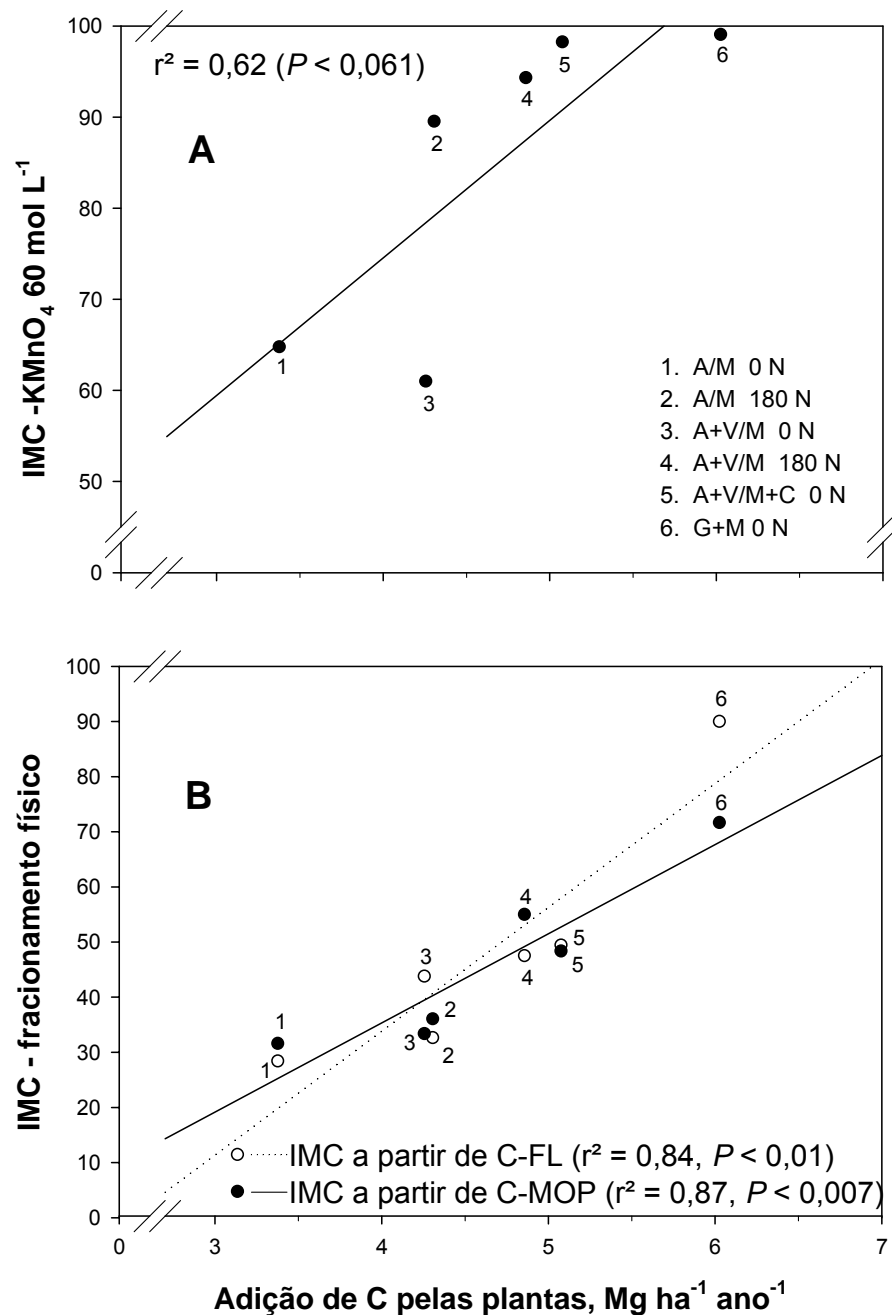


De forma similar, o IMC também apresentou melhor correlação com a adição anual de C quando o C lábil foi determinado através dos métodos de fracionamento físico do que o químico com oxidação com  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$  (Figura 5.3). Entre os fracionamentos físicos, o C lábil estimado pelo método granulométrico pareceu estar mais relacionado com a adição de C.

Enquanto o efeito dos sistemas de cultura no estoque de CO é bem conhecido (Burle et al., 1997; Bayer et al., 2000a, c; Lovato et al., 2004), existem relativamente poucos resultados sobre o efeito a longo prazo do manejo do solo na labilidade do C do mesmo. Os fluxos de energia no solo que possibilitam a sua auto-organização dependem tanto do estoque de C quanto a sua labilidade, como fonte de energia aos microrganismos heterotróficos do solo. Portanto, a qualidade do manejo do solo deve ser melhor avaliada levando em consideração os seus efeitos no estoque de C e também na labilidade do C do solo, o que pode ser integrado em um único índice de manejo de C como proposto por Blair et al. (1995).

### **5.3.3 Efeito dos sistemas de cultura e fertilização nitrogenada no IMC**

A qualidade dos sistemas de manejo do solo apresentaram relação com a adição anual de C ao solo pelos sistemas de cultura neste solo subtropical em plantio direto, como evidenciado pela estreita relação entre os valores de IMC e o C adicionado pelos resíduos das culturas (Figura 5.3). Neste sentido, os sistemas de cultura que envolvem leguminosas, particularmente o G+M, que obteve o mais elevado valor de IEC (Figura 5.1) e C lábil (Tabela 5.2), apresentaram mais altos valores de IMC do que sistemas de cultura constituídos essencialmente por plantas de espécies gramíneas (Figura 5.3). Blair & Crocker (2000) e Diekow et al. (2005a) também reportaram aumento dos valores de IMC quando leguminosas foram introduzidas no sistema de rotação de culturas, destacando o papel das leguminosas na adição de C fotossintetizado para o solo. No presente estudo, os valores mais elevados de IMC foram obtidos pelos sistemas de cultura que envolvem a presença de leguminosas de verão (caupi e guandu).



**FIGURA 5.3** Relação entre a adição anual de C pelas plantas e o Índice de Manejo de Carbono (IMC) estimado utilizando valores de C lábil obtidos por (A) oxidação por  $\text{KMnO}_4$  60  $\text{mmol L}^{-1}$  e fracionamentos físicos (B) densimétrico (C-FL) e granulométrico (C-MOP) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos. M=milho, A=aveia preta, V=víca, C=caupi e G=guandu. 0 N e 180 N = 0 e 180  $\text{kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente.

Similarmente ao efeito das leguminosas, a aplicação de N mineral aumentou o IMC, sendo este aumento de 12% a 46% dependendo do método de determinação do C lábil. A fertilização nitrogenada mineral promoveu mais elevados valores de IMC, o que possivelmente se deve não só ao aumento na formação da MO, como consequência do aumento da adição anual de C, mas também devido a mudanças na qualidade da matéria orgânica, tais como a relação C/N, conteúdos de lignina, celulose, hemicelulose, proteínas e carboidratos, modificando, portanto, a labilidade do C à oxidação por  $\text{KMnO}_4$  (Tirol-Padre & Ladha, 2004). Por esta razão, a adição de  $180 \text{ kg N ha}^{-1}$  nos tratamentos A/M e A+V/M aumentou relativamente mais o C lábil determinado pelo método químico de oxidação do que pelos métodos físicos, os quais não discriminaram as possíveis diferenças qualitativas.

#### **5.3.4 Relação entre os valores de IMC e características físicas, químicas e biológicas do solo**

Em geral, os valores de IMC obtidos a partir da oxidação branda ( $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$ ) e dos métodos de fracionamento físico apresentaram alta correlação com as características químicas, físicas e biológicas do solo (Tabela 5.3). Aproximadamente 50% dos atributos analisados tiveram  $P \leq 0,20$ , e 70% tiveram  $P \leq 0,30$ . Isto claramente indica que o IMC é um índice de qualidade confiável para a avaliação de manejos de solo, e reforça a idéia de que tanto a labilidade quanto o estoque de CO desempenham um papel fundamental na sustentabilidade do solo e na manutenção da sua capacidade produtiva.

**TABELA 5.3** Correlação entre Índice de Manejo de Carbono (IMC) determinado por oxidação química e por fracionamentos físicos da matéria orgânica, e características químicas, físicas e biológicas de Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos.

Propriedade	n	KMnO <sub>4</sub> 60 mmol L <sup>-1</sup>		Densimétrico		Granulométrico		
		r	P<	r	P<	r	P<	
Produtividade de milho (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>(a)</sup>	0N	4	0,86	0,14	0,94	0,06	0,94	0,06
	180N	2	-	-	-	-	-	-
<b>Características do solo</b>								
<i>Biológicas</i> <sup>(b)</sup>								
Biomassa microbiana (mg C-CO <sub>2</sub> kg solo <sup>-1</sup> )	3	0,72	0,49	0,12	0,92	0,21	0,87	
Respiração microbiana (mg C-CO <sub>2</sub> kg solo <sup>-1</sup> )	3	0,95	0,21	0,94	0,22	0,97	0,17	
β-glucosidase (μg p-nitrofenol g solo <sup>-1</sup> )	3	0,98	0,12	0,88	0,31	0,92	0,26	
Urease (μg N-NH <sub>4</sub> g solo <sup>-1</sup> )	3	0,99	0,08	0,85	0,36	0,89	0,30	
Fosfatase ácida (μg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	3	0,90	0,29	0,98	0,14	0,99	0,09	
Amidase (μg N-NH <sub>4</sub> g solo <sup>-1</sup> )	3	0,83	0,37	0,99	0,06	1,00	0,01	
Arilsulfatase (μg p-nitrofenol g solo <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	3	0,86	0,34	0,99	0,09	0,99	0,04	
<i>Químicas</i>								
N orgânico N (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>(c)</sup>	4	0,77	0,23	0,92	0,08	0,88	0,12	
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> kg solo) <sup>-1</sup> (d,e)	4	0,76	0,24	0,98	0,02	0,98	0,02	
CTC em pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> kg solo) <sup>-1</sup> (d,e)	4	0,67	0,33	0,99	0,01	0,95	0,05	
<i>Físicas (agregados)</i> <sup>(f)</sup>								
DMP seco (mm) <sup>(g)</sup>	3	0,99	0,09	0,85	0,35	0,90	0,29	
DMP úmido (mm) <sup>(g)</sup>	3	0,66	0,54	0,99	0,11	0,97	0,16	
Macroagregados > 0,025 mm, %	3	0,99	0,09	0,86	0,35	0,90	0,29	

<sup>(a)</sup> Média de 19 safras a partir da compilação de dados históricos (não publicado); <sup>(b)</sup> Schmitz (2003); <sup>(c)</sup> Zanatta et al. (2003); <sup>(d)</sup> Burle et al. (1997); <sup>(e)</sup> Capacidade de troca de cátions; <sup>(f)</sup> Méndez (1996); <sup>(g)</sup> Diâmetro médio ponderado.

Para avaliar como o IMC se relaciona com os indicadores de qualidade do solo, é importante ter uma visão integrada dos processos do solo e de suas características (Doran & Parkin, 1994; Addiscott, 1995; Vezzani, 2001). A MO, especialmente o C lábil, fornece a energia química e nutrientes essenciais para a atividade do sistema biológico no solo. Por isso, indicadores biológicos de qualidade do solo tais como biomassa microbiana, respiração microbiana e atividade enzimática têm recebido destaque nos últimos anos, enfatizando a importância dos microrganismos para os ciclos biogeoquímicos e para a estabilidade estrutural do solo (Doran & Parkin, 1994; Caravaca et al., 2005). De acordo com Dick et al. (1996), solos sob sistemas de manejo que visam promover qualidade do solo deveriam apresentar elevada atividade biológica, refletindo em maior produção de enzimas e em maior potencial de estabilizar e proteger tais enzimas devido à maior produção de colóides orgânicos e maior agregação do solo, e isto é consistente com os resultados do presente estudo.

Neste sentido, é possível enquadrar os tratamentos G+M e A+V/M+C como aqueles que promoveram o mais elevado nível de qualidade do solo, apresentando a maior produtividade de grãos de milho, atividade biológica, estabilidade de agregados, juntamente com uma melhor ciclagem e retenção dos nutrientes, em concordância com os valores mais elevados de IMC. No outro lado, o sistema A/M sem aplicação de N mineral poderia ser ranqueado como o que promoveu o mais baixo nível de qualidade do solo, enquanto o A+V/M poderia ser alocado em uma classificação intermediária.

A estreita correlação entre valores de IMC e agregação do solo (média de  $r=0,88$ ) indica o efeito benéfico dos elevados fluxos de energia e C na estrutura do solo, refletindo na auto-organização do sistema solo (Addiscott, 1995; Vezzani, 2001), ao mesmo tempo em que a agregação do solo aumenta a proteção física do CO do solo contra a decomposição microbiana, agindo como um processo retroalimentado, possibilitando o acúmulo de MO particulada ou lábil (Golchin et al., 1997; Diekow et al., 2005b; Bayer et al., 2006a; Bayer et al., 2006c).

Em geral, verificou-se também estreita relação entre valores de IMC e atividades enzimáticas (média de  $r=0,94$ ), bem como respiração microbiana (média de  $r=0,95$ ). Entretanto, a biomassa microbiana não

apresentou relação com IMC quando este foi calculado utilizando o C lábil dos fracionamentos físicos (média de  $r=0,17$ ), contrariamente à melhor relação obtida quando foi utilizado o C lábil obtido pela oxidação com  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$  ( $r=0,72$ ). É possível que o C lábil presente na biomassa microbiana seja acessível à oxidação ao mesmo tempo em que é não detectável (ou é detectado em menor proporção) nos métodos de fracionamento físico utilizados. A biomassa microbiana é a principal fonte de enzimas no solo, e é especulado no presente estudo que a aparente contradição no fato de que o IMC utilizando frações físicas de C lábil ter apresentado estreita relação com as atividades enzimáticas mas não se relacionou com a biomassa microbiana pode ser devido às diferentes taxas metabólicas dos microrganismos no solo sob diferentes sistemas de cultura. É importante ressaltar, porém, que as avaliações de C lábil no presente estudo não foram realizadas no mesmo período em que as características químicas, físicas e biológicas foram analisadas (Tabela 5.1), embora todas foram obtidas do mesmo experimento de longa duração. A amostragem do solo para C lábil foi realizada em outubro de 2002, enquanto as amostragens para as análises biológicas foram realizadas em outubro de 2000.

Os resultados da significância estatística precisam ser interpretadas com cautela devido ao baixo número de pontos na correlação ( $n$ ). Apesar disto, os elevados valores de  $r$  permitem inferir que o IMC apresentou alta correlação com as características químicas, físicas e biológicas do solo. Estes resultados reforçam a viabilidade e adequabilidade de utilizar o C lábil por qualquer um dos três métodos (oxidação com  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , densimétrico e granulométrico) para calcular o IMC e avaliar a qualidade de sistemas de manejo de solo.

#### **5.4 Conclusões**

A labilidade do C pode ser determinada por oxidação química utilizando solução de  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$ , bem como pelos métodos de fracionamento físico densimétrico e granulométrico. O método de oxidação com  $\text{KMnO}_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$  tendeu a superestimar o C lábil deste Argissolo arenoso de região subtropical do Sul do Brasil.

O IMC pareceu ser uma ferramenta sensível para avaliar a qualidade de sistemas de manejo de solo, apresentando estreita relação com a adição anual de C pelas plantas ao solo sob plantio direto. O IMC obtido por fracionamento físico apresentou, em geral, alta relação com os indicadores químicos, físicos e biológicos de qualidade de solo.

A presença de espécies leguminosas, com destaque às espécies estivais, e a aplicação de fertilizante nitrogenado mineral promoveram maior qualidade de manejo neste solo sob plantio direto.

## **6. ESTUDO III**

### **Acidificação de um Argissolo Vermelho em plantio direto e sua relação com os ciclos do C e N**

#### **6.1 Introdução**

A acidificação do solo é um processo natural que ocorre em ecossistemas naturais e agrícolas. O estabelecimento da exploração agrícola geralmente aumenta as taxas de acidificação de solos agricultáveis, os quais podem ser notavelmente afetados por práticas de manejo devido aos seus efeitos nos ciclos do C e do N no solo. Os ciclos do C e do N são os principais agentes responsáveis pela acidificação do solo na maioria dos casos, com a acidificação dependendo basicamente das formas e quantidades em que cada elemento entra ou sai do sistema. Os principais mecanismos de acidificação consistem na remoção de materiais vegetais através da colheita de grãos, feno e silagem e na lixiviação de nutrientes (principalmente nitrato), no acúmulo de matéria orgânica, na erosão de solo fértil e nas reações de fertilizantes (Van Breemen et al., 1983; Helyar & Porter, 1989; Fenton & Helyar, 2002; Verburg et al., 2003).

Os sistemas de culturas possuem diferentes capacidades de aporte de C e N ao solo, devido à produção de fitomassa e à fixação biológica de N pelas leguminosas (Aita, 1997; Burle et al., 1997) e, portanto, podem afetar as taxas de acidificação do solo. Além de diferentes quantidades de fitomassa produzida, a qualidade também é diferente nos sistemas de cultura no que se refere à alcalinidade da parte aérea que pode ser removida e à



quantidade de N dos resíduos remanescentes que potencialmente poderá ser nitrificado e perdido por lixiviação. A perda de nitrato por lixiviação pode ser atenuada dependendo da capacidade do sistema radicular da cultura implantada e da necessidade da mesma em absorvê-lo. Para isto, deve haver uma sincronia entre o fornecimento de N através da mineralização e a demanda da planta. Todos estes aspectos fazem com que os sistemas de culturas afetem diretamente o ciclo do C e do N e, portanto, a acidificação do solo (Helyar, 1976; Slattery et al., 1991; Burle et al., 1997).

A aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais é outra prática importante que pode afetar a acidificação por influenciar tanto o ciclo do N como também o ciclo do C no solo (Bouman et al., 1995; Barak et al., 1997). Na acidificação pelo ciclo do N, dois aspectos são relevantes. O primeiro está relacionado com a fonte de N mineral aplicado ao solo, já que cada forma apresenta reações diferentes após a aplicação e diferentes potenciais de acidificação (Bouman et al., 1995; Barak et al., 1997; Fenton & Helyar, 2002). O segundo diz respeito à cinética do N, em que o balanço entre a disponibilidade do nutriente e o requerimento pela planta é desejado não somente para aumentar a eficiência do uso do fertilizante, diminuindo a acidificação pela menor lixiviação de nitrato, mas também por diminuir problemas ambientais de contaminação por nitrato em águas potáveis e por aumentar os lucros dos agricultores.

Dentro deste contexto, convém salientar que foi verificado nos estudos anteriores destacado efeito dos sistemas de culturas e da prática da adubação nitrogenada mineral sobre os ciclos do C e do N no solo, influenciando tanto nos estoques destes elementos no solo (Estudo I) quanto na labilidade da MO presente (Estudo II). Sabe-se também que o experimento tem apresentado diferentes produtividades de grãos de milho, bem como diferentes taxas de acidificação do solo conforme os sistemas de cultura e a adubação nitrogenada (Burle et al., 1997). Entretanto, faltam informações detalhadas sobre a efetividade de cada fator no processo de acidificação em solo sob exploração agrícola em condições subtropicais do Sul do Brasil. A busca de um entendimento sólido dos processos de acidificação e dos fatores mais relevantes que causam acidificação do solo é fundamental para possibilitar o desenvolvimento de estratégias que objetivem reduzir as taxas de

acidificação do solo. Vários estudos têm focado o efeito do ciclo do C na acidificação do solo, principalmente em ecossistemas que utilizam pastagens e forragens (Ridley et al., 1990b; Coventry, 1992; Loss et al., 1993a), mas os efeitos de sistemas de cultivo na acidificação do solo em longo prazo não são ainda bem compreendidos. Similarmente, trabalhos prévios têm comparado diferentes fontes de N mineral e seus efeitos na acidificação do solo (Bouman et al., 1995; Barak et al., 1997), mas poucos buscaram comparar o efeito na acidificação do solo por fontes de fertilizante nitrogenado mineral e por N fixado biologicamente (Burle et al., 1997).

### **Hipóteses e objetivos**

As hipóteses que nortearam este estudo foram:

- A presença de leguminosas em sistemas de culturas e a aplicação de N mineral resultam em acidificação adicional do solo em comparação a sistemas exclusivamente com gramíneas e sem fertilizante nitrogenado e esse efeito é relacionado aos ciclos do C e N no sistema solo-planta.
- Sistemas de cultura afetam a acidificação do solo em diferentes profundidades.

Este estudo teve por objetivos:

- Avaliar a intensidade do processo de acidificação de um Argissolo Vermelho em plantio direto há longo tempo e relacionar com a ciclagem de C e N em sistemas de culturas com e sem a presença de leguminosas, com e sem aplicação de fertilizante nitrogenado mineral há 19 anos, diferenciando os efeitos dos ciclos do C e do N na partição da acidificação total ocorrida no solo.

## **6.2 Material e métodos**

### **6.2.1 Tratamentos e coleta do solo**

As informações referentes ao experimento de longa duração foram descritas no Capítulo 3 (Material e Métodos Geral).

O solo foi coletado em outubro de 2002. Para o Estudo III, as análises foram realizadas nos solos sob pousio/milho (P/M), aveia/milho (A/M), aveia+vica/milho (A+V/M), lablab+milho (L+M), aveia+vica/milho+caupi (A+V/M+C), guandu+milho (G+M) e pangola (Pan). Nos quatro primeiros sistemas de culturas, o solo foi amostrado nos tratamentos sem e com adubação nitrogenada mineral, enquanto nos demais, apenas nos tratamentos sem adubação nitrogenada. As análises foram realizadas nas camadas de 0-2,5, 2,5-5,0, 5,0-7,5, 7,5-12,5, 12,5-17,5 e 17,5-30,0 cm. A coleta foi realizada manualmente, com o auxílio de espátulas em faixa transversal às linhas de semeadura do milho, sob um retângulo de 20 X 40 cm. O solo foi seco ao ar, moído e peneirado a 2 mm.

### **6.2.2 Análises realizadas**

Foram realizadas análises de pH em água (1:1), pH SMP, teores de Ca, Mg, K e Al trocáveis e H+Al tituláveis a pH 7,0, segundo Tedesco et al. (1995), e a saturação por bases e por Al foi então estimada a partir das análises dos cátions trocáveis. A concentração de C orgânico total foi determinada por combustão seca em Analisador de CO Total Shimadzu.

O poder de tamponamento de pH (PTH) do solo nos tratamentos foi determinado através de curvas de pH após adição de ácido e álcali em concentrações conhecidas. Para isto, alíquotas de 20 g de solo (7 repetições) da superfície do solo (0-2,5 cm) dos sistemas de cultura avaliados foram dispostas em frascos snap-cap. Em uma das repetições, adicionou-se 40 ml de água destilada. Nas seis repetições restantes, soluções de HCl e NaOH foram adicionadas em diferentes concentrações (3,9, 7,8 e 17,2 mmol L<sup>-1</sup> e 4,1, 8,7 e 17,4 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente). Após agitação com bastão de vidro, os frascos snap-cap foram fechados hermeticamente e aguardou-se 24 h para

obter equilíbrio e fazer a leitura do pH. A partir dos resultados, o PTH foi estimado considerando a quantidade de ácido ou base (convertidos para  $\text{cmol H}^+$ ) que é requerida para alterar o pH de um kg de solo em uma unidade. O poder de tamponamento estimado é referente ao intervalo de pH 4 a 6, onde a curva de titulação se aproxima de uma reta (Helyar & Porter, 1989). Com base no PTH do solo nos diferentes tratamentos, calculou-se a acidificação total do solo ocorrida nos 19 anos do experimento, através da fórmula sugerida por Helyar & Porter (1989):

$$\text{Acidificação (kmol H}^+ \text{ ha}^{-1}) = \Delta \text{ pH} \times \text{PTH} \times \text{BD} \times \text{V} \quad (6.1)$$

onde:  $\Delta \text{ pH}$  = diferença entre o pH inicial (1983) e os valores de pH atuais (2002); PTH = poder de tamponamento do solo, em  $\text{kmol H}^+ \text{ kg}^{-1} (\text{unid pH})^{-1}$ ; BD = densidade do solo, em  $\text{kg m}^{-3}$ ; V = volume do solo, em  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . O pH do solo em 1983 era 5,8 na camada de 0-17,5 cm (Medeiros, 1985) e 5,2 na camada de 17,5-30,0 (Fernandes, 1998).

Uma vez obtido o poder tampão de cada solo analisado e a acidificação total ocorrida durante os 19 anos do experimento na camada de 0-30 cm de solo, utilizou-se o modelo proposto por Helyar & Porter (1989) para modelagem de acidificação do solo com o objetivo de estimar a contribuição de cada fator na promoção da acidificação:

$$\begin{aligned} \text{Adição de ácido (kmol H}^+ \text{ ha}^{-1} \text{ período}^{-1}) = & \\ = (\text{efeitos do ciclo do C}) & \\ + (\text{efeitos do ciclo do N}) & \\ + (\text{adição de outras fontes de álcalis}) & \\ + (\text{adição de outras fontes de ácidos}) & \end{aligned}$$

o que equivale a:

$$\begin{aligned} \text{Adição de ácido (kmol H}^+ \text{ ha}^{-1} \text{ período}^{-1}) = & \\ = (\text{AO}_{ac} + \text{AO}_{ex} - \text{AO}_{ad} + \text{HCO}_3^- \text{ ex} - \text{HCO}_3^- \text{ ad}) & \\ + (\text{NH}_4^+ \text{ ad} - \text{NO}_3^- \text{ ad} - \text{NH}_4^+ \text{ ac} + \text{NO}_3^- \text{ ac} + \text{NO}_3^- \text{ ex} - \text{NH}_4^+ \text{ ex}) & \\ + (-\text{C}_{ad}) & \\ + (\text{H}^+ \text{ ad}) - (\text{H}^+ \text{ ex}) & \end{aligned} \quad (6.2)$$

onde AO representa ácidos orgânicos na MO, resíduos e produtos de plantas removidos da lavoura;  $\text{HCO}_3^-$  representa os produtos de bicarbonato na solução; e C representa calcário ou outro tipo de álcalis adicionados. Os subscritos ac, ex e ad representam, respectivamente, material acumulado, exportado ou adicionado ao sistema. As unidades de todos os termos são mol (+) ou mol (-)  $\text{ha}^{-1}$  período<sup>-1</sup>. Detalhes sobre o modelo são apresentados em Helyar & Porter (1989) e Verburg et al. (2003).

A acidificação devida ao ciclo do C foi estimada levando em consideração a acidificação devido à remoção de material vegetal alcalino do campo, que no caso correspondeu à colheita de grãos de milho, e às mudanças no conteúdo de MO no solo durante 19 anos. O balanço líquido dos fluxos de bicarbonato na acidificação não foram considerados no cálculo por serem considerados de pequena magnitude na acidificação do solo do presente estudo. Como descrito anteriormente, tal fator é mais efetivo na acidificação líquida quando o pH dos solos é alcalino.

Para a estimativa da alcalinidade dos grãos de milho, amostras contendo 2 g de massa seca de grãos foram queimadas em mufla a 550 °C por 4 h. Posteriormente, 20 mL de HCl 1,00 M foram acrescentados a cada recipiente. A solução foi agitada com bastão de vidro e uma subamostra (5 mL) foi retirada e titulada com NaOH 0,25 mol L<sup>-1</sup>, usando-se fenolftaleína como indicador. Os resultados indicaram que não houve diferença significativa na alcalinidade das cinzas conforme o sistema de cultura e a presença de adubação nitrogenada mineral. Verificou-se que a acidez gerada a partir da colheita de uma tonelada de grãos de milho do campo requer aproximadamente 11,9 kg CaCO<sub>3</sub> para a sua neutralização. Tal resultado é levemente maior que o valor de 9 kg CaCO<sub>3</sub> por tonelada de grãos exportados obtido por Slattery et al. (1991). A acidificação foi convertida para equivalente CaCO<sub>3</sub> assumindo que é necessário aproximadamente 0,5 Mg CaCO<sub>3</sub> para neutralizar 10 kmol H<sup>+</sup> (Fenton & Helyar, 2002).

A acidificação devida ao acúmulo de MO ( $\text{AO}_{ac}$ ) foi estimada considerando a variação dos estoques somente na camada de 0-17,5 cm, uma vez que não há registro de teores de MO para profundidades maiores no período de instalação do experimento e, além disso, em sistema de mínimo

revolvimento do solo como o plantio direto, o acúmulo de MO se dá principalmente nas camadas mais superficiais do solo. De acordo com Fenton & Helyar (2002), o acúmulo de MO parcialmente decomposta ou de biomassa viva ou morta no solo promove um efeito na acidez do solo similar ao da exportação de produtos vegetais alcalinos do campo. Entretanto, o conteúdo de ânions orgânicos da MO do solo não é facilmente mensurável devido a problemas de extração da MO e mudanças durante a extração. Por isto, a equação 6.3, sugerida por Helyar & Porter (1989), foi empregada no presente estudo para estimar a acidificação devido ao acúmulo de MO, a qual assume um valor de CTC (valor médio de 60 solos) de  $32 \text{ cmol kg}^{-1}$  de MO e pH de carga zero de 1,5.

$$OA_{ac} (\text{kmol ha}^{-1}) = \{D \times V \times 0,32 [OM\%_{t2} (\text{pH}_{t1} - 1,5) - OM\%_{t1} (\text{pH}_{t1} - 1,5)]\} \quad (6.3)$$

onde D = densidade do solo, em  $\text{kg m}^{-3}$ , e V = volume do solo, em  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

A perda de amônio e ânions orgânicos por escoamento superficial e lixiviação foi negligenciada do cálculo, bem como o efeito do estoque de C inorgânico no solo. Não foi aplicado calcário no solo desde a implantação do experimento, e não foi detectada ocorrência de chuva ácida no local. Considerou-se que a acidificação devido a ciclos biogeoquímicos de elementos, à exceção do C e N, é desprezível. A acidificação devido à aplicação de superfosfato simples e triplo, porém, foi considerada nas estimativas utilizando um valor de 8 e 15 kg de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente, para neutralizar a acidificação gerada pela aplicação de 100 kg de fertilizante (Bolan & Hedley, 2003). Os sistemas de cultura tiveram a mesma taxa de aplicação de fertilizantes durante os anos de condução (com exceção da pangola, que não é fertilizada com NPK) e, portanto, a acidificação anual dos sistemas de cultura foi equivalente a  $10 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ano}^{-1}$ .

Por diferença entre a acidificação líquida total e a acidificação causada pelos demais fatores supracitados, estimou-se o efeito da lixiviação de nitrato na acidificação do solo. Dentro do ciclo do N, o fator isolado que é

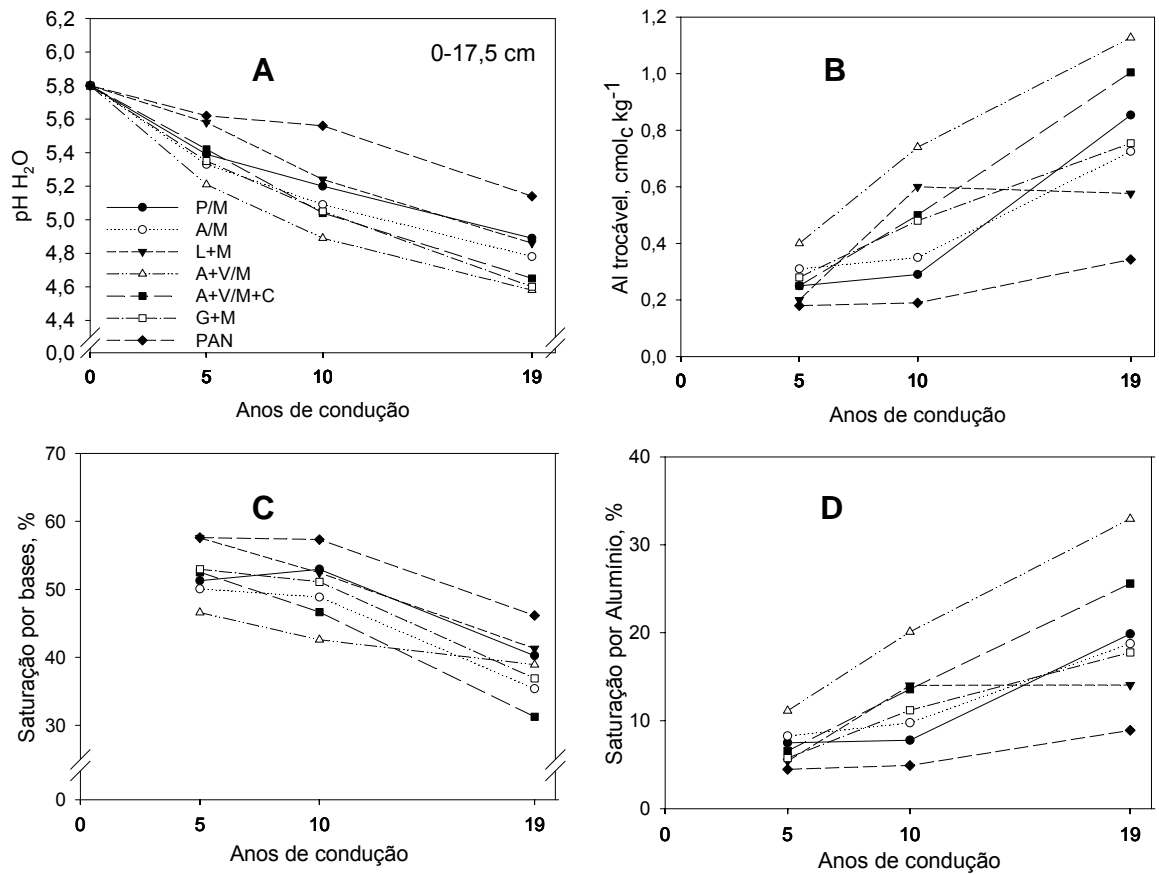
geralmente o maior responsável por causar acidificação do solo é a lixiviação de nitrato após a nitrificação do amônio, o qual provém da aplicação de fertilizante (uréia) ou da mineralização de N orgânico no caso do presente estudo. Na maioria dos solos subtropicais aerados em pH entre 5 e 8, os acúmulos de amônio e nitrato ( $\text{NH}_4^+_{\text{ac}}$  e  $\text{NO}_3^-_{\text{ac}}$ ) são limitados pela nitrificação e pela absorção pelas plantas (Verburg et al., 2003; Helyar & Porter, 1989) e, portanto, os mesmos não foram considerados na estimativa da acidificação.

Os resultados das análises de solo foram avaliadas estatisticamente por análise de variância com três repetições, utilizando o software SAS versão 8.02 (Statistical Analysis System Institute, Cary, NC). Diferenças entre médias de tratamentos foram analisadas pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). As relações entre variáveis foram analisadas através dos coeficientes de determinação.

### **6.3 Resultados e discussão**

#### **6.3.1 Sistemas de cultura e acidificação do solo**

Os valores de pH-H<sub>2</sub>O e Al trocável durante o período do experimento estão demonstrados nas Figuras 6.1A e 6.1B, respectivamente. Os sistemas de culturas que envolvem leguminosas tiveram os maiores decréscimos de pH durante o período de 19 anos, apresentando decréscimo de aproximadamente uma unidade de pH. Em decorrência dos baixos valores de pH, os mesmos tratamentos apresentaram os valores mais elevados de Al trocável, o que é esperado devido ao fato de que à medida que diminui o pH abaixo de 5,5 os teores de Al<sup>3+</sup> trocável aumentam sensivelmente (Volkweiss, 1989). Em geral, as maiores taxas de decréscimo de pH ocorreram nos primeiros anos da implantação do experimento, principalmente até a avaliação do 5º ano de condução, apresentando uma tendência de diminuição da taxa nos anos subseqüentes. Cabe lembrar que no sistema A+V/M, em particular, a cultura da vica só começou a ser cultivada a partir de 1993, sendo que antes, em seu lugar, havia o cultivo de trevo em consórcio com a aveia preta. Coincidentemente, este sistema de cultura promoveu maior declínio dos

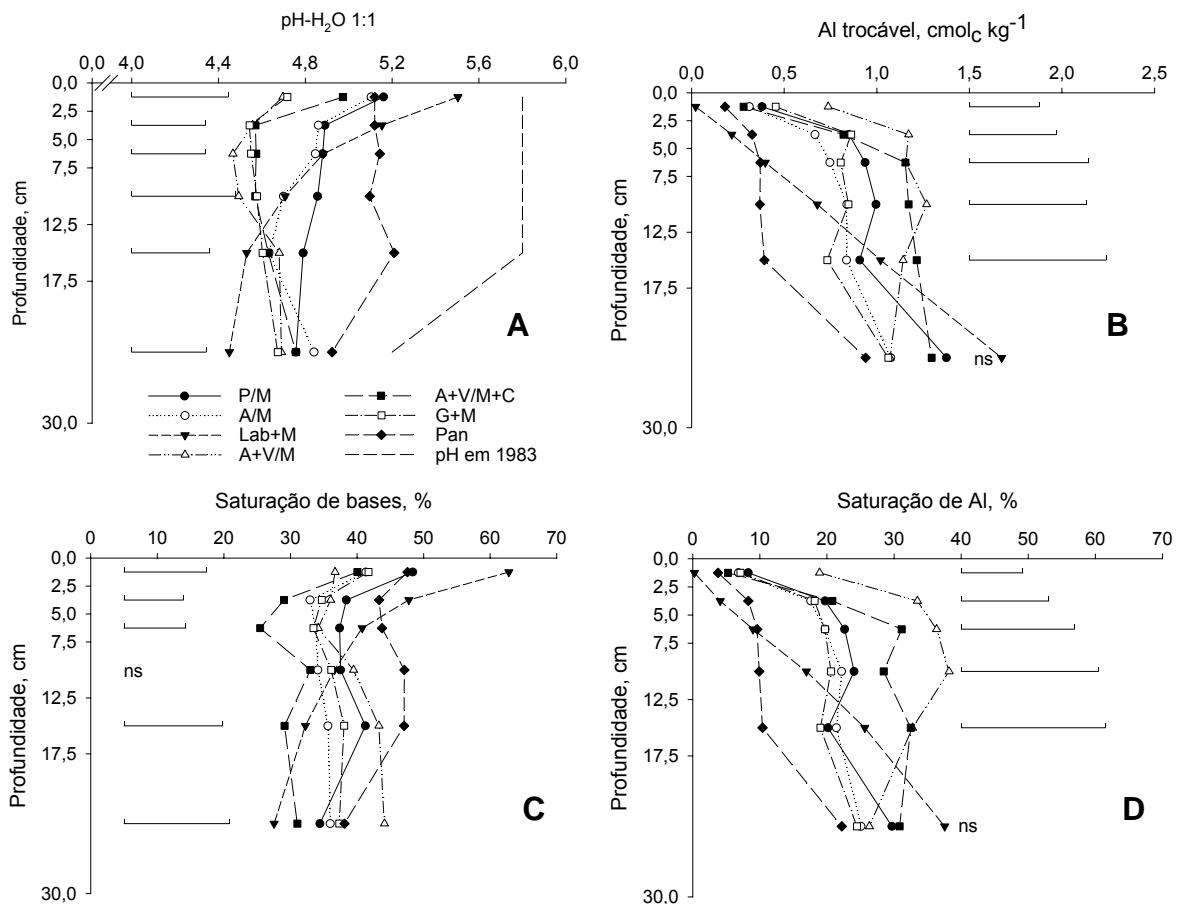


**FIGURA 6.1** Valores de pH-H<sub>2</sub>O (A), Al trocável (B), saturação por bases (C) e saturação por alumínio (D) na camada de 0-17,5 cm de Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto. Resultados do 5º e 10º ano foram obtidos de Testa (1989) e Burle (1995). P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu.



valores de pH do solo durante os primeiros anos do experimento em comparação com os demais sistemas e, após a substituição do trevo por vica, a taxa de declínio de pH diminuiu de tal modo que, na presente avaliação, os sistemas G+M e A+V/M+C apresentaram valores similares aos do A+V/M. O efeito do cultivo de trevo na acidificação do solo é destacado na literatura (Ridley et al., 1990a; Coventry, 1992). Porém, no caso do presente estudo, é possível também que a diminuição da taxa de decréscimo de pH se deva ao fato de que o pH do solo neste tratamento tenha atingido um valor crítico no qual, abaixo de tal valor, há um forte tamponamento devido à dissolução de aluminossilicatos de Al (consumo de  $H^+$ ) e lixiviação de produtos iônicos desta dissolução (Helyar, 2003; Lesturgez et al., 2006). Desta forma, o pH tende a atingir um valor estável (“steady state”), pois a acidificação causada pelos ciclos do C e N tende a se equilibrar com a alcalinização causada principalmente pela dissolução dos minerais (Helyar, 2003).

Os valores de pH do solo encontrados em 1983 e no presente estudo estão demonstrados na Figura 6.2A. Os sistemas de culturas apresentaram diferença significativa nos valores de pH em todas as camadas avaliadas após 19 anos de cultivo em plantio direto. O solo sob pangola apresentou os valores de pH mais elevados, o que é justificado pela baixa exportação de material alcalino pelas plantas, já que só houve cultivo de milho em 4 safras neste sistema, e mínima lixiviação de nitrato, devido ao sistema radicular denso e abundante desta gramínea, o que favorece uma melhor absorção do nitrogênio do solo.



**FIGURA 6.2** Valores de pH-H<sub>2</sub>O (A), Al trocável (B), saturação por bases (C) e saturação por Al (D) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto há 19 anos. Linhas horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (5%) para cada camada de solo. ns = não significativo. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu.

Os sistemas de cultura que englobam leguminosas (G+M, L+M, A+V/M+C e A+V/M) tiveram decréscimo mais intenso no pH do que os sistemas de cultura constituídos essencialmente por gramíneas (P/M, A/M e pangola). Isto se deve ao fato de que estes sistemas promovem maior adição de N ao solo, aumentando por conseguinte o potencial de perdas de nitrato por lixiviação e a remoção de material vegetal alcalino do campo, já que a maior disponibilidade de N favorece o aumento da produtividade de grãos. Diferenças no decréscimo do pH não foram detectadas, porém, entre sistemas de culturas contendo leguminosas subtropicais (vica) e tropicais (caupi, lablab e guandu).

O sistema L+M apresentou um comportamento distinto do pH no perfil do solo, com os valores mais altos de pH na superfície e mais baixos nas

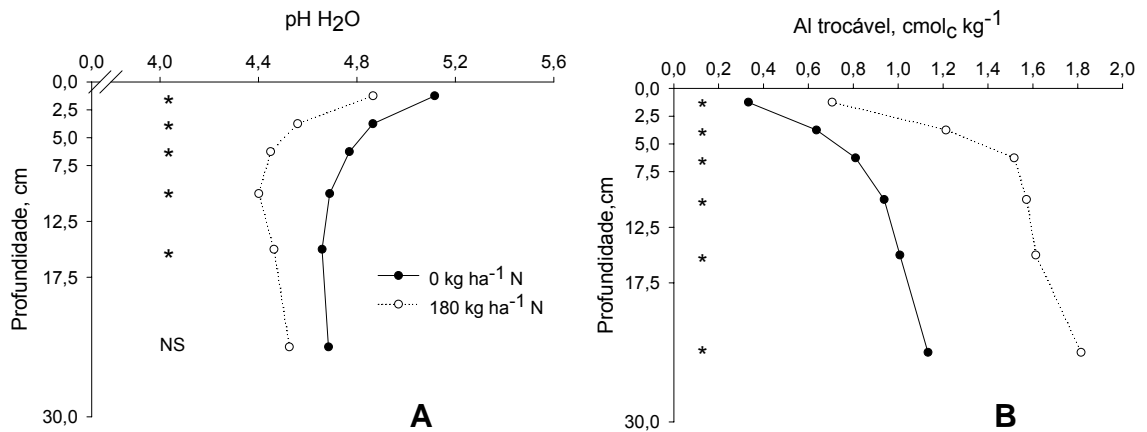
camadas mais profundas, em relação aos demais sistemas de cultura. De acordo com Tang et al. (2000), isto se deve à separação espacial de ácidos e álcalis produzidos nos ciclos do C e do N. No ciclo do C, enquanto ácidos exsudados pelas raízes devido ao excesso de absorção de cátions sobre ânions durante o desenvolvimento da planta são distribuídos em toda a camada de solo explorada pelas raízes, a oxidação dos resíduos de plantas se dá principalmente na superfície do solo, favorecendo, portanto, a acidificação do subsolo e alcalinização da camada superficial. No ciclo do N, a mineralização do N orgânico ocorre principalmente na camada superficial do solo, onde a amonificação + nitrificação geram acidificação líquida, a qual é neutralizada se o nitrato for absorvido pelo sistema radicular devido à exsudação de  $\text{OH}^-/\text{HCO}^-$  que ocorre com fins de manter a neutralidade elétrica das células das raízes. Portanto, em casos onde a lixiviação de nitrato é o principal fator causador de acidificação, se esperaria menor valor de pH em superfície do que em camadas mais profundas do solo. Como isto não se verificou, os resultados sugerem que o ciclo do C teve participação mais efetiva na acidificação do solo do que o ciclo do N, especialmente no sistema L+M. A participação de cada fator na acidificação do solo será discutido de forma mais completa posteriormente (item 6.3.3).

Os valores de saturação por bases (Figura 6.2C), em sua maioria, se encontraram entre 30 e 50%, e valores de saturação por Al (Figura 6.2D) foram elevados (>10%). Estes indicadores, juntamente com os valores de pH e de Al trocável, sugerem que a aplicação de calcário neste solo é recomendável de acordo com os atuais critérios de decisão para calagem no sul do Brasil (CQFS RS/SC, 2004).

### **6.3.2 Adubação nitrogenada mineral e acidificação do solo**

A adubação nitrogenada mineral promoveu um decréscimo significativo no pH do solo (Figura 6.3A), proporcionando também maiores valores de Al trocável (Figura 6.3B), o que pode ser atribuído tanto a uma possível perda de N por lixiviação de nitrato quanto à maior extração de material vegetal alcalino na colheita de grãos. A aplicação anual de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-uréia proporcionou um decréscimo de pH de 0,25 unidade na média dos

sistemas de cultura. Conyers et al. (1996) verificaram que, após 12 anos de condução, a aplicação anual de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na forma de uréia parcelada em três aplicações no trigo proporcionou um decréscimo médio de 0,4 unidade de pH do solo em relação ao solo que não recebeu N mineral (Fenton & Helyar, 2002).



**FIGURA 6.3** Valores de pH-H<sub>2</sub>O e Al trocável de Argissolo Vermelho distrófico sob sistemas de culturas em plantio direto e adubação nitrogenada mineral há 19 anos. \*Teste de Tukey a 5%. NS = sem diferença significativa.

O nitrogênio, quando fornecido pela adubação mineral, foi aplicado na forma de uréia. Segundo Fenton & Helyar (2002), o nitrogênio adicionado ao sistema na forma de uréia ou através de fixação biológica somente gera acidez ao solo se houver perda deste elemento por lixiviação de nitrato. Os autores ilustram que se 100% do N que for adicionado ao sistema por estes meios for perdido por lixiviação de nitrato, estima-se uma necessidade de 3,6 kg de calcário para neutralizar cada kg de N perdido. Esta regra é diferente para outras fontes de adubos nitrogenados, pois no caso de adição de sulfato de amônio ou monoamôniofosfato, mesmo que não ocorra perda por lixiviação há geração de acidez no solo. No caso de nitrato de cálcio ou de sódio, ao contrário, há geração de alcalinidade se não houver perdas de N e os fertilizantes têm efeito nulo na acidificação se 100% do N for perdido por lixiviação de nitrato.

O efeito da adubação nitrogenada mineral na acidificação do solo manifestou-se também no conteúdo de Al trocável (Figura 6.3B), com

diferenças significativas em todas as camadas de solo analisadas. Em algumas camadas, os valores de Al trocável foram quase o dobro nos tratamentos com adubação nitrogenada mineral em comparação com os tratamentos sem esta adubação. Além disso, verifica-se que no solo sem N mineral os teores de Al trocável somente foram ultrapassar o valor de  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , considerado alto (CQFS RS/SC, 2004), na camada mais profunda avaliada (17,5-30,0 cm), enquanto os tratamentos com N mineral proporcionaram valores altos em praticamente toda a camada de solo avaliada, com exceção da camada de 0-2,5 cm.

### 6.3.3 Poder tampão de pH e acidificação líquida do solo

A acidificação líquida do solo, como mencionado anteriormente, é função da mudança de pH e da capacidade de tamponamento de pH (PTH) do solo. Na tabela 6.1 são apresentados os valores de PTH e da acidificação líquida estimada para o solo, obtidos a partir de curvas de titulação em amostras de solo da camada superficial (0-2,5 cm). Os sistemas de culturas P/M, A/M e A+V/M apresentaram as menores capacidades de tamponamento de pH, representando cerca de metade do poder tampão do solo sob L+M. O sistema de culturas que apresentou maior acidificação do solo ( $\text{kmol H}^+ \text{ ha}^{-1}$ ) nesta camada foi o G+M e, entretanto, apresentou praticamente o mesmo valor de pH-H<sub>2</sub>O que o sistema A+V/M. O PTH estimado para a camada superficial destes solos variou entre 0,90 e 1,80  $\text{cmol kg}^{-1} (\text{unid pH})^{-1}$ , encontrando-se, portanto, dentro da faixa de valores entre 0,2 e 3,0  $\text{cmol kg}^{-1} (\text{unid pH})^{-1}$  normalmente relatados em literatura (Coventry & Slattery, 1991; Loss et al., 1993b; Conyers et al., 1996).

**TABELA 6.1** Poder tampão e atributos de acidez da camada superficial (0-2,5 cm) de um Argissolo com sistemas de culturas em plantio direto há 19 anos.

Sistema de cultura	Densidade <sup>(a)</sup> g cm <sup>-3</sup>	Poder tampão <sup>(b)</sup> cmol kg <sup>-1</sup> (unid pH) <sup>-1</sup>	pH-H <sub>2</sub> O		Acidificação do solo <sup>(c)</sup> kmol H <sup>+</sup> ha <sup>-1</sup>
			1983	2002	
P/M <sup>(e)</sup>	1,54	0,90	5,80	5,16	2,22 <sup>(d)</sup>
A/M	1,54	0,95	5,80	5,10	2,56
A+V/M	1,54	0,93	5,80	4,70	3,94
A+V/M+C	1,54	1,30	5,80	4,97	4,15
L+M	1,55	1,80	5,80	5,50	2,09
G+M	1,44	1,35	5,80	4,72	5,25
Pan	1,14	1,18	5,80	5,12	2,29

<sup>(a)</sup> Pillon (2000);

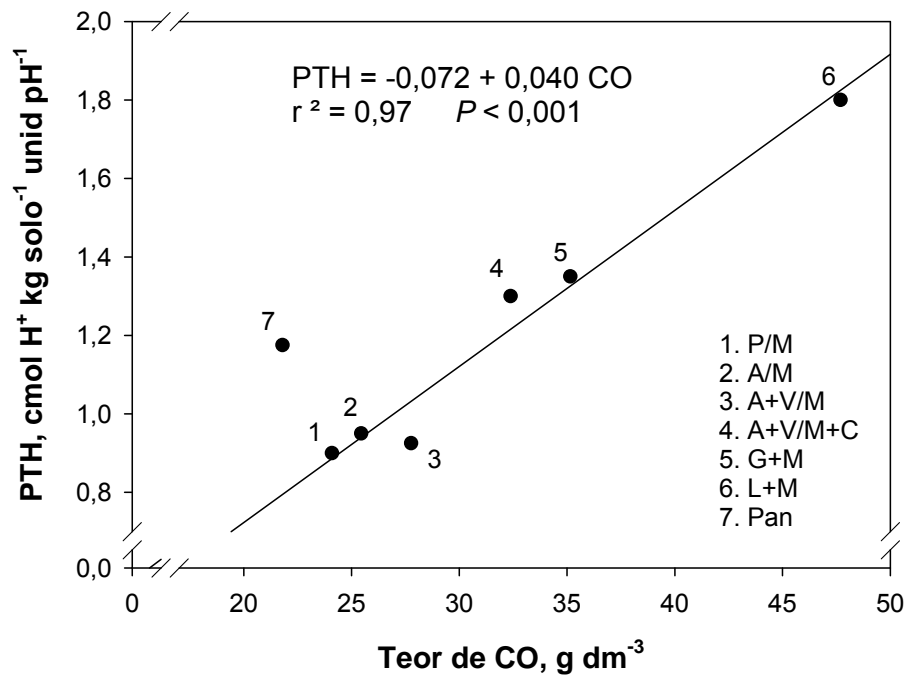
<sup>(b)</sup> Estimado pelas curvas de titulação de pH;

<sup>(c)</sup> Acidificação (kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup>) =  $\Delta$  pH X PTH X BD X V, onde: PTH = poder de tamponamento do solo, em kmol H<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup> (unid pH)<sup>-1</sup>; BD = densidade do solo, em kg m<sup>-3</sup>; V = volume do solo, em m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Camada de solo analisado de 0-2,5 cm de profundidade = 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>;

<sup>(d)</sup> Nota: 10 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> é equivalente a 0,5MgCaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>;

<sup>(e)</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu.

Os dados de poder tampão apresentaram correlação significativa com os teores de C orgânico do solo (Figura 6.5), o que se deve à elevada densidade de grupos funcionais presentes na MO que age como tampão através da protonação/dissociação destes grupos. Observando a equação (PTH = -0,72 + 0,04 COT) pode-se inferir que a capacidade de tamponamento de pH neste solo se dá basicamente pela MO presente, tendo em vista que o PTH seria próximo de zero se os teores de C orgânico fossem muito baixos, o que evidencia os baixos valores de CTC da fração mineral deste solo arenoso e a importância da MO para a retenção de nutrientes.



**FIGURA 6.4** Relação entre poder de tamponamento de pH do solo (PTH) e conteúdo de carbono orgânico em Argissolo Vermelho com sistemas de culturas há 19 anos em plantio direto. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi e G=guandu.

Através da equação obtida na figura 6.4, o PTH das demais camadas do solo foi estimado a partir dos seus teores de C orgânico (tabela 6.2). Os dados de PTH obtidos e os valores de pH-H<sub>2</sub>O e densidade do solo expressos na Tabela 6.2. foram então utilizados na equação 6.1 para estimar a acidificação líquida ocorrida (kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup>) no solo na camada de 0-30 cm no período de 19 anos e a equivalência em CaCO<sub>3</sub> (Tabela 6.3), bem como a contribuição do ciclo do C e do N na acidificação total, conforme a metodologia descrita no item 6.2.2.

Verificou-se que ocorreu acidificação líquida em todos os tratamentos, variando entre 22,0 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> a 65,2 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> (o que necessitaria de 1,11 a 3,26 Mg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> para a sua neutralização, respectivamente) no total dos 19 anos. Isto equivale a uma taxa anual variando de 1,16 a 3,43 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Os sistemas de cultura envolvendo leguminosas apresentaram maior acidificação do que os constituídos essencialmente por gramíneas. Além disso, a aplicação de N mineral promoveu

**TABELA 6.2** Valores de pH-H<sub>2</sub>O, carbono orgânico total, densidade do solo e pH-SMP utilizados para a estimativa da acidificação líquida de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto há 19 anos e adubação nitrogenada mineral.

Camada	P/M <sup>(c)</sup>		A/M		A+V/M		A+V/M+C		L+M		G+M		Pan	
	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N
	pH-H <sub>2</sub> O (2002) <sup>(a)</sup>													
0-2,5	5,16	4,84	5,10	4,58	4,70	4,51	4,97	-	5,50	5,53	4,72	-	5,12	-
2,5-5,0	4,89	4,58	4,86	4,36	4,56	4,30	4,57	-	5,15	5,00	4,54	-	5,12	-
5,0-7,5	4,88	4,54	4,85	4,30	4,47	4,22	4,57	-	4,88	4,73	4,55	-	5,14	-
7,5-12,5	4,86	4,39	4,70	4,32	4,49	4,28	4,57	-	4,71	4,62	4,58	-	5,10	-
12,5-17,5	4,79	4,56	4,63	4,41	4,68	4,37	4,63	-	4,53	4,51	4,60	-	5,21	-
17,5-30,0	4,76	4,59	4,84	4,55	4,69	4,34	4,76	-	4,45	4,62	4,67	-	4,92	-
	Carbono orgânico total, g kg <sup>-1</sup> (2002) <sup>(b)</sup>													
0-2,5	15,64	17,10	16,52	17,31	18,03	20,36	21,02	-	26,77	29,15	24,41	-	19,12	-
2,5-5,0	11,70	12,63	13,01	14,39	14,17	14,45	15,58	-	18,51	20,55	16,78	-	13,89	-
5,0-7,5	9,93	10,51	10,83	13,54	11,78	12,73	13,40	-	15,41	16,50	14,15	-	12,38	-
7,5-12,5	8,78	10,16	9,83	11,19	10,27	10,72	10,78	-	12,54	13,71	11,84	-	10,25	-
12,5-17,5	9,32	10,21	9,02	10,13	9,21	9,41	9,88	-	11,06	11,03	10,04	-	8,94	-
17,5-30,0	10,31	10,67	9,66	9,91	9,53	10,28	10,32	-	11,08	10,55	10,13	-	10,22	-
	Densidade do solo, g cm <sup>-3</sup>													
0-2,5	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	-	1,55	1,55	1,44	-	1,14	-
2,5-5,0	1,56	1,56	1,56	1,56	1,58	1,58	1,58	-	1,61	1,61	1,65	-	1,36	-
5,0-7,5	1,56	1,56	1,56	1,56	1,58	1,58	1,58	-	1,67	1,67	1,65	-	1,57	-
7,5-12,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,66	1,66	1,66	-	1,66	1,66	1,65	-	1,55	-
12,5-17,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,66	1,66	1,66	-	1,63	1,63	1,65	-	1,61	-
17,5-30,0	1,62	1,62	1,59	1,59	1,66	1,66	1,66	-	1,63	1,63	1,65	-	1,64	-
	pH-SMP													
0-2,5	6,20	6,02	6,18	5,84	5,93	5,70	6,08	-	6,39	6,27	5,71	-	6,17	-
2,5-5,0	6,13	5,87	6,08	5,70	5,81	5,73	5,94	-	6,19	5,96	5,74	-	6,28	-
5,0-7,5	6,15	5,85	6,03	5,70	5,84	5,56	5,90	-	6,07	5,80	5,86	-	6,24	-
7,5-12,5	6,08	5,89	6,16	5,66	5,90	5,56	5,95	-	6,01	5,79	5,97	-	6,35	-
12,5-17,5	6,16	5,90	6,10	5,79	5,90	5,73	6,02	-	5,95	5,78	6,07	-	6,29	-
17,5-30,0	5,93	5,81	6,04	5,75	5,88	5,67	5,85	-	5,64	5,70	5,88	-	6,04	-

<sup>(a)</sup> Valor de pH em 1983: 5,8 na camada de solo de 0-17,5 cm e 5,2 na camada de 17,5-30,0 cm; <sup>(b)</sup> Carbono orgânico total em 1983: 13,3 g kg<sup>-1</sup> solo na camada de 0-17,5 cm, e desconhecido na camada de 17,5-30,0 cm; <sup>(c)</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi, G=guandú e Pan=pangola. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.



**TABELA 6.3** Acidificação líquida do solo e fontes de acidez ou alcalinidade (equivalente Mg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>) <sup>(a)</sup> para a camada de 0-30 cm de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos.

Acidificação	P/M <sup>(d)</sup>		A/M		A+V/M		A+V/M+C		L+M		G+M		Pan	
	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N	0 N	180 N
Ciclo do C														
AOac <sup>(b)</sup>	-0,25	-0,07	-0,14	0,07	0,00	0,09	0,18	-	0,76	0,91	0,32	-	-0,19	-
AOex	0,49	1,51	0,57	1,62	0,87	1,58	0,99	-	0,94	1,42	0,84	-	0,08	-
Subtotal	0,24	1,44	0,43	1,69	0,87	1,67	1,17	-	1,69	2,33	1,16	-	-0,11	-
Superfosfato	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	-	0,19	0,19	0,19	-	0,04	-
Ciclo do N <sup>(c)</sup>	1,18	0,78	1,09	0,94	1,30	1,40	1,01	-	0,66	0,06	1,37	-	1,18	-
Total (19 anos)	1,61	2,41	1,71	2,82	2,36	3,26	2,38	-	2,55	2,59	2,72	-	1,11	-
% devido ao ciclo do C	(14,9)	(59,7)	(24,9)	(60,0)	(36,9)	(51,3)	(49,5)	-	(66,5)	(90,2)	(42,7)	-	(0)	-
% devido ao ciclo do N	(73,3)	(32,4)	(63,9)	(33,3)	(55,0)	(42,9)	(42,5)	-	(26,1)	(2,5)	(50,3)	-	(100)	-

<sup>(a)</sup> Nota: 1 Mg CaCO<sub>3</sub> é necessário para neutralizar 20 kmol H<sup>+</sup>. Valores negativos indicam alcalinização, e positivos, acidificação.

<sup>(b)</sup> AOac = mudança no estoque de carbono orgânico total do solo; AOexp = exportação de material vegetal alcalino pela colheita de grãos de milho.

<sup>(c)</sup> Estimados por diferença entre a acidificação total e os demais fatores que não o ciclo do N.

<sup>(d)</sup> P=pousio, M=milho, A=aveia preta, L=lablab, V=vica, C=caupi, G=guandu e Pan=pangola. 0 N e 180 N = 0 e 180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

maior acidificação, com exceção do solo no sistema L+M, onde diferenças na acidificação devido à adubação nitrogenada não foram observadas. As aplicações de 180 kg N-uréia ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nos sistemas P/M, A/M e A+V/M aumentaram a acidificação líquida em 49, 65 e 38%, respectivamente. A acidificação mais acentuada aconteceu nos solos sob A+V/M e A/M, ambos com aplicação de 180 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Porém, a necessidade de calcário para elevar o pH dos solos ao valor encontrado em 1983 é relativamente baixa, haja visto que os resultados indicaram uma necessidade de no máximo 3,26 Mg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>.

As taxas de acidificação anual encontradas no presente estudo são coerentes com as taxas típicas de acidificação de solos em ecossistemas agrícolas de 2 a 5 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, segundo Helyar et al. (2003). Porém, esta faixa pode ser mais ampla de acordo com a atividade agrícola empregada. Coventry & Slattery (1991) relataram adição líquida de acidez de 3,22, 4,11 e 5,26 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para monocultivo de trigo, rotação trigo-tremoço e monocultivo de tremoço, respectivamente, para a camada de 0-20 cm de profundidade. Lesturgez et al. (2006) encontraram 7,6 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em solos calcareados (0-50 cm de profundidade) cultivados com caupi e milho. Em pastagens, valores inferiores são encontrados, podendo alcançar no limite inferior valores de cerca de 0,15 kmol H<sup>+</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Ridley et al., 1990c; Loss et al., 1993b).

O ciclo do C contribuiu para a acidificação do solo principalmente devido à remoção de produtos vegetais alcalinos do campo, através da colheita de grãos de milho, a qual foi maior em solos sob sistemas de cultura que englobam leguminosas e nos que receberam fertilização nitrogenada mineral. A colheita de grãos em solos fertilizados com N durante 19 anos promoveu uma acidificação que requereria cerca de 1,5 Mg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> a mais para ser neutralizada do que solos que não receberam N mineral (Tabela 6.3).

As alterações no estoque de MO (AOac) promoveram efeitos distintos na acidificação do solo. Segundo os resultados do modelo, ocorreu alcalinização em solos onde os estoques decresceram (valores negativos na Tabela 6.3), principalmente no sistema P/M, enquanto a acidificação ocorreu em solos onde os estoques aumentaram. Portanto, as variações de estoques de MO nos solos promoveram acidificação variando entre -0,25 a 0,91

equivalente  $\text{CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$ . Com exceção do sistema L+M, porém, a contribuição relativa do  $\text{AO}_{\text{ac}}$  na acidificação total do solo foi pequena, representando, em média, apenas 7,5% do total. É importante lembrar que o efeito da alteração dos estoques de MO do solo na acidificação foi estimado por extrapolação utilizando a equação sugerida por Helyar & Porter (1989), a qual não foi calibrada para as características de MO do presente estudo e, portanto, os resultados devem ser interpretados com cautela. Contudo, pode-se ter uma idéia da tendência dos valores na acidificação do solo.

O efeito do ciclo do C ( $\text{AO}_{\text{ex}} + \text{AO}_{\text{ac}}$ ) na acidificação foi nulo no solo sob pangola, devido à baixa exportação de AO por remoção de material alcalino, já que o milho foi cultivado neste sistema apenas 4 vezes ao longo dos 19 anos do experimento, enquanto nos outros sistemas de cultura o milho foi cultivado em todos os anos. Os maiores valores de acidificação devido ao ciclo do C foram encontrados nos sistemas L+M com e sem adubação nitrogenada mineral, o que é explicado pela elevada produtividade de grãos de milho em adição ao elevado acúmulo de MO no solo. O fato do sistema L+M ter apresentado a maior contribuição relativa do ciclo do C na acidificação líquida (0 N = 66,5% e 180 N = 90,2%) e menor contribuição relativa do ciclo do N (0 N = 26,1% e 180 N = 2,5%) entre os sistemas avaliados está em acordo com a maior separação espacial de ácidos e álcalis no perfil do solo deste tratamento, como discutido previamente.

A acidificação devida ao ciclo do N (considerada aqui como sendo basicamente por lixiviação de nitrato), que foi obtida por diferença entre a acidificação total e a soma dos demais fatores causadores de acidificação do solo, variou entre 0,06  $\text{Mg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$  em solo sob L+M 180 N a 1,40  $\text{Mg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$  em solo sob A+V/M 180 N. A acidificação devida ao ciclo do C é relacionada àquela devida ao ciclo do N. A hipótese de que a presença de espécies leguminosas nos sistemas de cultura e a fertilização de N mineral aumentariam a acidificação do solo por causa da maior disponibilidade de N e conseqüente maior perda de N por lixiviação foi contestada pelos resultados do presente estudo. A presença de espécies leguminosas e fertilização nitrogenada mineral realmente aumentaram a acidificação do solo, mas isto aconteceu devido, principalmente, ao aumento da participação do ciclo do C na

acidificação, em consequência do aumento de produtividade de milho promovido por estes tratamentos.

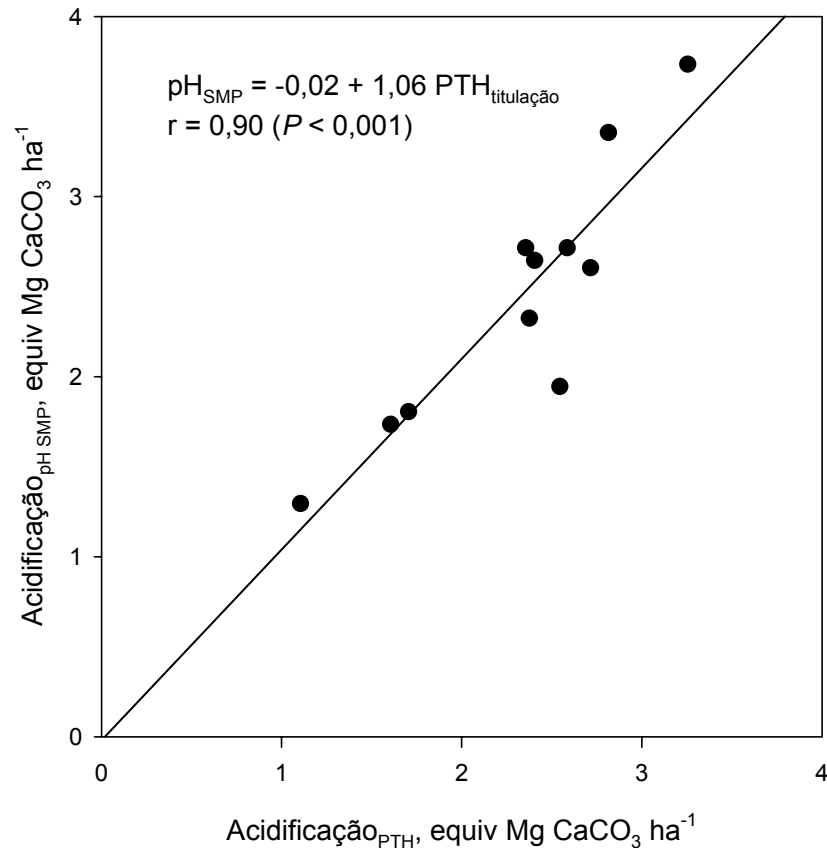
Observando o efeito dos sistemas de cultura na ausência da adubação nitrogenada mineral, a inclusão de vica no sistema A/M aumentou a acidificação relativa causada pelo ciclo do C de 24,9% para 36,9%, alcançando 49,5% quando, além da vica, o caupi também estava presente (A+V/M+C). Análise similar pode ser feita para a fertilização nitrogenada, na qual, dentro de cada sistema de cultura, a aplicação de N mineral diminuiu a contribuição relativa do ciclo do N na acidificação do solo em comparação ao correspondente solo sem a aplicação de N. Evidentemente, isto não significa que a quantidade de N perdida por lixiviação de nitrato foi menor em sistemas com leguminosas e fertilização com N mineral do que nos demais, mas sim que a proporção da acidificação devido ao ciclo do C foi aumentada pelas maiores quantidades de N no sistema solo-planta.

A veracidade dos resultados e da discussão é dependente do nível de veracidade das pressuposições adotadas e da estimativa do PTH utilizada. Como a acidificação devida à lixiviação de nitrato no ciclo do N é obtida por diferença, esta aproximação acarreta que toda a acidificação que não for contabilizada em outros processos é devida à lixiviação de nitrato. Portanto, uma possível sub e superestimação destes processos, bem como no PTH, implicará em concomitante erro na estimativa da acidificação causada por lixiviação de nitrato. Como apontado por Porter et al. (1995) e Verburg et al. (2003), incertezas no poder de tamponamento de pH pode ser uma fonte importante de erro no modelo de Helyar & Porter (1989) para estimativa de acidificação do solo.

A fim de avaliar quão fidedigna é a estimativa do PTH obtido pelas curvas de titulação de pH e a distribuição da acidificação nos fatores causadores, os valores de acidificação líquida (convertidos a equivalente Mg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>) ocorrida na camada de solo de 0-30 cm de profundidade foram comparados com a necessidade de calcário indicada pela análise de pH-SMP (CQFS RS/SC, 2004). O índice SMP é um parâmetro confiável para estimar a quantidade de calcário necessária para elevar o pH de um solo a um determinado valor, por basear-se em avaliações de incubação do solo com CaCO<sub>3</sub> e ter sido utilizado amplamente não somente no Sul mas também

em todo o Brasil, com vários estudos de calibração (Shoemaker et al., 1961; Kaminski, 1974; Escostegui & Bissani, 1999; Wiethölter, 2002a; Wiethölter, 2002b).

Para esta comparação, a necessidade de calcário foi interpolada da tabela de recomendação para obter pH 5,8 na camada de 0-17,5 cm de profundidade do solo (Figura 6.5). A camada mais profunda, de 17,5 a 30 cm de profundidade, não foi considerada para a necessidade de calcário pelo pH-SMP porque o pH do solo nesta camada em 1983 era 5,2 e não 5,8 como nas camadas mais superficiais, e não há dados disponíveis para necessidade de calcário para aumentar o pH do solo a valores menores do que 5,5 baseados no pH-SMP. Embora considerando diferentes camadas de solo, encontrou-se estreita relação entre as duas variáveis ( $r=0,90$  e  $P<0,001$ ) e magnitudes similares, indicadas pelo coeficiente linear próximo de 1 (1,06). Entretanto, se a camada mais profunda fosse considerada na necessidade de calagem pelo pH-SMP, esta seria mais elevada que a quantidade indicada pela acidificação usando curvas de titulação de pH, sugerindo que o método das curvas de titulação subestimou a capacidade de tamponamento de pH do solo e que a acidificação total do solo deveria ser levemente maior do que os resultados encontrados. No caso da acidificação total ser realmente maior, isto implicaria num aumento da contribuição relativa do ciclo do N para a mesma, concomitante com uma diminuição na participação do ciclo do C.



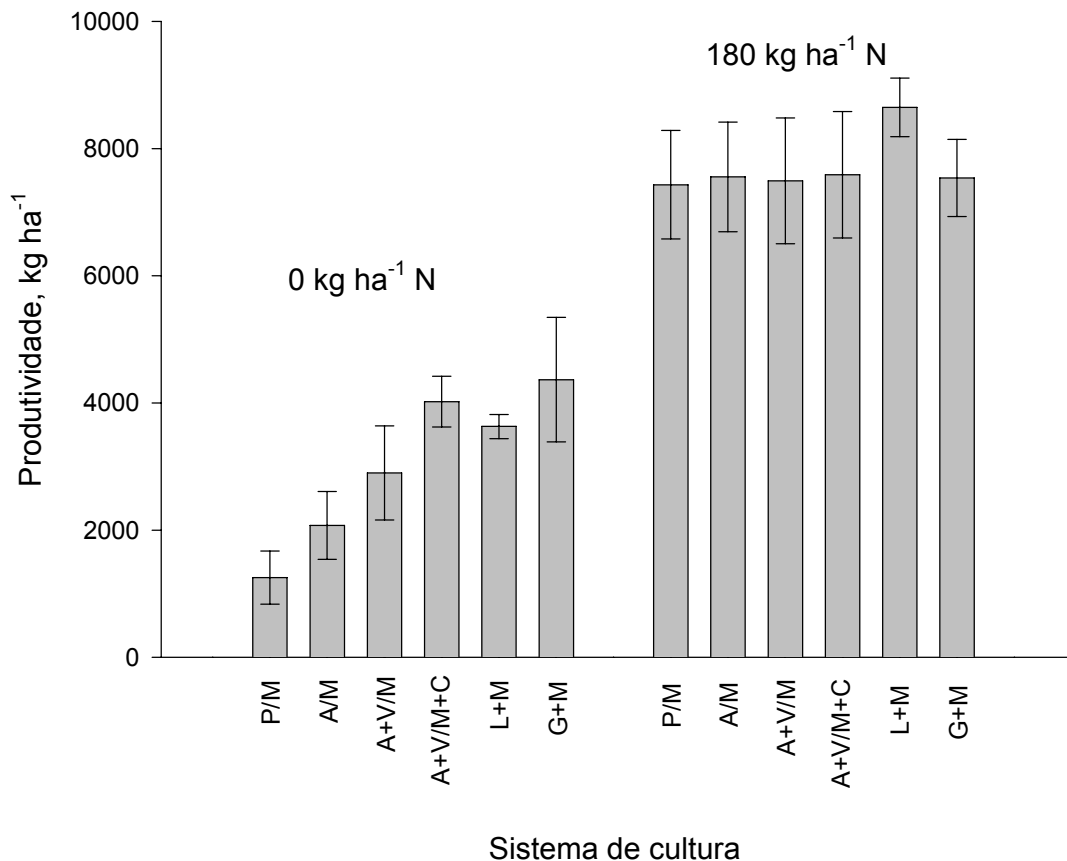
**FIGURA 6.5** Relação entre a acidificação total estimada pelo PTH a partir das curvas de titulação (0-30 cm de profundidade) e pelo pH SMP (0-17,5 cm de profundidade), em equivalente CaCO<sub>3</sub> (Mg ha<sup>-1</sup>), em um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada há 19 anos.

Como algumas camadas de solo atingiram valores de pH relativamente baixos, é provável que o intemperismo de minerais aluminossilicatos estejam tamponando um maior decréscimo do pH, como previamente citado, e isto deveria ser considerado em avaliações de acidificação líquida ocorrida no solo. De acordo com Lesturgez et al. (2006), o método da determinação da taxa líquida de adição de acidez estimada a partir do PTH e da mudança de pH não é apropriado para solos com pH-CaCl<sub>2</sub> < 4,0 (equivalente a cerca de pH-H<sub>2</sub>O = 4,5). Avaliando o grau de desordem e de cristalinidade da caulinita, o principal mineral da fração argila do solo do estudo, os autores sugeriram que a dissolução da caulinita foi responsável pelo tamponamento do pH-CaCl<sub>2</sub> do solo, e que o pH-CaCl<sub>2</sub> = 4,0 é um limite crítico no solo onde abaixo do qual o tamponamento pela dissolução de minerais

secundários passa a ser mais efetivo. Similarmente, a caulinita é o principal mineral presente na fração argila do solo do presente estudo ( $720 \text{ g kg}^{-1}$  argila). Na Figura 6.2A, os decréscimos nos valores de pH do solo nos sistemas de cultura apontaram tendência de estabilização (“steady state”) com o tempo, o que pode ser consequência do mecanismo de dissolução de argilominerais. Se tal dissolução foi realmente efetiva, a acidificação líquida foi subestimada, bem como a acidificação causada pela lixiviação de nitrato.

Dois outros mecanismos que podem tamponar o pH do solo em valores ácidos, dificultando um decréscimo de pH para valores ainda mais baixos, são a restrição na produtividade das plantas e nas taxas de nitrificação. Entretanto, a nitrificação não tem sido restringida no solo do experimento, indicada pela ausência de acúmulo de amônio no solo (dados não demonstrados) e a produtividade de milho parece não estar sendo significativamente afetada pelas diferenças de pH do solo e Al trocável (Figura 6.6).

Na ausência de adubação nitrogenada mineral, os sistemas de cultura que envolvem espécies leguminosas tiveram maiores produtividades de grãos, destacando a importância da inclusão destas espécies em sistemas de rotação de culturas com o milho, a fim de diminuir a quantidade de N mineral requerida na adubação e os custos de produção. A produtividade do milho no sistema P/M chegou a aumentar cerca de quatro vezes quando leguminosas foram incluídas do sistema de rotação. Entretanto, o cultivo de leguminosas não foi suficiente para fornecer todo o N necessário para o milho atingir a produtividade obtida pela cultura quando o N mineral foi fornecido. A aplicação de N mineral deve ser realizada no milho em todos os sistemas de cultura avaliados, sendo que nos sistemas que envolvem cultivo de leguminosas, a adubação nitrogenada mineral deve ser uma prática de complementação ao N fixado biologicamente.



**FIGURA 6.6** Produtividade de grãos de milho no ano agrícola de 2002/2003 em sistemas de culturas há 19 anos em plantio direto, sem e com adubação nitrogenada mineral. P=pousio, M=milho, A=aveia preta, V=vica, C=caupi e G=guandu. Barras verticais indicam o erro padrão da produtividade de grãos nos sistemas de cultura (n=3).

Apesar das diferenças nas características relacionadas à acidez (Figura 6.1), o milho apresentou produtividade de grãos semelhante quando foi fertilizado com N mineral. É importante ressaltar que embora a maioria dos sistemas de cultura apresentaram  $\text{pH} < 5,0$  e elevado Al trocável, a produtividade de grãos atingiu patamares razoáveis, produzindo cerca de  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  quando fornecido N mineral. As prováveis explicações para isto são a complexação do Al por ligantes orgânicos, os elevados níveis de fertilidade (principalmente o P) e a utilização de irrigação no experimento.

A adoção do plantio direto por longo período, por ter favorecido acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes na camada superficial do solo devido ao baixo revolvimento preconizado neste sistema, pode ter promovido a atenuação da fitotoxidez de Al devido a sua complexação por ligantes



orgânicos (Tan & Binger, 1986; Gerke, 1994; Vance et al., 1995; Salet et al., 1999; Haynes & Mokolobate, 2001) e à diminuição da atividade das formas tóxicas de Al pela maior concentração iônica na solução do solo desta camada superficial (Salet, 1998; Giongo, 2002). Em adição, sabe-se que elevados teores de P no solo podem amenizar a fitotoxicidade de Al nas plantas, havendo uma relação de substituição calcário-fósforo (Vidor & Freire, 1972; Pöttker & Ben, 1998; Anghinoni & Salet, 2000; Ernani et al., 2000) e, por isso, a aplicação de calcário pode ser inclusive protelada em casos onde os níveis de P disponível do solo forem elevados (CQFS RS/SC, 2004). No tratamento A+V/M com  $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N do presente estudo, por exemplo, encontrou-se valores (média ponderada 0-17,5 cm de profundidade) de pH de 4,3 e saturação por Al na CTC efetiva de 43%, e mesmo assim apresentou produtividade de milho de  $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Ao observar o teor de P-Mehlich, a média ponderada na camada 0-17,5 foi de  $60 \text{ mg dm}^{-3}$ , sendo que para tal solo (São Jerônimo, classe textural 3) considera-se um teor alto de P quando estiver acima de  $23 \text{ mg dm}^{-3}$ . Além disto, a utilização de irrigação facilita que a planta consiga obter um adequado suprimento de água, mesmo que o sistema radicular não tenha se desenvolvido normalmente e mesmo sem o seu aprofundamento no solo, o que pode ter permitido a obtenção de produtividades elevadas. Novos trabalhos devem ser realizados a fim de que se busquem explicações mais consistentes a respeito.

## 6.4 Conclusões

O pH do solo, o Al trocável, a saturação por bases e a saturação por Al diferiram significativamente entre os sistemas de cultura e fertilização com N mineral. A acidificação líquida foi mais intensa em solos sob sistemas de cultura que envolvem cultivo de espécies leguminosas e que recebem adubação nitrogenada mineral.

A presença de leguminosas e de fertilização com N mineral aumentaram a acidificação do solo atribuída ao ciclo do C devido ao incremento na remoção de material vegetal alcalino pela colheita de grãos de milho.

A capacidade de tamponamento de pH do solo apresentou relação direta e significativa com o estoque de C orgânico do solo. O método utilizado para a estimativa da capacidade tampão do solo, porém, resultou em valores de necessidade de calagem menores do que os valores indicados pelo pH-SMP calibrado para solos do Sul do Brasil.

Os sistemas de cultura que incluem uso de espécies leguminosas apresentaram produtividades de grãos de milho mais elevadas que os demais sistemas, apesar das condições mais ácidas do solo do que nos sistemas de cultura constituídos essencialmente por gramíneas, e apontaram um potencial de redução do uso de fertilizante nitrogenado mineral.

Quando aplicado N mineral, obteve-se elevada produtividade de milho em solo há 19 anos em plantio direto e sem reaplicação de calcário, apresentando baixos valores de pH e alta saturação por Al e, apesar de diferenças nas condições de acidez, não houveram diferenças na produtividade de grãos de milho. Os efeitos da acidez e da toxidez de Al podem ter sido atenuados pela formação de complexos Al-ligantes orgânicos, pelo uso de irrigação e pelos elevados teores de nutrientes da camada superficial do solo, especialmente de fósforo.

## 7. PERSPECTIVAS FUTURAS DE PESQUISA

No sentido de avançar no entendimento das interações que ocorrem no sistema solo-planta e na dinâmica das frações orgânicas no solo, visando aprofundar os estudos realizados no presente trabalho, sugere-se os seguintes estudos:

- Avaliação de lixiviação de frações lábeis de C orgânico no perfil do solo;
- Quantificação das adições de massa seca por lablab, caupi e guandu utilizando algum procedimento que considere a quantidade de fitomassa dos tecidos que senesceram com o tempo;
- Avaliação de produtividade de milho no experimento na ausência de suplementação de água pela irrigação;
- Estudo de cristalinidade da caulinita do solo do experimento sob diferentes valores de pH, bem como análises de lixiviação de nitrato, a fim de refinar a quantificação dos fatores causadores de acidificação do solo;
- Avaliação do papel de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (advindos de exsudação radicular e da lise de células das plantas de cobertura após serem manejadas) na complexação do Al e na especiação química da solução do solo.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. **Soil acidity and liming**. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1984. (Agronomy Series, 12)

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, n.2, p.161-168, 1995.

AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, R. S. D. (eds.) **Atualização em recomendação de adubação e calagem – ênfase em plantio direto**. Santa Maria: Palotti, 1997. No.3. p.76-111

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.601-612, 2003.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F. et al. Potencial de plantas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo em sistema de plantio direto e contribuir para a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, 189-197, 2001.

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

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: KAMINSKI, J. (ed.) **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p.41-59. (Boletim Técnico, 44)

BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. The role of the mineral matrix in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.31, 697-710, 2000.

BALESDENT, J.; MARIOTI, A.; GUILLET, B. Natural  $^{13}\text{C}$  abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.19, 25-30, 1990.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.28, 1261-1263, 1996.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Maize root-derived soil organic carbon estimated by natural  $^{13}\text{C}$  abundance. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.24, n.2, p.97-101, 1992.

BARAK, P.; JOBE, B. O.; KRUEGER, A. R. et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.197, n.1, p.61-69, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de  $\text{CO}_2$ . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, 599-607, 2000a.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, n.1-2, p.101-109, 2000c.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. 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.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. 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, n.1-2, p.81-92, 2002a.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.238, n.1, p.133-140, 2002b.

BAYER, C. Aumento do estoque de matéria orgânica de um Cambissolo Húmico catarinense sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.2, 88-96, 2003.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. et al. Carbon storage in labile fractions of soil organic matter in a tropical no-tillage Oxisol. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, p.677-683, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E. et al. Tillage effects on particulate and mineral-associated organic matter in two tropical Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.37, n.3-4, p.389-401, 2006a.

BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.91, n.1-2, p.217-226, 2006b.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. et al. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v.133, n.3-4, p.258-268, 2006c.

BAYER, C. **Dinâmica e qualidade da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R. **Agroclima da Estação Experimental Agronômica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990. 96 p.

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

BLAIR, N.; CROCKER, G. J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.38, n.1, p.71-84, 2000.

BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J. Role of carbon, nitrogen, and sulphur cycles in soil acidification. In: RENGEL, Z. (ed.) **Handbook of Soil Acidity**. New York: Marcel Dekker, 2003. p.29-56

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GIROUX, M. et al. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v.215, n.1, p.85-91, 1999.

BOUMAN, O. T.; CURTIN, D.; CAMPBELL, C. A. et al. Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, n.5, p.1488-1494, 1995.

BRAGAGNOLO, N. **Efeito da cobertura do solo por resíduos de culturas sobre a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento do milho**. 1986. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1986.

BURLE, M. L. **Efeito de sistemas de cultura em características químicas do solo**. 1995. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

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

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, 777-783, 1992.

CARAVACA, F.; ALGUACIL, M. M.; TORRES, P. et al. Plant type mediates rhizospheric microbial activities and soil aggregation in a semiarid Mediterranean salt marsh. **Geoderma**, Amsterdam, v.124, n.3-4, p.375-382, 2005.

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

CERRI, C. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana-de-açúcar**. 1986. 197 f. Tese (Livre docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v.20, 1-90, 1992.

CHRISTENSEN, B. T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (eds.) **Advances in Soil Science - Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p.97-165

CONCEIÇÃO, P. C. **Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de manejo**. 2003. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de

Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. 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, v.29, n.5, 777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C. **Proteção física da matéria orgânica do solo em solos do Sul do Brasil**. 2006. 145 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

CONYERS, M. K.; HEENAN, D. P.; POILE, G. J. et al. Influence of dryland agricultural management practices on the acidification of a soil profile. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.37, n.2-3, p.127-141, 1996.

COVENTRY, D. R.; SLATTERY, W. J. Acidification of soil associated with lupins grown in a crop-rotation in North-Eastern Victoria. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v.42, n.3, p.391-397, 1991.

COVENTRY, D. R. Acidification problems of duplex soils used for crop pasture rotations. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v.32, n.7, p.901-914, 1992.

CQFS RS/SC, Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, RS, 2004. 400 p.

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

DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p.247-271. (SSSA Special Publication, 249)

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H. et al. Organic N forms of a subtropical Acrisol under no-till cropping systems as assessed by acid hydrolysis and solid-state NMR spectroscopy. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v.42, n.2, p.153-158, 2005a.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H. et al. Composition of organic matter in a subtropical Acrisol as influenced by land use, cropping and N fertilization, assessed by CPMAS C-13 NMR spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.56, n.6, p.705-715, 2005b.



DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; GONZALEZ-VILA, F. J. et al. No-till cropping systems and N fertilisation influences on organic matter composition of physical fractions of a subtropical Acrisol as assessed by analytical pyrolysis (Py-GC/MS). **Geoderma**, Amsterdam, v.135, 260-268, 2006.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H. et al. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.81, n.1, p.87-95, 2005a.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.268, n.1, p.319-328, 2005b.

DOLLING, P. J. Effect of lupins and location on soil acidification rates. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, Victoria, v.35, 753-763, 1995.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA-ASA, 1994. p.3-21. (Publication, 35)

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; CAMPOS, M. L. et al. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento do milho. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, Viçosa, v.24, 537-544, 2000.

ESCOSTEGUI, P. A.; BISSANI, C. A. Estimativa de H + Al pelo pH SMP em solos do Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, 175-179, 1999.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO PLANTIO DIRETO NA PALHA – FEBRAPDP. 2006. **Evolução da área de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br>. Acesso em: 20/12/2006.

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

FENTON, G.; HELYAR, K. The role of the nitrogen and carbon cycle in soil acidification. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 98, p.1-12. 2002. (Encarte Técnico Potafos)

FERNANDES, S. B. V. **Disponibilidade e eficiência de uso do nitrogênio pelo milho em sistemas de cultura**. 1998. 137 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; SANTOS, H. P. et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.64, 221-230, 2002.

GERKE, J. Aluminum complexation by humic substances and Aluminum species in the soil solution. **Geoderma**, Amsterdam, v.63, n.2, p.165-175, 1994.

GIONGO, V. **Características químicas da solução de solo no sistema plantio direto e relação entre alumínio e silício em genótipos de milho**. 2002. 98 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O. et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.32, 285-309, 1994.

GOLCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; CLARKE, P. et al. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by C-13 NMR spectroscopy .2. Density fractions. **Geoderma**, Amsterdam, v.76, n.3-4, p.175-192, 1997.

GREGORICH, E. G.; ELLERT, B. H.; MONREAL, C. M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural  $^{13}\text{C}$  abundance. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, 161-167, 1995.

GREGORICH, E. G.; JANZEN, H. H. Storage and soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (eds.) **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1996. p.97-165

HAYNES, R. J. Soil acidification induced by leguminous crops. **Grass Forage Science**, Oxford, v.38, 1-11, 1983.

HAYNES, R. J.; BEARE, M. H. Aggregation and organic matter storage in mesothermal humid soils. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (eds.) **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.214-262

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the

phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.59, 47-63, 2001.

HELYAR, K. The management of soil acidity over the short and long term. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais ...** Ribeirão Preto, 2003.

HELYAR, K. R. Nitrogen cycling and soil acidification. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, Collingwood, v.42, n.4, p.217-221, 1976.

HELYAR, K. R.; PORTER, W. M. Soil acidification, its measurement and the processes involved. In: ROBSON, A. D. (ed.) **Soil acidity and plant growth**. Sydney: Academic Press, 1989. p.61-101.

JANTALIA, C. P.; RESCK, D. V. S.; ALVES, B. J. R. et al. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. **Soil and Tillage Research** (In Press). Corrected Proof. doi: [10.1016/j.still.2006.11.005](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.005)

KAMINSKI, J. **Fatores de acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul**. 1974. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1974.

LAL, R.; KIMBLE, J.; STEWART, B. A. World soils as a source or sink for radioactively-active gases. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E. E. A. (eds.) **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press,. 1995. p.41-59.

LAL, R.; FOLLETT, R. F.; KIMBLE, J. et al. Managing US cropland to sequester carbon in soil. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.54, n.1, p.374-381, 1999.

LAL, R. The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. In: **Advances in Agronomy**, San Diego, v.76, p.1-30, 2002.

LAL, R. Carbon emission from farm operations. **Environment International**, Amsterdam, v.30, 981-990, 2004a.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, 1-22, 2004b.

LARSON, W. E.; CLAPP, C. E.; PIERRE, W. H. et al. Effects of increasing amount of organic residues on continuous corn: II. Organic carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, 204-208, 1972.

LEFROY, R. D. B.; BLAIR, G. J.; STRONG, W. M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.155/156, 399-402, 1993.

LESTURGEZ, G.; POSS, R.; NOBLE, A. et al. Soil acidification without pH drop under intensive cropping systems in Northeast Thailand. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.114, n.2-4, p.239-248, 2006.

LOGINOW, W.; WISNIEWSKI, W.; GONET, S. et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. **Polish Journal of Soil Science**, Lublin, v.20, 47-52, 1987.

LOSS, S. P.; RITCHIE, G. S. P.; ROBSON, A. D. Effect of lupins and pasture on soil acidification and fertility in Western-Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v.33, n.4, p.457-464, 1993a.

LOSS, S. P.; ROBSON, A. D.; RITCHIE, G. S. P.  $\text{H}^+/\text{OH}^-$  Excretion and nutrient-uptake in upper and lower parts of lupin (*Lupinus angustifolius* L.) root systems. **Annals of Botany**, Oxford, v.72, n.4, p.315-320, 1993b.

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

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. et al. Carbon and nitrogen addition related to stocks of these elements in soil and corn yield under management systems. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.175-187, 2004.

MEDEIROS, J. C. **Sistemas de culturas adaptados a produtividade, recuperação e conservação do solo**. 1985. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1985.

MÉNDEZ, M. A. **Estabilidade de agregados do solo afetados por sistemas de manejo**. 1996. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1996.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N. et al. (eds.) **Tópicos em Ciência do Solo**, n.3, Viçosa, 2003, p.209-248

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

PAVINATO, A. **Teores de carbono e nitrogênio do solo e produtividade de milho afetados por sistemas de culturas.** 1993. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

PILLON, C. N. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de culturas em plantio direto.** 2000. 232 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PORTER, W. M.; MCLAY, C. D. A.; DOLLING, P. J. Rates and sources of acidification in agricultural systems of southern Australia. In: DATE, R. A. et al. (eds.) **Plant-soil interactions at low pH: principles and management.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1995. p.75-83

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do Rio Grande do Sul. In: NUERNBERG, N. J. (ed.) **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto.** Lages: SBCS-Núcleo Regional Sul, 1998. p.77-92

RIDLEY, A. M.; HELYAR, K. R.; SLATTERY, W. J. Soil acidification under subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) pastures in North-Eastern Victoria. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v.30, n.2, p.195-201, 1990a.

RIDLEY, A. M.; SLATTERY, W. J.; HELYAR, K. R. et al. The importance of the Carbon-cycle to acidification of a grazed annual pasture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v.30, n.4, p.529-537, 1990b.

RIDLEY, A. M.; SLATTERY, W. J.; HELYAR, K. R. et al. Acidification under grazed annual and perennial grass based pastures. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v.30, n.4, p.539-544, 1990c.

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

SALET, R. L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio direto.** 1998. 109 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SALET, R. L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A. Atividade do alumínio na solução de solo no sistema plantio direto. **Revista Cientista**, Cruz Alta, v.1, n.1, p.9-13, 1999.

SANTOS, C. A. A. **Potencial de mineralização e disponibilidade de nitrogênio em solos**. 2001. f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SCHMITZ, J. A. K. **Indicadores biológicos de qualidade do solo**. 2003. 234 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a Tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Science**, Hagerstown, v.162, 795-807, 1997.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Sequential versus parallel density fractionation of silt-sized organomineral complexes of tropical soils using metatungstate. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v.33, 259-262, 2001.

SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society Proceedings**, Madison, v.25, 274-277, 1961.

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

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

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, 1367-1377, 1998.

SIX, J.; GUGGENBERGER, G.; PAUSTIAN, K. et al. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.52, 607-618, 2001.

SLATTERY, W. J.; RIDLEY, A. M.; WINDSOR, S. M. Ash alkalinity of animal and plant-products. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v.31, n.3, p.321-324, 1991.

SMITH, P.; SMITH, J. U.; POWLSON, D. S. et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma**, Amsterdam, v.81, 153-225, 1997.

TAN, K. H.; BINGER, A. Effect of humic-acid on Aluminum toxicity in corn plants. **Soil Science**, Hagerstown, v.141, n.1, p.20-25, 1986.

TANG, C.; SPARLING, G. P.; MCLAY, C. D. A. et al. Effect of short-term legume residue decomposition on soil acidity. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.37, n.3, p.561-573, 1999a.

TANG, C.; UNKOVICH, M. J.; BOWDEN, J. W. Factors affecting soil acidification under legumes. III. Acid production by N-2-fixing legumes as influenced by nitrate supply. **New Phytologist**, Lancaster, v.143, n.3, p.513-521, 1999b.

TANG, C.; YU, Q. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.V215, n.1, p.29-38, 1999.

TANG, C.; RAPHAEL, C.; RENGEL, Z. et al. Understanding subsoil acidification: effect of nitrogen transformation and nitrate leaching. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.38, n.4, p.837-849, 2000.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**, 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, L. A. J. **Fornecimento de nitrogênio ao milho por sistemas de culturas**. 1988. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

TESTA, W. M. **Características químicas de um Podzólico Vermelho-escuro, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas**. 1989. f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

TIROL-PADRE, A.; LADHA, J. K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.3, p.969-978, 2004.

VAN BREEMEN, N.; MULDER, J.; DRISCOLL, C. T. Acidification and alkalinization of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.75, n.3, p.283-308, 1983.

VANCE, G. F.; STEVENSON, F. J.; SIKORA, F. J. Environment chemistry of aluminum-organic complexes. In: SPOSITO, G. (ed.) **The environment chemistry of aluminium**. Boca Raton: Lewis, 1995. p.169-220

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, p.175-180, 1994.

VERBURG, K.; BRASCHKAT, J.; HOCHMAN, Z. et al. Modeling acidification processes in agricultural systems. In: RENGEL, Z. (ed.) **Handbook of soil acidity**. New York: Marcel Dekker, 2003. p.135-188

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIDOR, C.; FREIRE, J. R. J. Relação de substituição entre calcário e fósforo aplicados ao solo na cultura da soja. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.8, 187-193, 1972.

VOLKWEISS, S. J. Química da acidez dos solos. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S. J.; BECKER, F. (eds.). **Anais do II Seminário sobre corretivos da acidez do solo**. Edições UFSM, Santa Maria. 1989. p.7-38

WEIL, R. W.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A. et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.18, n.1, 3-17, 2003.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, 1930-1946, 2002.

WESTERHOF, R.; VILELA, L.; AYARZA, M. et al. Land use effects on labile N extracted with permanganate and the nitrogen management index in the Cerrado region of Brazil. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v.27, 353-357, 1998.

WIETHÖLTER, S. Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2002a, Porto Alegre. **Resumos ...** Porto Alegre, 2002a. 1CD ROM.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 2002b, Guarapuava. **Resumos ...** Guarapuava, 2002b. p.14-53.

ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C. et al. Carbono orgânico e nitrogênio total em Argissolo vermelho sob plantio direto afetado por sistemas de cultura e adubação nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Resumos ...** Ribeirão Preto, 2003.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIEKOW, J. et al. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam (In press). Corrected Proof. doi:10.1016/j.still.2006.10.003.



## **9. APÉNDICES**

APÊNDICE 1. Teores de carbono orgânico total (g kg<sup>-1</sup>) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	16,35	13,16	17,41	15,64	16,30	17,68	17,32	17,10
	2,5-5,0	11,46	11,76	11,87	11,70	12,71	13,38	11,81	12,63
	5,0-7,5	10,66	9,30	9,84	9,93	10,91	10,45	10,17	10,51
	7,5-12,5	8,95	8,76	8,63	8,78	10,90	10,36	9,22	10,16
	12,5-17,5	9,32	9,93	8,70	9,32	11,41	9,48	9,75	10,21
	17,5-30,0	10,95	10,02	9,96	10,31	11,39	10,39	10,22	10,67
	0-17,5	10,71	10,23	10,54	10,49	12,08	11,60	11,03	11,57
	0-30,0	10,81	10,14	10,30	10,42	11,79	11,10	10,70	11,19
A/M	0-2,5	15,70	18,25	15,62	16,52	16,89	18,19	16,86	17,31
	2,5-5,0	13,30	12,88	12,86	13,01	14,39	15,73	13,06	14,39
	5,0-7,5	11,54	10,83	10,12	10,83	12,97	15,42	12,23	13,54
	7,5-12,5	9,66	9,97	9,85	9,83	10,23	12,94	10,40	11,19
	12,5-17,5	8,30	8,99	9,77	9,02	10,10	10,51	9,77	10,13
	17,5-30,0	9,48	9,20	10,29	9,66	9,74	9,80	10,20	9,91
	0-17,5	10,92	11,41	11,12	11,15	12,13	13,75	11,78	12,55
	0-30,0	10,32	10,49	10,77	10,53	11,13	12,10	11,12	11,45
L+M	0-2,5	28,02	24,31	27,98	26,77	30,06	29,11	28,28	29,15
	2,5-5,0	21,44	14,17	19,91	18,51	26,13	16,63	18,89	20,55
	5,0-7,5	17,67	11,64	16,93	15,41	19,85	14,89	14,76	16,50
	7,5-12,5	15,05	9,98	12,60	12,54	16,57	11,95	12,62	13,71
	12,5-17,5	12,45	9,95	10,79	11,06	12,17	10,34	10,58	11,03
	17,5-30,0	11,72	10,33	11,18	11,08	10,58	10,48	10,60	10,55
	0-17,5	18,03	12,85	17,08	15,99	19,89	15,03	15,48	16,80
	0-30,0	15,40	11,80	14,62	13,94	16,01	13,13	13,44	14,20
A+V/M	0-2,5	21,47	16,99	15,62	18,03	24,93	19,23	16,93	20,36
	2,5-5,0	16,11	14,05	12,36	14,17	16,92	14,07	12,37	14,45
	5,0-7,5	12,96	12,45	9,92	11,78	14,28	13,36	10,56	12,73
	7,5-12,5	10,83	10,61	9,38	10,27	12,10	11,30	8,76	10,72
	12,5-17,5	9,83	9,25	8,56	9,21	9,22	9,67	9,34	9,41
	17,5-30,0	9,10	9,58	9,91	9,53	9,82	11,25	9,77	10,28
	0-17,5	13,12	11,89	10,54	11,85	14,11	12,66	10,87	12,54
	0-30,0	11,45	10,93	10,28	10,88	12,32	12,07	10,41	11,60
A+V/M+C	0-2,5	20,57	20,55	21,95	21,02	-	-	-	-
	2,5-5,0	15,16	14,26	17,32	15,58	-	-	-	-
	5,0-7,5	13,77	11,97	14,45	13,40	-	-	-	-
	7,5-12,5	11,01	9,80	11,52	10,78	-	-	-	-
	12,5-17,5	9,90	8,97	10,77	9,88	-	-	-	-
	17,5-30,0	10,35	9,74	10,87	10,32	-	-	-	-
	0-17,5	13,05	12,05	14,04	13,04	-	-	-	-
	0-30,0	11,92	11,09	12,72	11,91	-	-	-	-
G+M	0-2,5	23,82	21,41	28,00	24,41	-	-	-	-
	2,5-5,0	18,23	16,39	15,71	16,78	-	-	-	-
	5,0-7,5	13,45	13,80	15,19	14,15	-	-	-	-
	7,5-12,5	11,07	11,83	12,63	11,84	-	-	-	-
	12,5-17,5	9,37	11,21	9,53	10,04	-	-	-	-
	17,5-30,0	10,51	9,80	10,07	10,13	-	-	-	-
	0-17,5	13,77	13,95	14,75	14,16	-	-	-	-
	0-30,0	12,41	12,22	12,80	12,48	-	-	-	-
Pan	0-2,5	19,40	20,15	17,80	19,12	-	-	-	-
	2,5-5,0	14,75	14,36	12,57	13,89	-	-	-	-
	5,0-7,5	12,51	13,01	11,63	12,38	-	-	-	-
	7,5-12,5	10,26	10,42	10,07	10,25	-	-	-	-
	12,5-17,5	9,59	10,31	6,93	8,94	-	-	-	-
	17,5-30,0	10,06	10,71	9,90	10,22	-	-	-	-
	0-17,5	12,34	12,71	10,86	11,97	-	-	-	-
	0-30,0	11,39	11,88	10,46	11,24	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vicia; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 2. Estoques de carbono orgânico (calculado pelo método de massa equivalente\*, Mg ha<sup>-1</sup>) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	6,29	5,07	6,70	6,02	6,28	6,81	6,67	6,58
	2,5-5,0	4,47	4,59	4,63	4,56	4,96	5,22	4,61	4,93
	5,0-7,5	4,16	3,63	3,84	3,87	4,25	4,08	3,97	4,10
	7,5-12,5	7,25	7,10	6,99	7,11	8,83	8,39	7,47	8,23
	12,5-17,5	7,55	8,04	7,05	7,55	9,24	7,68	7,90	8,27
	17,5-30,0	22,17	20,29	20,17	20,88	23,06	21,04	20,70	21,60
	0-17,5	29,72	28,42	29,21	29,11	33,56	32,17	30,61	32,11
	0-30,0	51,89	48,71	49,38	49,99	56,62	53,21	51,30	53,71
A/M	0-2,5	6,04	7,03	6,01	6,36	6,50	7,00	6,49	6,67
	2,5-5,0	5,19	5,02	5,02	5,08	5,61	6,13	5,09	5,61
	5,0-7,5	4,50	4,22	3,95	4,22	5,06	6,01	4,77	5,28
	7,5-12,5	7,82	8,08	7,98	7,96	8,29	10,48	8,42	9,06
	12,5-17,5	6,72	7,28	7,91	7,31	8,18	8,51	7,91	8,20
	17,5-30,0	18,84	18,29	20,45	19,19	19,36	19,48	20,27	19,70
	0-17,5	30,28	31,63	30,87	30,93	33,64	38,15	32,69	34,83
	0-30,0	49,12	49,92	51,32	50,12	53,00	57,62	52,96	54,53
L+M	0-2,5	10,86	9,42	10,84	10,37	11,65	11,28	10,96	11,30
	2,5-5,0	8,63	5,70	8,01	7,45	10,52	6,69	7,60	8,27
	5,0-7,5	7,38	4,86	7,07	6,44	8,29	6,22	6,16	6,89
	7,5-12,5	12,49	8,28	10,46	10,41	13,75	9,92	10,47	11,38
	12,5-17,5	10,15	8,11	8,79	9,02	9,92	8,43	8,62	8,99
	17,5-30,0	23,88	21,05	22,78	22,57	21,56	21,35	21,60	21,50
	0-17,5	49,50	36,38	45,18	43,68	54,12	42,54	43,82	46,83
	0-30,0	73,38	57,42	67,96	66,25	75,68	63,89	65,42	68,33
A+V/M	0-2,5	8,27	6,54	6,01	6,94	9,60	7,40	6,52	7,84
	2,5-5,0	6,36	5,55	4,88	5,60	6,68	5,56	4,89	5,71
	5,0-7,5	5,12	4,92	3,92	4,65	5,64	5,28	4,17	5,03
	7,5-12,5	8,99	8,81	7,79	8,53	10,04	9,38	7,27	8,90
	12,5-17,5	8,16	7,68	7,10	7,65	7,65	8,03	7,75	7,81
	17,5-30,0	18,88	19,88	20,56	19,77	20,38	23,34	20,27	21,33
	0-17,5	36,90	33,49	29,70	33,36	39,62	35,64	30,60	35,29
	0-30,0	55,78	53,37	50,27	53,14	59,99	58,99	50,87	56,62
A+V/M+C	0-2,5	7,92	7,91	8,45	8,09	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,99	5,63	6,84	6,15	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,44	4,73	5,71	5,29	-	-	-	-
	7,5-12,5	9,14	8,13	9,56	8,94	-	-	-	-
	12,5-17,5	8,22	7,45	8,94	8,20	-	-	-	-
	17,5-30,0	21,48	20,21	22,56	21,41	-	-	-	-
	0-17,5	36,70	33,85	39,50	36,68	-	-	-	-
	0-30,0	58,18	54,06	62,06	58,10	-	-	-	
G+M	0-2,5	8,58	7,71	10,08	8,79	-	-	-	-
	2,5-5,0	7,52	6,76	6,48	6,92	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,55	5,69	6,27	5,84	-	-	-	-
	7,5-12,5	9,13	9,76	10,42	9,77	-	-	-	-
	12,5-17,5	7,73	9,25	7,86	8,28	-	-	-	-
	17,5-30,0	21,68	20,21	20,77	20,89	-	-	-	-
	0-17,5	38,51	39,17	41,11	39,59	-	-	-	-
	0-30,0	60,18	59,38	61,88	60,48	-	-	-	
Pan	0-2,5	5,53	5,74	5,07	5,45	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,02	4,88	4,27	4,72	-	-	-	-
	5,0-7,5	4,91	5,11	4,56	4,86	-	-	-	-
	7,5-12,5	7,95	8,08	7,80	7,94	-	-	-	-
	12,5-17,5	7,72	8,30	5,58	7,20	-	-	-	-
	17,5-30,0	20,62	21,96	20,30	20,96	-	-	-	-
	0-17,5	31,13	32,11	27,29	30,18	-	-	-	-
	0-30,0	51,75	54,06	47,59	51,13	-	-	-	

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vicia; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola. <sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III. \* A densidade do solo sob A+V/M, que apresentou mesmos valores que do solo sob A+V/M+C, foi utilizada como referência para correção das camadas de solo dos demais sistemas. Os valores de densidade utilizados estão demonstrados na Tabela 4.1 (pág. 25).

APÊNDICE 3. Teores de nitrogênio total (g kg<sup>-1</sup>) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	1,41	1,24	1,41	1,35	1,41	1,59	1,59	1,53
	2,5-5,0	0,88	1,24	1,06	1,06	1,06	1,41	1,24	1,24
	5,0-7,5	1,06	0,88	1,06	1,00	1,06	0,88	0,71	0,88
	7,5-12,5	0,88	0,71	0,71	0,77	1,06	0,71	0,88	0,88
	12,5-17,5	0,71	0,71	0,71	0,71	0,88	0,88	0,71	0,82
	17,5-30,0	0,88	0,71	0,53	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
	0-17,5	0,93	0,88	0,91	0,91	1,06	1,01	0,96	1,01
	0-30,0	0,91	0,81	0,75	0,82	0,91	0,88	0,85	0,88
A/M	0-2,5	1,59	1,77	1,59	1,65	1,41	1,77	1,77	1,65
	2,5-5,0	1,24	1,24	0,88	1,12	1,41	1,59	1,33	1,44
	5,0-7,5	0,88	1,06	0,88	0,94	1,24	1,41	0,88	1,18
	7,5-12,5	0,88	0,88	0,71	0,82	0,88	1,06	0,88	0,94
	12,5-17,5	0,71	0,97	0,88	0,85	0,88	0,88	0,88	0,88
	17,5-30,0	0,71	0,71	0,53	0,65	0,88	0,88	0,88	0,88
	0-17,5	0,98	1,11	0,93	1,01	1,09	1,24	1,07	1,13
	0-30,0	0,87	0,94	0,77	0,86	1,00	1,09	0,99	1,03
L+M	0-2,5	2,83	2,47	3,89	3,06	2,65	2,65	2,47	2,59
	2,5-5,0	2,65	1,41	2,30	2,12	2,56	1,94	1,77	2,09
	5,0-7,5	1,94	1,24	1,94	1,71	1,94	1,59	1,59	1,71
	7,5-12,5	1,59	1,24	1,41	1,41	1,41	1,24	1,24	1,30
	12,5-17,5	1,24	0,88	1,06	1,06	1,06	1,06	0,88	1,00
	17,5-30,0	1,06	0,88	0,88	0,94	0,71	0,71	0,88	0,77
	0-17,5	1,87	1,34	1,87	1,69	1,73	1,54	1,44	1,57
	0-30,0	1,53	1,15	1,46	1,38	1,30	1,19	1,21	1,23
A+V/M	0-2,5	1,77	1,77	1,77	1,77	2,65	1,77	1,77	2,06
	2,5-5,0	1,77	1,41	0,88	1,35	1,59	1,59	1,06	1,41
	5,0-7,5	1,24	1,24	0,88	1,12	1,59	1,59	0,71	1,30
	7,5-12,5	0,88	1,06	0,71	0,88	1,24	1,06	0,88	1,06
	12,5-17,5	0,88	0,71	0,71	0,77	1,06	0,88	0,71	0,88
	17,5-30,0	0,71	1,06	0,71	0,82	0,71	0,88	0,71	0,77
	0-17,5	1,19	1,14	0,91	1,08	1,49	1,26	0,96	1,24
	0-30,0	0,99	1,10	0,82	0,97	1,16	1,10	0,85	1,04
A+V/M+C	0-2,5	2,12	2,12	2,12	2,12	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,41	1,41	1,24	1,35	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,41	1,06	1,24	1,24	-	-	-	-
	7,5-12,5	1,06	1,06	1,06	1,06	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,06	0,71	0,71	0,82	-	-	-	-
	17,5-30,0	0,88	0,71	0,71	0,77	-	-	-	-
	0-17,5	1,31	1,16	1,16	1,21	-	-	-	-
	0-30,0	1,13	0,97	0,97	1,03	-	-	-	-
G+M	0-2,5	2,39	2,12	2,47	2,33	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,59	1,59	1,86	1,68	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,71	1,41	1,59	1,24	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,71	1,06	0,88	0,88	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,71	0,88	0,71	0,77	-	-	-	-
	17,5-30,0	0,71	0,80	0,71	0,74	-	-	-	-
	0-17,5	1,07	1,29	1,30	1,22	-	-	-	-
	0-30,0	0,92	1,08	1,05	1,02	-	-	-	-
Pan	0-2,5	2,03	2,03	1,68	1,91	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,41	1,24	1,06	1,24	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,06	1,24	0,88	1,06	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,88	0,71	0,71	0,77	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,88	0,71	0,71	0,77	-	-	-	-
	17,5-30,0	0,71	0,71	0,71	0,71	-	-	-	-
	0-17,5	1,15	1,05	0,92	1,04	-	-	-	-
	0-30,0	0,96	0,91	0,83	0,90	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 4. Estoques de nitrogênio total (calculado pelo método de massa equivalente\*, Mg ha<sup>-1</sup>) de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	0,54	0,48	0,54	0,52	0,54	0,61	0,61	0,59
	2,5-5,0	0,35	0,49	0,42	0,42	0,42	0,56	0,49	0,49
	5,0-7,5	0,42	0,35	0,42	0,40	0,42	0,35	0,28	0,35
	7,5-12,5	0,73	0,59	0,59	0,64	0,88	0,59	0,73	0,73
	12,5-17,5	0,59	0,59	0,59	0,59	0,73	0,73	0,59	0,68
	17,5-30,0	1,83	1,47	1,10	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47
	0-17,5	2,63	2,49	2,56	2,56	3,00	2,84	2,70	2,85
	0-30,0	4,47	3,95	3,66	4,03	4,46	4,31	4,17	4,31
A/M	0-2,5	0,61	0,68	0,61	0,64	0,54	0,68	0,68	0,64
	2,5-5,0	0,49	0,49	0,35	0,44	0,56	0,63	0,52	0,57
	5,0-7,5	0,35	0,42	0,35	0,37	0,49	0,56	0,35	0,47
	7,5-12,5	0,73	0,73	0,59	0,68	0,73	0,88	0,73	0,78
	12,5-17,5	0,59	0,81	0,73	0,71	0,73	0,73	0,73	0,73
	17,5-30,0	1,47	1,47	1,10	1,34	1,83	1,83	1,83	1,83
	0-17,5	2,77	3,13	2,63	2,84	3,06	3,48	3,02	3,19
	0-30,0	4,24	4,60	3,73	4,19	4,89	5,31	4,85	5,02
L+M	0-2,5	1,09	0,95	1,50	1,18	1,02	1,02	0,95	1,00
	2,5-5,0	1,05	0,56	0,91	0,84	1,01	0,77	0,70	0,83
	5,0-7,5	0,77	0,49	0,77	0,67	0,77	0,63	0,63	0,67
	7,5-12,5	1,32	1,03	1,17	1,17	1,17	1,03	1,03	1,08
	12,5-17,5	1,03	0,73	0,88	0,88	0,88	0,88	0,73	0,83
	17,5-30,0	2,20	1,83	1,83	1,96	1,47	1,47	1,83	1,59
	0-17,5	5,25	3,76	5,23	4,75	4,85	4,32	4,04	4,41
	0-30,0	7,45	5,59	7,06	6,70	6,32	5,79	5,87	6,00
A+V/M	0-2,5	0,68	0,68	0,68	0,68	1,02	0,68	0,68	0,79
	2,5-5,0	0,70	0,56	0,35	0,54	0,63	0,63	0,42	0,56
	5,0-7,5	0,49	0,49	0,35	0,44	0,63	0,63	0,28	0,51
	7,5-12,5	0,73	0,88	0,59	0,73	1,03	0,88	0,73	0,88
	12,5-17,5	0,73	0,59	0,59	0,64	0,88	0,73	0,59	0,73
	17,5-30,0	1,47	2,20	1,47	1,71	1,47	1,83	1,47	1,59
	0-17,5	3,33	3,19	2,55	3,03	4,18	3,55	2,70	3,48
	0-30,0	4,80	5,39	4,02	4,74	5,65	5,38	4,17	5,07
A+V/M+C	0-2,5	0,82	0,82	0,82	0,82	-	-	-	-
	2,5-5,0	0,56	0,56	0,49	0,54	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,56	0,42	0,49	0,49	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,88	0,88	0,88	0,88	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,88	0,59	0,59	0,68	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,83	1,47	1,47	1,59	-	-	-	-
	0-17,5	3,69	3,26	3,26	3,41	-	-	-	-
	0-30,0	5,53	4,73	4,73	4,99	-	-	-	-
G+M	0-2,5	0,92	0,82	0,95	0,90	-	-	-	-
	2,5-5,0	0,63	0,63	0,73	0,66	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,28	0,56	0,63	0,49	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,59	0,88	0,73	0,73	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,59	0,73	0,59	0,64	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,47	1,65	1,47	1,53	-	-	-	-
	0-17,5	3,00	3,62	3,63	3,42	-	-	-	-
	0-30,0	4,47	5,27	5,10	4,94	-	-	-	-
Pan	0-2,5	0,78	0,78	0,65	0,74	-	-	-	-
	2,5-5,0	0,56	0,49	0,42	0,49	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,42	0,49	0,35	0,42	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,73	0,59	0,59	0,64	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,73	0,59	0,59	0,64	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,47	1,47	1,47	1,47	-	-	-	-
	0-17,5	3,23	2,93	2,59	2,92	-	-	-	-
	0-30,0	4,69	4,40	4,05	4,38	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola. <sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III. \* A densidade do solo sob A+V/M, que apresentou mesmos valores que do solo sob A+V/M+C, foi utilizada como referência para correção das camadas de solo dos demais sistemas. Os valores de densidade utilizados estão demonstrados na Tabela 4.1 (pág. 25).

APÊNDICE 5. Teores de carbono orgânico total e teores de carbono orgânico nas frações lábeis e não lábeis (g C kg<sup>-1</sup> solo) obtidas por fracionamentos físicos granulométrico e densimétrico e por oxidação química com soluções de KMnO<sub>4</sub> 333 mM e 60 mM em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral há 19 anos.

Sistema de cultura	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>	Repetição <sup>2</sup>	C lábil				C não lábil <sup>3</sup>				CO
			Granulométrico	Densimétrico	Oxidação com KMnO <sub>4</sub>		Granulométrico	Densimétrico	Oxidação com KMnO <sub>4</sub>		
					60 mM	333 mM			60 mM	333 mM	
A/M <sup>1</sup>	0	I	1,06	0,50	0,89	3,08	9,64	10,21	9,81	7,62	10,70
		II	1,15	0,43	1,03	4,81	10,07	10,79	10,19	6,41	11,22
		III	0,94	0,50	0,78	3,58	9,77	10,21	9,93	7,13	10,71
		<i>Média</i>	1,05	0,48	0,90	3,82	9,83	10,40	9,98	7,05	10,88
	180	I	1,01	0,66	1,35	3,58	9,81	10,16	9,47	7,24	10,82
		II	1,69	0,50	1,12	3,82	11,66	12,85	12,23	9,53	13,35
III		1,09	0,50	1,16	3,08	9,39	9,98	9,32	7,40	10,48	
	<i>Média</i>	1,26	0,55	1,21	3,49	10,29	11,00	10,34	8,06	11,55	
A+V/M	0	I	1,47	0,80	1,10	3,33	11,91	12,58	12,28	10,06	13,38
		II	1,10	0,70	0,91	3,50	9,96	10,36	10,15	7,56	11,06
		III	0,76	0,69	0,55	3,91	9,89	9,96	10,10	6,74	10,65
		<i>Média</i>	1,11	0,73	0,85	3,58	10,59	10,97	10,84	8,12	11,70
	180	I	2,25	1,00	1,60	4,32	11,74	12,99	12,39	9,67	13,99
		II	2,09	0,74	1,14	4,57	10,12	11,47	11,07	7,64	12,21
III		1,03	0,64	1,10	1,35	9,34	9,73	9,27	9,02	10,37	
	<i>Média</i>	1,79	0,79	1,28	3,41	10,40	11,40	10,91	8,78	12,19	
A+V/M+C	0	I	1,18	0,78	1,28	5,56	11,87	12,27	11,77	7,49	13,05
		II	1,87	0,72	1,41	4,81	10,14	11,29	10,60	7,20	12,01
		III	1,75	0,97	1,30	4,07	11,22	12,00	11,67	8,90	12,97
		<i>Média</i>	1,60	0,82	1,33	4,81	11,07	11,85	11,35	7,86	12,68
G+M	0	I	2,35	1,34	1,44	4,07	12,58	13,59	13,49	10,86	14,93
		II	1,36	0,96	1,21	1,10	12,55	12,95	12,70	12,81	13,91
		III	2,88	2,04	1,46	4,81	12,35	13,19	13,77	10,42	15,23
		<i>Média</i>	2,20	1,45	1,37	3,33	12,49	13,24	13,32	11,36	14,69
Campo nativo	0	I	2,63	1,54	1,35	3,08	12,71	13,80	13,99	12,26	15,34
		II	2,81	1,66	1,41	2,09	12,66	13,81	14,06	13,38	15,47
		<i>Média</i>	2,72	1,60	1,38	2,59	12,68	13,80	14,02	12,81	15,40

<sup>1</sup> M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vicia; C = caupi; e G = guandu.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

<sup>3</sup> Os teores de C não lábeis foram obtidos por diferença entre os teores de CO e os de C lábeis.

APÊNDICE 6. Valores de pH-H<sub>2</sub>O em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	5,18	5,08	5,22	5,16	4,69	4,95	4,88	4,84
	2,5-5,0	4,90	4,78	4,99	4,89	4,42	4,73	4,58	4,58
	5,0-7,5	4,80	4,86	4,98	4,88	4,47	4,74	4,42	4,54
	7,5-12,5	4,77	4,92	4,88	4,86	4,37	4,60	4,19	4,39
	12,5-17,5	4,79	4,75	4,83	4,79	4,42	4,78	4,49	4,56
	17,5-30,0	4,55	4,90	4,82	4,76	4,53	4,60	4,64	4,59
	0-17,5	4,86	4,87	4,94	4,89	4,45	4,74	4,46	4,55
	0-30,0	4,73	4,88	4,89	4,83	4,48	4,65	4,55	4,57
A/M	0-2,5	5,00	5,20	5,11	5,10	4,56	4,52	4,66	4,58
	2,5-5,0	4,85	4,87	4,86	4,86	4,34	4,38	4,36	4,36
	5,0-7,5	4,87	4,82	4,85	4,85	4,37	4,20	4,33	4,30
	7,5-12,5	4,60	4,80	4,70	4,70	4,46	4,20	4,30	4,32
	12,5-17,5	4,72	4,60	4,58	4,63	4,47	4,22	4,54	4,41
	17,5-30,0	4,96	4,91	4,65	4,84	4,52	4,40	4,73	4,55
	0-17,5	4,77	4,81	4,77	4,78	4,45	4,28	4,43	4,39
	0-30,0	4,85	4,85	4,72	4,81	4,48	4,33	4,56	4,45
L+M	0-2,5	5,57	5,37	5,57	5,50	5,29	5,67	5,63	5,53
	2,5-5,0	5,32	5,04	5,10	5,15	4,93	5,09	4,98	5,00
	5,0-7,5	5,04	4,80	4,81	4,88	4,79	4,81	4,60	4,73
	7,5-12,5	4,99	4,61	4,52	4,71	4,55	4,76	4,55	4,62
	12,5-17,5	4,64	4,52	4,43	4,53	4,46	4,69	4,38	4,51
	17,5-30,0	4,48	4,51	4,36	4,45	4,38	5,04	4,44	4,62
	0-17,5	5,03	4,78	4,77	4,86	4,72	4,92	4,72	4,79
	0-30,0	4,80	4,67	4,60	4,69	4,58	4,97	4,61	4,72
A+V/M	0-2,5	4,58	4,64	4,87	4,70	4,52	4,79	4,23	4,51
	2,5-5,0	4,44	4,57	4,66	4,56	4,38	4,52	4,00	4,30
	5,0-7,5	4,59	4,29	4,52	4,47	4,25	4,46	3,95	4,22
	7,5-12,5	4,69	4,29	4,50	4,49	4,26	4,49	4,08	4,28
	12,5-17,5	4,70	4,78	4,56	4,68	4,48	4,36	4,26	4,37
	17,5-30,0	4,73	4,75	4,59	4,69	4,40	4,41	4,21	4,34
	0-17,5	4,63	4,52	4,60	4,58	4,38	4,50	4,12	4,33
	0-30,0	4,67	4,62	4,59	4,63	4,39	4,46	4,16	4,34
A+V/M+C	0-2,5	4,79	4,97	5,16	4,97	-	-	-	-
	2,5-5,0	4,48	4,62	4,61	4,57	-	-	-	-
	5,0-7,5	4,48	4,66	4,58	4,57	-	-	-	-
	7,5-12,5	4,47	4,58	4,66	4,57	-	-	-	-
	12,5-17,5	4,42	4,79	4,68	4,63	-	-	-	-
	17,5-30,0	4,59	4,90	4,78	4,76	-	-	-	-
	0-17,5	4,50	4,71	4,72	4,65	-	-	-	-
	0-30,0	4,54	4,79	4,74	4,69	-	-	-	-
G+M	0-2,5	4,47	4,99	4,69	4,72	-	-	-	-
	2,5-5,0	4,39	4,76	4,48	4,54	-	-	-	-
	5,0-7,5	4,39	4,70	4,56	4,55	-	-	-	-
	7,5-12,5	4,48	4,79	4,46	4,58	-	-	-	-
	12,5-17,5	4,69	4,60	4,52	4,60	-	-	-	-
	17,5-30,0	4,77	4,73	4,52	4,67	-	-	-	-
	0-17,5	4,51	4,75	4,53	4,60	-	-	-	-
	0-30,0	4,62	4,74	4,52	4,63	-	-	-	-
Pan	0-2,5	5,20	5,19	4,97	5,12	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,11	5,07	5,18	5,12	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,14	5,09	5,20	5,14	-	-	-	-
	7,5-12,5	4,99	5,20	5,10	5,10	-	-	-	-
	12,5-17,5	5,38	5,29	4,96	5,21	-	-	-	-
	17,5-30,0	4,99	4,89	4,89	4,92	-	-	-	-
	0-17,5	5,17	5,19	5,07	5,14	-	-	-	-
	0-30,0	5,10	5,07	4,99	5,05	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 7. Valores de pH-SMP em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	6,20	6,15	6,25	6,20	6,03	6,02	6,01	6,02
	2,5-5,0	6,07	6,11	6,21	6,13	5,85	5,92	5,85	5,87
	5,0-7,5	6,04	6,19	6,22	6,15	5,75	5,93	5,87	5,85
	7,5-12,5	6,09	5,93	6,21	6,08	5,76	6,13	5,78	5,89
	12,5-17,5	6,16	6,07	6,26	6,16	5,63	6,16	5,90	5,90
	17,5-30,0	5,71	5,94	6,14	5,93	5,45	6,04	5,94	5,81
	0-17,5	6,12	6,06	6,23	6,14	5,77	6,06	5,87	5,90
	0-30,0	5,95	6,01	6,19	6,05	5,64	6,05	5,90	5,86
A/M	0-2,5	6,28	6,18	6,09	6,18	5,87	5,78	5,86	5,84
	2,5-5,0	6,14	6,11	5,98	6,08	5,84	5,63	5,62	5,70
	5,0-7,5	6,07	6,01	6,02	6,03	5,84	5,63	5,64	5,70
	7,5-12,5	6,22	6,19	6,07	6,16	5,95	5,54	5,48	5,66
	12,5-17,5	6,20	6,09	6,01	6,10	5,99	5,57	5,81	5,79
	17,5-30,0	6,21	6,05	5,87	6,04	5,80	5,69	5,76	5,75
	0-17,5	6,19	6,12	6,04	6,12	5,92	5,61	5,67	5,73
	0-30,0	6,20	6,09	5,97	6,09	5,87	5,64	5,71	5,74
L+M	0-2,5	6,32	6,34	6,52	6,39	6,09	6,47	6,24	6,27
	2,5-5,0	6,17	6,24	6,16	6,19	5,98	6,03	5,88	5,96
	5,0-7,5	6,12	6,10	6,00	6,07	5,82	5,84	5,74	5,80
	7,5-12,5	6,08	6,10	5,85	6,01	5,72	5,91	5,73	5,79
	12,5-17,5	6,00	6,05	5,80	5,95	5,65	5,99	5,69	5,78
	17,5-30,0	5,74	5,75	5,44	5,64	5,63	5,86	5,61	5,70
	0-17,5	6,11	6,14	6,00	6,08	5,80	6,02	5,81	5,88
	0-30,0	5,96	5,98	5,77	5,90	5,73	5,95	5,73	5,80
A+V/M	0-2,5	5,86	5,92	6,00	5,93	5,64	5,94	5,51	5,70
	2,5-5,0	5,81	5,77	5,85	5,81	5,72	5,93	5,53	5,73
	5,0-7,5	5,98	5,69	5,84	5,84	5,49	5,83	5,36	5,56
	7,5-12,5	6,11	5,75	5,85	5,90	5,45	5,94	5,28	5,56
	12,5-17,5	6,17	5,71	5,82	5,90	5,79	5,91	5,48	5,73
	17,5-30,0	6,06	5,91	5,68	5,88	5,80	5,76	5,46	5,67
	0-17,5	6,03	5,76	5,86	5,88	5,62	5,91	5,42	5,65
	0-30,0	6,04	5,82	5,79	5,88	5,69	5,85	5,44	5,66
A+V/M+C	0-2,5	6,03	6,08	6,13	6,08	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,95	5,96	5,90	5,94	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,87	5,96	5,88	5,90	-	-	-	-
	7,5-12,5	5,91	6,06	5,89	5,95	-	-	-	-
	12,5-17,5	5,91	6,17	5,97	6,02	-	-	-	-
	17,5-30,0	5,87	5,87	5,82	5,85	-	-	-	-
	0-17,5	5,93	6,07	5,95	5,98	-	-	-	-
	0-30,0	5,90	5,98	5,89	5,93	-	-	-	-
G+M	0-2,5	5,60	5,92	5,62	5,71	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,57	5,89	5,75	5,74	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,81	5,98	5,80	5,86	-	-	-	-
	7,5-12,5	5,98	6,01	5,91	5,97	-	-	-	-
	12,5-17,5	6,12	6,10	5,98	6,07	-	-	-	-
	17,5-30,0	6,06	5,79	5,80	5,88	-	-	-	-
	0-17,5	5,88	6,00	5,85	5,91	-	-	-	-
	0-30,0	5,96	5,91	5,83	5,90	-	-	-	-
Pan	0-2,5	6,28	6,08	6,15	6,17	-	-	-	-
	2,5-5,0	6,28	6,18	6,39	6,28	-	-	-	-
	5,0-7,5	6,26	6,23	6,24	6,24	-	-	-	-
	7,5-12,5	6,37	6,39	6,28	6,35	-	-	-	-
	12,5-17,5	6,42	6,32	6,13	6,29	-	-	-	-
	17,5-30,0	6,15	6,04	5,93	6,04	-	-	-	-
	0-17,5	6,34	6,27	6,23	6,28	-	-	-	-
	0-30,0	6,26	6,18	6,10	6,18	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.



APÊNDICE 8. Teores de Al trocável (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> solo) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	0,29	0,56	0,29	0,38	0,64	0,64	0,70	0,66
	2,5-5,0	1,00	0,91	0,64	0,85	2,97	1,97	1,96	2,30
	5,0-7,5	1,08	0,91	0,82	0,94	2,01	1,74	2,47	2,07
	7,5-12,5	1,17	0,91	0,91	1,00	2,12	2,09	1,80	2,00
	12,5-17,5	0,91	1,08	0,73	0,91	2,70	1,27	1,65	1,87
	17,5-30,0	1,70	1,44	1,00	1,38	2,45	1,48	1,57	1,83
	0-17,5	0,93	0,91	0,72	0,85	2,18	1,58	1,72	1,83
	0-30,0	1,25	1,13	0,83	1,07	2,29	1,54	1,66	1,83
A/M	0-2,5	0,25	0,28	0,40	0,31	1,52	1,73	1,26	1,50
	2,5-5,0	0,64	0,59	0,77	0,67	1,57	1,48	1,80	1,62
	5,0-7,5	0,86	0,59	0,78	0,75	1,74	2,43	1,97	2,05
	7,5-12,5	0,76	0,84	0,92	0,84	1,39	2,19	2,09	1,89
	12,5-17,5	0,82	0,74	0,95	0,84	1,35	2,84	1,80	1,99
	17,5-30,0	0,76	1,10	1,37	1,08	2,10	2,23	1,93	2,09
	0-17,5	0,70	0,66	0,81	0,73	1,47	2,24	1,83	1,85
	0-30,0	0,73	0,84	1,04	0,87	1,74	2,24	1,87	1,95
L+M	0-2,5	0,01	0,03	0,02	0,02	0,06	-0,03	-0,01	0,00
	2,5-5,0	0,09	0,24	0,32	0,22	0,29	0,21	0,51	0,34
	5,0-7,5	0,17	0,51	0,51	0,40	0,45	0,60	1,10	0,72
	7,5-12,5	0,35	0,65	1,03	0,68	0,96	0,65	1,44	1,02
	12,5-17,5	0,81	0,93	1,33	1,02	1,43	0,84	1,54	1,27
	17,5-30,0	1,36	1,37	2,29	1,67	1,97	1,40	1,90	1,75
	0-17,5	0,37	0,56	0,80	0,58	0,80	0,54	1,08	0,80
	0-30,0	0,78	0,90	1,42	1,03	1,29	0,90	1,42	1,20
A+V/M	0-2,5	0,59	0,89	0,73	0,74	0,87	0,49	1,72	1,03
	2,5-5,0	0,95	1,33	1,24	1,17	1,31	1,00	2,22	1,51
	5,0-7,5	0,59	1,46	1,42	1,16	1,59	1,14	2,44	1,72
	7,5-12,5	0,78	1,52	1,50	1,27	1,59	1,17	2,31	1,69
	12,5-17,5	0,59	1,34	1,50	1,14	1,45	1,27	2,34	1,69
	17,5-30,0	0,56	1,00	1,65	1,07	1,58	1,55	2,53	1,88
	0-17,5	0,69	1,34	1,34	1,13	1,41	1,07	2,24	1,57
	0-30,0	0,64	1,20	1,47	1,10	1,48	1,27	2,36	1,70
A+V/M+C	0-2,5	0,33	0,29	0,22	0,28	-	-	-	-
	2,5-5,0	0,95	0,77	0,74	0,82	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,24	1,06	1,16	1,15	-	-	-	-
	7,5-12,5	1,24	0,86	1,41	1,17	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,48	0,95	1,22	1,22	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,61	0,97	1,30	1,30	-	-	-	-
	0-17,5	1,14	0,82	1,05	1,00	-	-	-	-
	0-30,0	1,34	0,89	1,16	1,13	-	-	-	-
G+M	0-2,5	0,64	0,33	0,39	0,45	-	-	-	-
	2,5-5,0	0,95	0,62	1,01	0,86	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,83	0,78	0,81	0,81	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,76	0,77	1,01	0,85	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,48	0,81	0,92	0,73	-	-	-	-
	17,5-30,0	0,73	1,17	1,28	1,06	-	-	-	-
	0-17,5	0,70	0,70	0,87	0,75	-	-	-	-
	0-30,0	0,71	0,90	1,04	0,88	-	-	-	-
Pan	0-2,5	0,07	0,11	0,36	0,18	-	-	-	-
	2,5-5,0	0,22	0,29	0,47	0,33	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,31	0,35	0,45	0,37	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,29	0,34	0,48	0,37	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,15	0,30	0,73	0,39	-	-	-	-
	17,5-30,0	0,83	0,73	1,26	0,94	-	-	-	-
	0-17,5	0,21	0,29	0,53	0,34	-	-	-	-
	0-30,0	0,47	0,47	0,83	0,59	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vicia; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 9. Teores de acidez potencial (H+Al titulável a pH 7,0, cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> solo) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	1,10	0,50	0,40	0,67	1,10	1,30	1,10	1,17
	2,5-5,0	1,10	1,00	0,70	0,93	2,30	1,60	2,10	2,00
	5,0-7,5	1,10	0,90	0,90	0,97	2,40	1,70	2,20	2,10
	7,5-12,5	1,20	1,20	0,90	1,10	2,70	1,10	2,10	1,97
	12,5-17,5	1,10	1,40	0,80	1,10	3,30	2,10	2,30	2,57
	17,5-30,0	2,10	1,80	1,10	1,67	3,10	1,70	2,10	2,30
	0-17,5	1,13	1,09	0,77	1,00	2,54	1,57	2,03	2,05
	0-30,0	1,53	1,38	0,91	1,28	2,78	1,63	2,06	2,15
A/M	0-2,5	0,40	0,80	0,60	0,60	1,50	1,40	1,70	1,53
	2,5-5,0	0,90	0,70	1,00	0,87	2,10	1,70	2,90	2,23
	5,0-7,5	1,10	1,00	1,10	1,07	2,40	2,50	2,80	2,57
	7,5-12,5	1,40	1,00	1,30	1,23	1,60	3,40	2,80	2,60
	12,5-17,5	1,00	1,20	1,60	1,27	1,90	3,00	2,40	2,43
	17,5-30,0	1,00	1,40	2,00	1,47	2,20	3,50	2,50	2,73
	0-17,5	1,03	0,99	1,21	1,08	1,86	2,63	2,54	2,34
	0-30,0	1,02	1,16	1,54	1,24	2,00	2,99	2,53	2,51
L+M	0-2,5	0,25	0,20	0,20	0,22	0,00	0,00	0,28	0,09
	2,5-5,0	0,28	0,40	0,53	0,40	0,40	0,40	0,93	0,58
	5,0-7,5	0,45	0,78	1,03	0,75	0,80	1,00	1,70	1,17
	7,5-12,5	0,65	1,13	1,65	1,14	1,40	1,00	2,20	1,53
	12,5-17,5	1,38	1,40	2,18	1,65	1,90	1,30	2,35	1,85
	17,5-30,0	2,13	2,43	3,00	2,52	2,60	2,28	2,90	2,59
	0-17,5	0,72	0,92	1,34	0,99	1,11	0,86	1,71	1,23
	0-30,0	1,30	1,55	2,03	1,63	1,73	1,45	2,21	1,80
A+V/M	0-2,5	0,93	1,40	1,10	1,14	1,33	0,80	2,43	1,52
	2,5-5,0	1,40	2,00	1,93	1,78	2,00	1,53	3,35	2,29
	5,0-7,5	1,38	2,33	2,10	1,93	2,50	1,80	3,50	2,60
	7,5-12,5	1,28	2,25	2,18	1,90	2,40	1,85	3,30	2,52
	12,5-17,5	0,95	2,18	2,25	1,79	2,23	2,03	3,18	2,48
	17,5-30,0	0,88	1,55	2,70	1,71	2,48	2,38	3,80	2,88
	0-17,5	1,16	2,08	2,00	1,75	2,15	1,70	3,18	2,34
	0-30,0	1,04	1,86	2,29	1,73	2,29	1,98	3,44	2,57
A+V/M+C	0-2,5	0,70	0,50	0,30	0,50	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,50	1,20	1,20	1,30	-	-	-	-
	5,0-7,5	2,00	1,60	1,60	1,73	-	-	-	-
	7,5-12,5	2,00	1,50	1,90	1,80	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,80	1,40	1,90	1,70	-	-	-	-
	17,5-30,0	2,40	1,50	2,00	1,97	-	-	-	-
	0-17,5	1,69	1,30	1,53	1,50	-	-	-	-
	0-30,0	1,98	1,38	1,73	1,70	-	-	-	-
G+M	0-2,5	1,05	0,53	0,88	0,82	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,45	1,15	1,25	1,28	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,30	1,35	1,43	1,36	-	-	-	-
	7,5-12,5	1,23	1,25	1,53	1,33	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,85	1,25	1,28	1,13	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,18	1,20	2,05	1,48	-	-	-	-
	0-17,5	1,14	1,15	1,31	1,20	-	-	-	-
	0-30,0	1,15	1,17	1,62	1,31	-	-	-	-
Pan	0-2,5	0,65	0,78	1,63	1,02	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,15	1,40	2,00	1,52	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,45	1,60	1,95	1,67	-	-	-	-
	7,5-12,5	1,40	1,55	2,03	1,66	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,90	1,43	2,90	1,74	-	-	-	-
	17,5-30,0	3,23	2,90	4,70	3,61	-	-	-	-
	0-17,5	1,12	1,39	2,20	1,57	-	-	-	-
	0-30,0	2,00	2,02	3,24	2,42	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vicia; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 10. Teores de P disponível (Mehlich-I, mg kg<sup>-1</sup> solo) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	73	68	81	74	38	22	69	43
	2,5-5,0	55	69	78	67	30	21	63	38
	5,0-7,5	46	59	69	58	21	16	59	32
	7,5-12,5	29	40	38	36	25	6	40	23
	12,5-17,5	15	18	12	15	19	6	23	16
	17,5-30,0	5	7	3	5	7	6	15	9
	0-17,5	38	45	47	43	25	12	45	27
	0-30,0	24	29	29	27	18	9	33	20
A/M	0-2,5	70	100	93	88	57	38	87	61
	2,5-5,0	60	96	86	81	62	37	78	59
	5,0-7,5	41	59	78	59	57	37	66	53
	7,5-12,5	23	35	40	33	41	29	42	37
	12,5-17,5	10	17	19	15	18	24	10	17
	17,5-30,0	6	8	7	7	1	17	5	7
	0-17,5	34	51	53	46	42	31	48	40
	0-30,0	22	33	34	30	25	25	30	27
L+M	0-2,5	65	42	102	70	82	52	84	73
	2,5-5,0	64	23	45	44	57	34	79	57
	5,0-7,5	72	22	59	51	51	27	73	50
	7,5-12,5	96	19	54	56	71	23	60	51
	12,5-17,5	70	17	42	43	28	16	40	28
	17,5-30,0	56	12	14	27	9	7	21	12
	0-17,5	76	23	57	52	55	27	62	48
	0-30,0	67	18	39	42	36	19	45	33
A+V/M	0-2,5	47	68	62	59	50	62	81	64
	2,5-5,0	36	81	60	59	62	63	129	85
	5,0-7,5	27	66	48	47	59	55	147	87
	7,5-12,5	23	52	46	40	52	51	98	67
	12,5-17,5	11	32	17	20	24	34	45	34
	17,5-30,0	6	19	8	11	7	14	11	11
	0-17,5	26	55	42	41	46	50	92	63
	0-30,0	17	40	28	28	30	35	58	41
A+V/M+C	0-2,5	43	67	62	57	-	-	-	-
	2,5-5,0	26	62	57	48	-	-	-	-
	5,0-7,5	23	61	43	42	-	-	-	-
	7,5-12,5	15	37	52	35	-	-	-	-
	12,5-17,5	10	12	30	18	-	-	-	-
	17,5-30,0	8	6	20	11	-	-	-	-
	0-17,5	20	41	47	36	-	-	-	-
	0-30,0	15	26	35	26	-	-	-	-
G+M	0-2,5	71	50	92	71	-	-	-	-
	2,5-5,0	50	47	50	49	-	-	-	-
	5,0-7,5	34	41	38	38	-	-	-	-
	7,5-12,5	24	32	31	29	-	-	-	-
	12,5-17,5	9	16	13	13	-	-	-	-
	17,5-30,0	9	6	9	8	-	-	-	-
	0-17,5	32	34	38	34	-	-	-	-
	0-30,0	22	22	26	23	-	-	-	-
Pan	0-2,5	15	17	55	29	-	-	-	-
	2,5-5,0	12	11	45	23	-	-	-	-
	5,0-7,5	9	15	31	18	-	-	-	-
	7,5-12,5	9	9	15	11	-	-	-	-
	12,5-17,5	8	8	8	8	-	-	-	-
	17,5-30,0	5	7	6	6	-	-	-	-
	0-17,5	10	11	25	15	-	-	-	-
	0-30,0	8	10	17	12	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 11. Teores de K trocável ( $\text{mg kg}^{-1}$  solo) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, $\text{kg ha}^{-1}$							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	217	162	234	204	175	207	213	198
	2,5-5,0	147	145	138	143	96	153	177	142
	5,0-7,5	136	130	130	132	89	119	153	121
	7,5-12,5	113	141	115	123	89	94	126	103
	12,5-17,5	110	111	109	110	81	77	106	88
	17,5-30,0	94	92	72	86	60	57	75	64
	0-17,5	135	134	136	135	100	117	144	120
	0-30,0	118	116	109	114	83	92	115	97
A/M	0-2,5	196	260	260	238	153	181	204	180
	2,5-5,0	104	158	194	152	115	155	147	139
	5,0-7,5	104	141	181	142	98	151	115	121
	7,5-12,5	96	149	162	136	96	100	96	97
	12,5-17,5	89	155	147	131	85	89	87	87
	17,5-30,0	83	147	130	120	75	89	79	81
	0-17,5	111	167	179	152	104	124	119	116
	0-30,0	99	158	158	139	92	109	102	101
L+M	0-2,5	130	268	294	231	294	281	290	288
	2,5-5,0	200	200	251	217	264	243	268	258
	5,0-7,5	175	183	255	204	204	247	285	246
	7,5-12,5	111	164	219	165	200	211	192	201
	12,5-17,5	70	145	183	133	141	204	166	170
	17,5-30,0	89	119	130	113	98	132	134	121
	0-17,5	124	181	229	178	206	229	223	219
	0-30,0	109	155	188	151	161	188	186	178
A+V/M	0-2,5	153	168	185	169	168	202	128	166
	2,5-5,0	106	102	106	105	143	155	81	126
	5,0-7,5	132	94	98	108	136	141	81	119
	7,5-12,5	134	87	94	105	126	115	87	109
	12,5-17,5	119	96	85	100	104	111	87	101
	17,5-30,0	89	115	81	95	104	102	94	100
	0-17,5	128	104	107	113	130	136	91	119
	0-30,0	112	109	96	106	119	122	92	111
A+V/M+C	0-2,5	155	177	189	174	-	-	-	-
	2,5-5,0	106	277	189	191	-	-	-	-
	5,0-7,5	117	145	211	158	-	-	-	-
	7,5-12,5	123	126	164	138	-	-	-	-
	12,5-17,5	117	106	153	126	-	-	-	-
	17,5-30,0	92	60	138	97	-	-	-	-
	0-17,5	123	152	175	150	-	-	-	-
	0-30,0	110	113	160	128	-	-	-	-
G+M	0-2,5	160	170	164	165	-	-	-	-
	2,5-5,0	155	179	160	165	-	-	-	-
	5,0-7,5	138	204	153	165	-	-	-	-
	7,5-12,5	130	183	141	151	-	-	-	-
	12,5-17,5	100	181	141	141	-	-	-	-
	17,5-30,0	70	160	98	109	-	-	-	-
	0-17,5	130	183	148	154	-	-	-	-
	0-30,0	105	173	127	135	-	-	-	-
Pan	0-2,5	189	183	168	180	-	-	-	-
	2,5-5,0	143	179	117	146	-	-	-	-
	5,0-7,5	115	166	117	133	-	-	-	-
	7,5-12,5	89	132	94	105	-	-	-	-
	12,5-17,5	68	115	79	87	-	-	-	-
	17,5-30,0	38	85	57	60	-	-	-	-
	0-17,5	109	146	107	121	-	-	-	-
	0-30,0	79	121	86	95	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 12. Teores de Ca trocável (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> solo) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	3,51	2,46	2,79	2,92	2,70	2,79	2,52	2,67
	2,5-5,0	2,27	1,89	2,70	2,29	0,95	1,32	0,89	1,05
	5,0-7,5	2,84	2,18	2,56	2,53	0,74	1,32	0,77	0,94
	7,5-12,5	2,04	1,80	1,99	1,94	0,80	1,80	0,61	1,07
	12,5-17,5	2,14	1,85	2,42	2,13	2,15	2,03	0,77	1,65
	17,5-30,0	2,84	1,99	2,65	2,49	1,56	2,03	2,12	1,90
	0-17,5	2,42	1,98	2,41	2,27	1,47	1,87	0,99	1,44
	0-30,0	2,60	1,98	2,51	2,36	1,51	1,93	1,46	1,63
A/M	0-2,5	2,70	2,00	1,78	2,16	1,38	1,81	1,96	1,72
	2,5-5,0	2,67	1,66	2,12	2,15	1,72	1,17	1,09	1,33
	5,0-7,5	2,39	1,44	2,15	2,00	0,83	1,04	0,55	0,81
	7,5-12,5	1,75	1,96	2,15	1,95	1,47	1,44	0,68	1,20
	12,5-17,5	1,72	2,39	1,38	1,83	1,04	0,98	0,68	0,90
	17,5-30,0	1,69	1,69	1,93	1,77	2,12	1,57	1,29	1,66
	0-17,5	2,10	1,97	1,87	1,98	1,28	1,27	0,90	1,15
	0-30,0	1,93	1,85	1,90	1,89	1,63	1,39	1,06	1,36
L+M	0-2,5	6,26	5,00	5,89	5,72	6,32	4,51	5,03	5,29
	2,5-5,0	3,68	2,55	3,28	3,17	3,44	2,15	2,24	2,61
	5,0-7,5	4,27	2,36	1,69	2,77	3,78	1,47	1,17	2,14
	7,5-12,5	3,16	1,47	1,47	2,04	1,96	1,17	1,04	1,39
	12,5-17,5	2,15	1,26	1,47	1,63	1,14	1,26	0,64	1,01
	17,5-30,0	2,58	1,69	1,78	2,02	0,98	1,90	0,86	1,25
	0-17,5	3,55	2,20	2,39	2,71	2,82	1,86	1,69	2,12
	0-30,0	3,14	1,99	2,14	2,42	2,05	1,88	1,34	1,76
A+V/M	0-2,5	1,81	2,15	1,96	1,98	1,75	2,95	0,58	1,76
	2,5-5,0	1,17	0,89	0,80	0,95	1,41	2,30	0,80	1,50
	5,0-7,5	1,96	1,35	1,38	1,57	0,77	1,07	0,68	0,84
	7,5-12,5	1,84	1,23	0,71	1,26	0,89	0,92	0,77	0,86
	12,5-17,5	1,41	1,14	1,69	1,41	0,80	2,27	0,57	1,21
	17,5-30,0	2,46	1,69	1,23	1,79	1,29	2,43	1,07	1,60
	0-17,5	1,64	1,30	1,28	1,40	1,04	1,82	0,68	1,18
	0-30,0	1,98	1,46	1,26	1,57	1,15	2,07	0,84	1,35
A+V/M+C	0-2,5	2,24	3,07	2,89	2,73	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,32	1,32	1,66	1,43	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,07	1,07	1,72	1,29	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,89	0,92	1,20	1,00	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,04	1,96	1,81	1,61	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,07	1,72	1,47	1,42	-	-	-	-
	0-17,5	1,21	1,61	1,75	1,52	-	-	-	-
	0-30,0	1,16	1,65	1,64	1,48	-	-	-	-
G+M	0-2,5	2,67	2,98	3,93	3,19	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,78	2,12	2,86	2,25	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,44	2,33	1,47	1,75	-	-	-	-
	7,5-12,5	2,09	1,47	1,41	1,66	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,75	1,72	1,14	1,53	-	-	-	-
	17,5-30,0	2,82	1,84	1,26	1,98	-	-	-	-
	0-17,5	1,94	1,97	1,91	1,94	-	-	-	-
	0-30,0	2,31	1,92	1,64	1,95	-	-	-	-
Pan	0-2,5	2,70	3,35	2,06	2,70	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,81	1,69	1,69	1,73	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,66	1,44	1,84	1,65	-	-	-	-
	7,5-12,5	2,67	2,27	1,47	2,14	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,96	2,76	1,41	2,05	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,66	2,46	1,29	1,80	-	-	-	-
	0-17,5	2,21	2,36	1,62	2,06	-	-	-	-
	0-30,0	1,98	2,40	1,48	1,95	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 13. Teores de Mg trocável (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> solo) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	1,84	1,26	1,53	1,55	1,58	1,51	1,36	1,48
	2,5-5,0	1,31	0,99	1,20	1,16	0,91	0,94	0,66	0,84
	5,0-7,5	1,16	0,93	1,06	1,05	0,72	0,83	0,46	0,67
	7,5-12,5	1,05	1,13	0,96	1,05	0,63	0,97	0,40	0,67
	12,5-17,5	1,00	0,88	1,13	1,00	0,85	1,02	0,71	0,86
	17,5-30,0	1,09	0,99	1,20	1,09	0,63	1,01	0,94	0,86
	0-17,5	1,20	1,03	1,14	1,12	0,88	1,04	0,67	0,86
	0-30,0	1,15	1,01	1,16	1,11	0,78	1,03	0,78	0,86
A/M	0-2,5	1,49	1,48	1,24	1,40	0,81	1,10	0,76	0,89
	2,5-5,0	1,16	0,93	0,84	0,98	0,67	0,74	0,45	0,62
	5,0-7,5	1,05	0,79	0,81	0,88	0,48	0,66	0,32	0,48
	7,5-12,5	0,83	0,79	0,78	0,80	0,56	0,38	0,27	0,40
	12,5-17,5	0,85	0,91	0,64	0,80	0,51	0,32	0,32	0,38
	17,5-30,0	0,94	0,90	0,77	0,87	0,72	0,45	0,53	0,57
	0-17,5	1,01	0,95	0,82	0,92	0,58	0,56	0,39	0,51
	0-30,0	0,98	0,93	0,80	0,90	0,64	0,51	0,45	0,53
L+M	0-2,5	3,29	2,63	3,56	3,16	3,07	3,33	3,07	3,16
	2,5-5,0	2,11	1,55	2,31	1,99	2,04	2,09	1,73	1,95
	5,0-7,5	1,87	1,26	1,45	1,53	1,61	1,37	1,00	1,33
	7,5-12,5	1,42	1,02	1,07	1,17	1,07	1,03	0,77	0,96
	12,5-17,5	1,18	0,91	0,83	0,97	0,78	0,93	0,53	0,75
	17,5-30,0	1,21	0,95	0,76	0,97	0,88	0,91	0,59	0,79
	0-17,5	1,78	1,33	1,59	1,57	1,49	1,53	1,20	1,41
	0-30,0	1,54	1,17	1,24	1,32	1,24	1,27	0,95	1,15
A+V/M	0-2,5	1,28	1,11	1,22	1,20	1,25	1,47	0,52	1,08
	2,5-5,0	0,83	0,57	0,59	0,66	0,83	0,91	0,42	0,72
	5,0-7,5	0,89	0,54	0,54	0,66	0,51	0,57	0,21	0,43
	7,5-12,5	0,84	0,48	0,38	0,57	0,48	0,48	0,22	0,39
	12,5-17,5	0,81	0,48	0,52	0,60	0,48	0,70	0,22	0,47
	17,5-30,0	1,05	0,77	0,53	0,78	0,58	0,82	0,26	0,55
	0-17,5	0,90	0,59	0,59	0,69	0,64	0,76	0,29	0,56
	0-30,0	0,96	0,67	0,57	0,73	0,62	0,78	0,28	0,56
A+V/M+C	0-2,5	1,69	1,65	1,93	1,76	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,01	0,79	1,31	1,04	-	-	-	-
	5,0-7,5	0,73	0,61	0,91	0,75	-	-	-	-
	7,5-12,5	0,58	0,59	0,64	0,60	-	-	-	-
	12,5-17,5	0,60	0,76	0,69	0,68	-	-	-	-
	17,5-30,0	0,58	1,01	0,69	0,76	-	-	-	-
	0-17,5	0,83	0,82	0,97	0,87	-	-	-	-
	0-30,0	0,72	0,90	0,85	0,83	-	-	-	-
G+M	0-2,5	1,70	1,71	2,12	1,84	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,25	1,24	1,67	1,39	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,05	1,13	0,95	1,04	-	-	-	-
	7,5-12,5	1,19	0,94	0,90	1,01	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,23	0,97	0,79	1,00	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,63	0,97	0,85	1,15	-	-	-	-
	0-17,5	1,26	1,13	1,16	1,18	-	-	-	-
	0-30,0	1,42	1,06	1,03	1,17	-	-	-	-
Pan	0-2,5	1,74	2,09	1,31	1,71	-	-	-	-
	2,5-5,0	1,40	1,45	1,09	1,31	-	-	-	-
	5,0-7,5	1,31	1,28	1,08	1,22	-	-	-	-
	7,5-12,5	1,47	1,34	1,03	1,28	-	-	-	-
	12,5-17,5	1,51	1,64	1,06	1,40	-	-	-	-
	17,5-30,0	1,44	1,59	1,00	1,34	-	-	-	-
	0-17,5	1,49	1,54	1,09	1,37	-	-	-	-
	0-30,0	1,47	1,56	1,06	1,36	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 14. Capacidade de troca de cátions efetiva (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> solo) de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	9,54	7,23	8,04	8,27	8,27	8,44	7,89	8,20
	2,5-5,0	7,73	6,50	7,64	7,29	7,93	7,21	6,19	7,11
	5,0-7,5	8,49	6,78	7,44	7,57	5,76	6,55	6,38	6,23
	7,5-12,5	7,36	6,80	6,72	6,96	6,12	8,25	5,09	6,49
	12,5-17,5	7,01	6,64	7,38	7,01	9,57	7,31	5,50	7,46
	17,5-30,0	9,51	7,53	8,15	8,40	7,76	7,56	7,80	7,71
	0-17,5	7,79	6,77	7,33	7,30	7,62	7,62	5,95	7,06
	0-30,0	8,50	7,09	7,67	7,76	7,68	7,59	6,72	7,33
A/M	0-2,5	7,61	6,82	6,30	6,91	6,32	7,85	6,95	7,04
	2,5-5,0	7,41	5,57	6,59	6,52	6,64	5,90	5,80	6,12
	5,0-7,5	7,13	4,98	6,56	6,22	5,15	7,04	4,89	5,69
	7,5-12,5	5,80	6,45	6,91	6,39	5,94	6,92	5,33	6,06
	12,5-17,5	5,86	7,20	5,43	6,17	5,06	7,08	4,88	5,67
	17,5-30,0	5,72	6,47	7,01	6,40	8,16	7,12	6,28	7,19
	0-17,5	6,50	6,38	6,30	6,39	5,73	6,97	5,44	6,04
	0-30,0	6,17	6,42	6,60	6,40	6,74	7,03	5,79	6,52
L+M	0-2,5	15,34	12,95	15,86	14,72	15,82	13,23	13,69	14,25
	2,5-5,0	10,30	7,81	10,56	9,56	10,37	8,16	8,33	8,95
	5,0-7,5	11,28	7,70	7,19	8,72	10,63	6,81	6,68	8,04
	7,5-12,5	8,65	5,92	6,86	7,15	7,48	5,63	6,21	6,44
	12,5-17,5	7,03	5,66	6,67	6,45	6,04	5,79	5,12	5,65
	17,5-30,0	8,77	7,03	8,42	8,07	6,66	7,42	6,01	6,70
	0-17,5	9,75	7,38	8,67	8,60	9,12	7,29	7,34	7,92
	0-30,0	9,34	7,23	8,57	8,38	8,10	7,35	6,79	7,41
A+V/M	0-2,5	6,27	7,06	6,76	6,70	6,63	8,36	4,86	6,61
	2,5-5,0	5,09	4,81	4,58	4,82	6,19	7,30	5,76	6,42
	5,0-7,5	5,98	5,69	5,68	5,78	5,08	4,95	5,57	5,20
	7,5-12,5	6,32	5,73	4,70	5,58	5,45	4,76	5,84	5,35
	12,5-17,5	5,16	5,31	6,52	5,67	4,97	7,50	5,57	6,01
	17,5-30,0	7,13	6,24	6,00	6,46	6,17	8,38	6,81	7,12
	0-17,5	5,76	5,66	5,64	5,69	5,53	6,45	5,57	5,85
	0-30,0	6,33	5,90	5,79	6,01	5,80	7,25	6,09	6,38
A+V/M+C	0-2,5	7,17	8,42	8,50	8,03	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,62	5,68	6,62	5,97	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,29	4,93	6,84	5,69	-	-	-	-
	7,5-12,5	5,03	4,47	6,09	5,20	-	-	-	-
	12,5-17,5	5,68	6,56	6,82	6,35	-	-	-	-
	17,5-30,0	5,81	6,40	6,34	6,18	-	-	-	-
	0-17,5	5,64	5,87	6,82	6,11	-	-	-	-
	0-30,0	5,71	6,09	6,62	6,14	-	-	-	-
G+M	0-2,5	7,54	7,58	9,54	8,22	-	-	-	-
	2,5-5,0	6,18	6,26	8,38	6,94	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,18	6,73	5,10	5,67	-	-	-	-
	7,5-12,5	6,64	5,55	5,60	5,93	-	-	-	-
	12,5-17,5	5,64	6,02	4,87	5,51	-	-	-	-
	17,5-30,0	8,86	7,25	6,01	7,37	-	-	-	-
	0-17,5	6,21	6,24	6,28	6,24	-	-	-	-
	0-30,0	7,31	6,66	6,17	6,71	-	-	-	-
Pan	0-2,5	5,70	6,86	4,73	5,77	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,17	5,29	4,82	5,09	-	-	-	-
	5,0-7,5	5,60	5,50	5,77	5,62	-	-	-	-
	7,5-12,5	7,23	6,64	5,00	6,29	-	-	-	-
	12,5-17,5	6,12	8,05	5,48	6,55	-	-	-	-
	17,5-30,0	6,59	8,19	6,06	6,95	-	-	-	-
	0-17,5	6,17	6,72	5,18	6,02	-	-	-	-
	0-30,0	6,34	7,33	5,55	6,41	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 15. Capacidade de troca de cátions em pH 7,0 (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> solo) de um Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	18,27	13,99	12,82	15,02	18,26	17,73	17,56	17,85
	2,5-5,0	14,70	13,67	15,28	14,55	15,24	15,02	14,84	15,03
	5,0-7,5	15,62	13,07	14,63	14,44	14,28	13,42	14,06	13,92
	7,5-12,5	14,63	13,89	12,89	13,80	15,09	14,16	13,84	14,36
	12,5-17,5	13,79	13,80	14,14	13,91	18,39	14,85	14,57	15,94
	17,5-30,0	18,43	14,68	15,46	16,19	16,94	16,16	15,65	16,25
	0-17,5	15,06	13,73	13,83	14,21	16,39	14,88	14,75	15,34
	0-30,0	16,46	14,13	14,51	15,03	16,62	15,42	15,13	15,72
A/M	0-2,5	15,71	15,67	16,13	15,84	15,13	15,71	17,15	15,99
	2,5-5,0	15,76	14,72	15,74	15,41	16,55	15,36	16,99	16,30
	5,0-7,5	14,96	13,00	14,92	14,29	14,26	16,20	14,76	15,07
	7,5-12,5	13,68	14,01	15,14	14,28	15,11	17,73	15,38	16,07
	12,5-17,5	12,72	15,29	13,67	13,89	15,09	15,43	12,84	14,46
	17,5-30,0	12,43	14,50	14,85	13,92	16,21	15,26	12,22	14,56
	0-17,5	14,18	14,57	14,92	14,55	15,19	16,23	15,05	15,49
	0-30,0	13,45	14,54	14,89	14,29	15,62	15,82	13,87	15,10
L+M	0-2,5	24,26	21,91	23,19	23,12	27,01	21,17	23,77	23,98
	2,5-5,0	20,06	17,13	19,70	18,96	22,23	17,85	20,50	20,19
	5,0-7,5	21,71	16,73	18,61	19,02	22,91	15,26	18,45	18,87
	7,5-12,5	18,53	13,98	17,36	16,62	20,35	13,63	17,17	17,05
	12,5-17,5	16,47	13,06	17,18	15,57	15,77	15,30	14,85	15,30
	17,5-30,0	18,97	15,25	18,21	17,48	16,61	16,27	16,14	16,34
	0-17,5	19,43	15,70	18,65	17,93	20,63	16,02	18,11	18,25
	0-30,0	19,24	15,51	18,47	17,74	18,95	16,12	17,29	17,45
A+V/M	0-2,5	17,63	17,36	16,73	17,24	20,22	19,51	16,85	18,86
	2,5-5,0	15,26	14,63	14,66	14,85	18,42	20,02	17,69	18,71
	5,0-7,5	15,30	15,89	15,06	15,42	16,28	14,78	16,14	15,74
	7,5-12,5	14,41	14,79	12,91	14,04	16,02	14,27	16,10	15,46
	12,5-17,5	12,83	14,36	13,42	13,54	15,09	15,86	15,52	15,49
	17,5-30,0	15,02	16,16	14,10	15,09	15,44	18,53	16,89	16,95
	0-17,5	14,67	15,17	14,16	14,67	16,73	16,37	16,27	16,46
	0-30,0	14,81	15,58	14,14	14,84	16,19	17,27	16,53	16,66
A+V/M+C	0-2,5	18,40	19,24	20,13	19,26	-	-	-	-
	2,5-5,0	16,57	16,02	17,61	16,73	-	-	-	-
	5,0-7,5	15,96	14,03	17,05	15,68	-	-	-	-
	7,5-12,5	13,79	12,81	15,40	14,00	-	-	-	-
	12,5-17,5	14,24	14,00	15,19	14,48	-	-	-	-
	17,5-30,0	14,71	14,43	15,32	14,82	-	-	-	-
	0-17,5	15,29	14,70	16,57	15,52	-	-	-	-
	0-30,0	15,05	14,59	16,05	15,23	-	-	-	-
G+M	0-2,5	18,65	16,93	21,84	19,14	-	-	-	-
	2,5-5,0	16,38	14,80	16,90	16,02	-	-	-	-
	5,0-7,5	13,37	14,56	13,33	13,75	-	-	-	-
	7,5-12,5	14,08	12,86	13,58	13,51	-	-	-	-
	12,5-17,5	12,95	12,19	11,68	12,27	-	-	-	-
	17,5-30,0	16,24	15,21	13,48	14,98	-	-	-	-
	0-17,5	14,64	13,77	14,66	14,35	-	-	-	-
	0-30,0	15,30	14,37	14,17	14,61	-	-	-	-
Pan	0-2,5	12,16	13,40	9,92	11,82	-	-	-	-
	2,5-5,0	11,28	12,02	10,65	11,32	-	-	-	-
	5,0-7,5	11,99	12,59	11,92	12,17	-	-	-	-
	7,5-12,5	12,33	12,20	10,63	11,72	-	-	-	-
	12,5-17,5	11,65	13,64	12,31	12,54	-	-	-	-
	17,5-30,0	13,34	15,65	14,51	14,50	-	-	-	-
	0-17,5	11,91	12,81	11,20	11,97	-	-	-	-
	0-30,0	12,51	14,00	12,58	13,03	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.



APÊNDICE 16. Saturação por bases (%) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	50	46	59	51	40	42	39	40
	2,5-5,0	42	37	43	41	22	28	21	23
	5,0-7,5	44	41	42	42	18	29	18	22
	7,5-12,5	37	38	41	39	18	34	16	23
	12,5-17,5	40	35	44	40	28	35	19	28
	17,5-30,0	37	35	42	38	22	32	34	29
	0-17,5	41	39	45	42	25	34	21	27
	0-30,0	39	37	44	40	24	33	26	28
A/M	0-2,5	46	41	35	41	26	33	29	30
	2,5-5,0	41	32	34	36	25	23	18	22
	5,0-7,5	39	31	36	35	17	20	12	17
	7,5-12,5	33	36	36	35	24	19	13	19
	12,5-17,5	36	39	28	35	19	16	15	17
	17,5-30,0	36	33	33	34	30	23	26	27
	0-17,5	38	36	33	36	22	21	16	20
	0-30,0	37	35	33	35	25	22	21	23
L+M	0-2,5	63	59	68	64	58	63	58	59
	2,5-5,0	51	43	51	49	45	44	37	42
	5,0-7,5	51	41	34	42	43	38	26	36
	7,5-12,5	44	35	30	36	29	33	22	28
	12,5-17,5	35	32	26	31	24	29	18	23
	17,5-30,0	35	31	26	31	21	32	18	23
	0-17,5	46	39	38	41	36	38	29	34
	0-30,0	41	36	33	37	30	36	24	30
A+V/M	0-2,5	30	33	34	32	26	39	13	27
	2,5-5,0	23	19	18	20	22	29	13	22
	5,0-7,5	33	21	23	26	16	21	11	16
	7,5-12,5	35	22	17	25	18	20	12	16
	12,5-17,5	33	22	30	28	17	34	11	21
	17,5-30,0	41	28	23	31	23	31	15	24
	0-17,5	32	23	24	26	19	28	12	20
	0-30,0	36	25	24	28	21	29	13	21
A+V/M+C	0-2,5	36	41	41	39	-	-	-	-
	2,5-5,0	25	28	31	28	-	-	-	-
	5,0-7,5	21	23	29	25	-	-	-	-
	7,5-12,5	21	24	24	23	-	-	-	-
	12,5-17,5	23	36	32	30	-	-	-	-
	17,5-30,0	21	33	27	27	-	-	-	-
	0-17,5	24	30	30	28	-	-	-	-
	0-30,0	23	31	29	28	-	-	-	-
G+M	0-2,5	36	42	41	40	-	-	-	-
	2,5-5,0	30	36	41	36	-	-	-	-
	5,0-7,5	30	39	30	33	-	-	-	-
	7,5-12,5	39	34	30	34	-	-	-	-
	12,5-17,5	38	39	30	36	-	-	-	-
	17,5-30,0	47	35	29	38	-	-	-	-
	0-17,5	36	38	33	36	-	-	-	-
	0-30,0	40	37	31	36	-	-	-	-
Pan	0-2,5	46	50	44	47	-	-	-	-
	2,5-5,0	43	41	39	41	-	-	-	-
	5,0-7,5	43	39	42	41	-	-	-	-
	7,5-12,5	55	50	40	49	-	-	-	-
	12,5-17,5	50	55	35	47	-	-	-	-
	17,5-30,0	39	45	28	37	-	-	-	-
	0-17,5	49	49	39	46	-	-	-	-
	0-30,0	45	47	34	42	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vica; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

APÊNDICE 17. Saturação por alumínio (%) em Argissolo sob sistemas de cultura em plantio direto e adubação nitrogenada mineral.

Sistema de cultura	Profundidade, cm	Dose de N, kg ha <sup>-1</sup>							
		0				180			
		I <sup>2</sup>	II	III	Média	I	II	III	Média
P/M <sup>1</sup>	0-2,5	4,7	11,8	5,6	7,1	12,0	11,8	13,6	12,4
	2,5-5,0	20,1	21,8	13,2	18,2	58,5	42,7	49,4	50,5
	5,0-7,5	19,9	20,9	17,2	19,3	54,4	41,5	60,4	51,9
	7,5-12,5	25,8	21,6	21,9	23,2	56,1	40,9	57,4	50,0
	12,5-17,5	21,0	26,5	16,1	21,0	45,7	28,1	48,5	40,6
	17,5-30,0	28,9	30,9	19,8	26,6	51,0	31,7	32,6	38,5
	0-17,5	19,8	21,5	16,0	19,0	46,9	33,4	47,9	42,3
	0-30,0	23,6	25,4	17,6	22,1	48,6	32,7	41,5	40,7
A/M	0-2,5	5,0	6,4	9,8	7,0	37,1	33,8	27,9	32,9
	2,5-5,0	13,6	16,4	18,2	15,9	36,8	39,1	48,5	41,2
	5,0-7,5	18,9	18,6	18,6	18,7	52,8	53,8	62,9	56,1
	7,5-12,5	21,2	21,1	21,5	21,3	38,0	51,3	63,7	50,6
	12,5-17,5	22,7	16,6	28,4	22,0	43,2	65,0	59,6	57,0
	17,5-30,0	21,1	27,0	31,1	26,7	41,0	49,9	48,8	46,2
	0-17,5	17,9	16,7	20,9	18,3	41,3	51,3	55,1	49,3
	0-30,0	19,2	21,0	25,1	21,8	41,2	50,7	52,5	48,0
L+M	0-2,5	0,1	0,4	0,2	0,2	0,6	0,0	0,0	0,1
	2,5-5,0	1,4	5,0	4,9	3,7	4,5	4,0	9,9	6,1
	5,0-7,5	2,5	11,1	11,9	7,6	7,1	14,7	27,5	14,9
	7,5-12,5	6,7	18,3	25,0	15,8	21,3	19,2	38,3	26,2
	12,5-17,5	18,7	26,8	32,4	25,8	38,5	23,7	48,9	36,6
	17,5-30,0	25,3	31,8	44,4	33,8	48,2	30,7	51,4	42,7
	0-17,5	7,8	15,2	18,8	13,5	18,8	14,9	30,3	20,9
	0-30,0	15,1	22,1	29,5	22,0	31,1	21,5	39,1	30,0
A+V/M	0-2,5	14,4	19,5	16,7	16,9	20,2	9,0	54,6	23,9
	2,5-5,0	29,6	43,5	42,7	38,4	33,5	21,7	60,9	37,2
	5,0-7,5	15,5	40,7	39,5	31,6	49,4	36,2	69,1	52,2
	7,5-12,5	20,6	44,1	53,1	37,7	48,4	40,9	65,6	52,4
	12,5-17,5	18,8	41,9	38,2	33,5	48,4	28,0	69,8	46,6
	17,5-30,0	13,1	26,7	45,6	27,5	42,6	30,6	61,6	43,9
	0-17,5	19,8	39,4	40,2	32,8	42,4	29,3	65,1	44,5
	0-30,0	17,0	34,1	42,4	30,6	42,5	29,8	63,6	44,3
A+V/M+C	0-2,5	7,1	5,4	4,0	5,4	-	-	-	-
	2,5-5,0	26,8	21,4	17,7	21,7	-	-	-	-
	5,0-7,5	37,2	34,1	26,7	32,1	-	-	-	-
	7,5-12,5	41,1	32,1	38,4	37,4	-	-	-	-
	12,5-17,5	43,2	24,1	29,6	31,8	-	-	-	-
	17,5-30,0	46,1	25,2	34,1	34,8	-	-	-	-
	0-17,5	34,2	24,7	26,3	28,2	-	-	-	-
	0-30,0	39,2	24,9	29,6	31,0	-	-	-	-
G+M	0-2,5	11,9	6,0	5,7	7,7	-	-	-	-
	2,5-5,0	21,7	14,0	17,0	17,5	-	-	-	-
	5,0-7,5	22,5	16,4	22,3	20,0	-	-	-	-
	7,5-12,5	17,4	21,1	27,4	21,7	-	-	-	-
	12,5-17,5	12,8	20,4	28,5	20,2	-	-	-	-
	17,5-30,0	13,6	26,7	35,2	23,8	-	-	-	-
	0-17,5	16,7	17,0	22,4	18,4	-	-	-	-
	0-30,0	15,4	21,1	27,7	20,7	-	-	-	-
Pan	0-2,5	1,5	1,8	8,6	3,6	-	-	-	-
	2,5-5,0	5,8	7,5	13,2	8,7	-	-	-	-
	5,0-7,5	8,6	10,0	12,4	10,4	-	-	-	-
	7,5-12,5	6,3	7,9	14,8	9,1	-	-	-	-
	12,5-17,5	3,9	6,0	21,5	9,7	-	-	-	-
	17,5-30,0	20,6	14,7	34,1	22,2	-	-	-	-
	0-17,5	5,2	6,7	15,3	8,6	-	-	-	-
	0-30,0	11,6	10,0	23,1	14,3	-	-	-	-

<sup>1</sup> P = pousio; M = milho; A = aveia; L = lablab; V = vicia; C = caupi; G = guandu; e Pan = pangola.

<sup>2</sup> Resultados dos blocos I, II e III.

## **10. RESUMO BIOGRÁFICO**

Frederico Costa Beber Vieira, filho de Lucídio Roque Vieira e Deli Costa Beber Vieira, nasceu em 30 de agosto de 1979 em São Luiz Gonzaga, onde realizou seus estudos de 1º e 2º graus. Coursou o 2º grau na Escola Técnica em Agropecuária Cruzeiro do Sul de 1994 a 1996. Em 1997, ingressou no curso de Agronomia da UFSM, onde trabalhou em iniciação científica durante três anos e se graduou em início de 2002. Neste ano, ingressou no Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, na área de Manejo de Solos sob orientação do prof. Dr. Cimélio Bayer. Em agosto de 2003, realizou ascensão direta do Mestrado para o curso de Doutorado em Ciência do Solo, na mesma área e sob mesma orientação. Realizou parte de seu doutorado junto ao Departamento de Solo e Água da Universidade da Flórida, Fort Pierce, sob orientação do Dr. Zhenli He, de agosto de 2005 a julho de 2006.