

Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo

Liliane Pereira Campos⁽¹⁾, Luiz Fernando Carvalho Leite⁽²⁾, Giovana Alcântara Maciel⁽³⁾,
Elisvânia Lima Brasil⁽⁴⁾ e Bruna de Freitas Iwata⁽⁵⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/nº, CEP 14884-900 Jaboticabal, SP. E-mail: lclilianecampos@gmail.com ⁽²⁾Embrapa Meio-Norte, Avenida Duque de Caxias, nº 5.650, CEP 64006-220 Teresina, PI. E-mail: luiz.f.leite@embrapa.br ⁽³⁾Embrapa Cerrados, BR 020, Km 18, CEP 73310-970 Planaltina, DF. E-mail: giovana.maciel@embrapa.br ⁽⁴⁾Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), Reitoria, Praça da Liberdade, nº 1.597, CEP 64000-040 Teresina, PI. E-mail: elisvanialima@hotmail.com ⁽⁵⁾Universidade Federal do Piauí, Campus Ministro Petrônio Portella, s/nº, CEP 64049-550 Teresina, PI. E-mail: iwatameioambiente@gmail.com

Resumo – O objetivo deste trabalho foi determinar os efeitos de sistemas de manejo do solo sobre os estoques e as frações de carbono orgânico de um Latossolo Amarelo, no cerrado do Piauí. Foram avaliados os sistemas: plantio convencional por três anos; plantio direto por três e cinco anos, com uso de milheto como cultivo de cobertura; e plantio direto por nove anos, dos quais sete com uso de milheto e dois com forrageira (*Urochloa brizantha*). Utilizou-se área de cerrado nativo como referência. Amostras de solo foram coletadas nos períodos chuvoso e seco, das camadas de 0,00–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, para determinação de: estoques e totais de carbono orgânico e nitrogênio; teores de substâncias húmicas; e índice de humificação. Na camada de 0,00–0,05 m, em ambos os períodos, foram observados os maiores teores de carbono no solo sob cerrado. No entanto, nos dois períodos e nas quatro profundidades, verificaram-se os maiores estoques de carbono e nitrogênio bem como os maiores teores de substâncias húmicas nos solos sob plantio direto por cinco e nove anos. Os maiores índices de humificação também foram observados nesses solos, no período seco. O plantio direto, associado ao uso de cultivos de cobertura, diminui a mineralização da matéria orgânica do solo, estoca carbono no solo em profundidade e favorece o sequestro de carbono em áreas do cerrado do Piauí.

Termos para indexação: plantio direto, rotação de culturas, sequestro de carbono, substâncias húmicas.

Stocks and fractions of organic carbon in an Oxisol under different management systems

Abstract – The objective of this work was to determine the effects of soil management systems on the stocks and fractions of organic carbon of an Oxisol (Xantic Ferralsol), in the cerrado of the state of Piauí, Brazil. The following systems were evaluated: a three-year-old conventional tillage; a three- and a five-year-old no-tillage system, using millet as cover crop; and a nine-year-old no-tillage, using millet as cover crop for seven and forage (*Urochloa brizantha*) for two years. A native cerrado area was used as a reference. Soil samples were collected in the wet and dry seasons from 0.00–0.05, 0.05–0.10, 0.10–0.20, and 0.20–0.40 m depths for determining: total organic carbon and nitrogen contents and stocks; humic substances content; and humification index. The highest carbon contents were observed in the soil under cerrado, at 0.00–0.05 m depth, in both seasons. However, the highest stocks of carbon and nitrogen as well as the highest contents of humic substances were verified in the soil with no-tillage system for five and nine years, in both seasons, at all evaluated depths. The highest humification index was also observed in these soils, in the dry season. No-tillage associated with cover crops decreases soil organic matter mineralization, increases soil carbon stocks in depth, and favors carbon sequestration in cerrado areas of Piauí state.

Index terms: no-tillage, crop rotation, carbon sequestration, humic substances.

Introdução

Nos últimos anos, o ciclo do carbono tem sido avaliado em diversos estudos, uma vez que esse elemento desempenha papel chave nos processos que envolvem mudanças climáticas globais (Carvalho et al., 2010). Sistemas de manejo capazes de manter

ou até mesmo incrementar as frações de C orgânico no solo contribuem para a manutenção da capacidade produtiva e para a mitigação do incremento do CO₂ atmosférico (Siqueira Neto et al., 2009).

O carbono acumula-se no solo em frações ativas (lábeis) ou mais estáveis (Passos et al., 2007). Essa estabilidade do C no solo tem implicações quanto a

seu efeito mitigador da elevação do CO₂ atmosférico, e também sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos (Wolf & Wagner, 2005).

A fração lábil da matéria orgânica do solo (MOS) inclui resíduos de plantas em decomposição, formas solúveis em água, macrofauna edáfica e biomassa microbiana. A mineralização dos constituintes lábeis ocorre em poucas semanas ou meses (Silva & Mendonça, 2007). Em contrapartida, os componentes mais estáveis da MOS, representados pelas substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas), são resistentes ao ataque microbiano e podem persistir no solo por centenas de anos, seja por sua estrutura molecular recalcitrante ou por estarem fisicamente protegidos em complexos organominerais no interior dos agregados (Passos et al., 2007; Silva & Mendonça, 2007).

O acúmulo de carbono nas frações lábeis e estáveis da MOS apresenta grande dinamismo e é influenciado pela composição química (relação C/N) pelo aporte de resíduos ao solo, por aspectos climáticos e, principalmente, pelo manejo adotado (Silva & Mendonça, 2007; Zhongkui et al., 2010). Em sistema de plantio direto, tem-se observado que o acúmulo de carbono no solo ocorre preferencialmente na matéria orgânica particulada, que é mais sensível ao manejo do solo que o carbono orgânico total (COT) (Bayer et al., 2004).

Sistemas de preparo ou cultivo que associam o plantio direto ao uso de forrageiras, para formação da palhada, apresentam grande potencial para mitigar a emissão de CO₂ atmosférico em regiões tropicais e subtropicais (Nicoloso et al., 2008). A manutenção dos resíduos culturais na superfície, deixados por sistemas que contemplam o não revolvimento do solo, proporciona decomposição gradual e acúmulo do material orgânico no perfil do solo (Franzluebbers et al., 2007). A associação desse material com a fração mineral do solo favorece o aumento dos estoques de C no solo (Salton et al., 2008). No entanto, a retenção do carbono no solo depende das condições climáticas, do tipo e da mineralogia do solo (Madari et al., 2005), da quantidade e manejo dos resíduos culturais depositados (Lovato et al., 2004), do manejo da fertilidade (adubação e calagem) (Nolla & Anghinoni, 2006) e das culturas envolvidas no sistema de rotação (Santos et al., 2009).

No cerrado do estado do Piauí, o plantio direto em rotação com grãos e pastagens é uma alternativa promissora para aumentar, em médio e longo prazo, os estoques de C no solo. No entanto, são praticamente inexistentes, para região de estudo, trabalhos que associem esses estoques e frações de carbono a sistemas de manejo.

O objetivo deste trabalho foi determinar os efeitos de sistemas de manejo do solo sobre os estoques e as frações de carbono orgânico de um Latossolo Amarelo, no cerrado do Piauí.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado na Fazenda São Marcos, no Município de Bom Jesus (9°9'59"S e 45°6'43"W, a 481 m de altitude), no cerrado da região da Serra do Quilombo, no sudoeste piauiense. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, quente e semiúmido. A temperatura média anual é de 27°C, com precipitação pluvial média anual de 1.000 mm e estação chuvosa de outubro a abril, em que janeiro, fevereiro e março é o trimestre mais chuvoso, com ocorrência de veranicos. O solo é classificado como Latossolo Amarelo distrófico, com textura franco-argilo-arenosa (Santos et al., 2006), para as camadas de 0,00–0,05 m, 0,05–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,40 m, com média de: 451,88 g kg⁻¹, areia grossa; 190,55 g kg⁻¹, areia fina; 68,75 g kg⁻¹, silte; e 288,82 g kg⁻¹, argila.

Foram avaliados quatro sistemas de manejo do solo, além de uma área de transição entre as fitofisionomias de campo cerrado e cerradão, denominada de cerrado nativo (CN) e usada como referência (Tabela 1). Foram escolhidos talhões, a cada 2 km. Esses talhões estavam submetidos aos seguintes sistemas de manejo: plantio convencional por três anos (PC3) após o desmate da área, preparo do solo com grade pesada, intermediária e niveladora, com cultivo de arroz (dois primeiros anos) e soja, após correção com 2 Mg ha⁻¹ de calcário e 300 kg ha⁻¹ de gesso agrícola e adubação de acordo com a necessidade das culturas. Plantio direto por três (PD3) e cinco anos (PD5), após sistema convencional, tendo-se utilizado milheto para a formação da palhada, com cultivo de soja no PD3 e cultivo em rotação de soja/soja/milho/soja/soja no PD5; e plantio direto por nove anos (PD9), após seis anos de plantio convencional, em que o PD foi estabelecido por sete anos com milheto

em rotação de soja/soja/soja/milho/milho/soja/milho e, após a colheita do último cultivo do milho, utilizou-se a forrageira *Urochloa brizantha* 'MG-5', na formação da palhada para o posterior cultivo de soja.

As amostragens foram feitas em duas etapas, no ano agrícola 2009/2010, com cultivo de soja em todos os tratamentos. A primeira foi feita em janeiro de 2010 (período chuvoso), durante a fase de desenvolvimento vegetativo da soja, com a escolha aleatória de uma área de 1,5 ha dentro de cada sistema, onde foram abertas, em diagonal na área, oito minitrincheiras, com dimensões de 0,60x0,60x0,60 m, nas entrelinhas dos plantios. A amostra composta foi formada por uma amostra simples de cada minitrincheira (oito amostras simples no total). Foram retiradas cinco amostras compostas em cada profundidade avaliada (0,00–0,05 m, 0,05–0,10 m, 0,10–0,20 m e 0,20–0,40 m), no total de 20 amostras compostas por sistema. Todos os pontos de amostragem foram georreferenciados e serviram para direcionar a segunda coleta, realizada em julho de 2010 (período seco), tendo-se seguido os mesmos critérios da primeira amostragem.

As amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas, maceradas e passadas em peneira de 2 mm de malha (TFSA), para realização das seguintes análises: carbono orgânico total (COT), determinado por oxidação a quente com dicromato de potássio (Yeomans & Bremner, 1988); nitrogênio total (NT), quantificado por digestão sulfúrica e dosado por destilação Kjeldahl (Bremner, 1996). Os valores de COT e NT foram utilizados para determinar os estoques desses elementos no solo bem como a relação C/N da MOS. Os estoques de carbono e nitrogênio foram calculados com a seguinte expressão: teor de C

ou N de $(\text{kg Mg}^{-1}) \times D_s \times z$, em que: D_s é a densidade do solo em Mg m^{-3} , determinada pelo método do anel volumétrico, em cada profundidade; e z , a espessura da camada considerada. Os estoques de carbono nos sistemas de manejo e na vegetação nativa foram usados para estimar a emissão ou sequestro de C-CO_2 (estoque de COT no sistema de manejo menos o estoque de COT na vegetação nativa dividido pelo tempo de uso do sistema). Para converter o estoque de C em CO_2 , utilizou-se o fator de conversão 3,67 (massa molar do CO_2 /massa molar do C), conforme relatado por Leite et al. (2003).

O fracionamento químico das substâncias húmicas (SH) foi realizado pela técnica da solubilidade diferencial, tendo-se separado os ácidos fúlvicos (FAF), os ácidos húmicos (FAH) e as huminas (HUM) de acordo com os conceitos de frações húmicas estabelecidos pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (Swift, 1996). A determinação de C, em cada fração húmica, foi realizada para FAF e FAH, conforme Yeomans & Bremner (1988), e para HUM, de acordo com Bataglia et al. (1983), em que as amostras de solo foram tratadas com $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$, agitadas e deixadas em repouso por 24 horas. Após esta etapa, as amostras foram centrifugadas a 5.000 g por 20 min. Este procedimento foi repetido por três vezes. O pH do extrato alcalino foi ajustado para 2,0, pela adição de H_2SO_4 , e deixado para decantar durante 18 horas. Depois de centrifugado, o material acidificado foi filtrado e o seu volume foi aferido para 50 mL com água destilada (FAF). Sobre o precipitado, foram adicionados 30 mL de $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ até a lavagem, e foi aferido o volume para 50 mL, com uso de água destilada (FAH). O material

Tabela 1. Histórico de uso e manejo de Latossolo Amarelo, na região do Cerrado do sudoeste piauiense.

Sistema de manejo ⁽¹⁾	Plantio convencional					Plantio direto				
	Período	Culturas anuais	Calcário (Mg ha^{-1})	Gesso (kg ha^{-1})	SS-KCl (kg ha^{-1})	Período	Culturas anuais	Calcário (Mg ha^{-1})	Gesso (kg ha^{-1})	MAP-KCl (kg ha^{-1})
Cerrado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plantio convencional (PC3)	2007/08 a 2009/10	A-A-S	2	300	400–180	-	-	-	-	-
Plantio direto (PD3)	2003/04 a 2005/06	A-S-S	NC	-	NC	2006/07 a 2009/10	Mt/S-Mt/S-Mt/S	2	300	180–180
Plantio direto (PD5)	1999/00 a 2003/04	A-S-S-S-S	NC	-	NC	2004/05 a 2009/10	Mt/S-Mt/S-Mi-S-S	1,3	-	180–180
Plantio direto (PD9)	1994/96 a 2000/01	A-A-S-S-S-S	NC	-	NC	2001/02 a 2009/10	Mt/S-Mt/S-Mt/S-M-M-S-M-Bb-Bb/S	1	-	180–180

⁽¹⁾PC3, plantio convencional por três anos; PD3, plantio direto por três anos; PD5, plantio direto por cinco anos; e PD9, plantio direto por nove anos. A, arroz de sequeiro; S, soja de sequeiro; Mi, milho de sequeiro; Mt, milheto, plantio após colheita de soja; Bb, *Urochloa brizantha* 'MG-5', plantio após colheita do milho; NC, correção e adubação conforme necessidade da cultura; SS, superfosfato simples; KCl, cloreto de potássio; MAP, monoamônio fosfato.

restante nos tubos de centrífuga foi considerado como a HUM. A determinação quantitativa de carbono nos extratos das FAF, FAH e HUM foi feita pela oxidação do C com dicromato de potássio, e titulação do excesso. Dos teores de cada fração das substâncias húmicas, foi calculada a relação FAH/FAF e a relação entre as frações no extrato alcalino (EA = FAF + FAH) e humina (HUM), tendo-se obtido a relação EA/HUM (Benites et al., 2003). O índice de humificação (IH), proposto por Canellas & Santos (2005), foi calculado pela fórmula $IH = [(FAH + FAF + HUM)/COT] \times 100$. Este índice permite inferir a proporção de matéria orgânica humificada em relação ao teor do COT do solo.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com o programa Assistat (Silva & Azevedo, 2009).

Resultados e Discussão

Na camada de 0,00–0,05 m, o solo do cerrado nativo apresentou o maior teor de COT, tanto no período chuvoso como no período seco (Tabela 2). Os sistemas PD3 e PC3 apresentaram os menores valores no período chuvoso. No período seco, os menores valores

foram observados no PC3. Os baixos teores de COT observados nesses sistemas na camada de 0,00–0,05 m estão relacionados ao curto período de adoção do PD3 e ao revolvimento do solo.

Nas camadas 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m, os maiores teores de COT foram observados no sistema PD5, seguido do PD9 (Tabela 2), nos dois períodos avaliados. Na última camada (0,20–0,40 m), esses dois sistemas apresentaram os maiores valores de COT na época seca; no entanto, na época chuvosa eles não diferiram dos demais sistemas. Observou-se diferença significativa nos teores de COT entre os sistemas PD3, PD5 e PD9, na camada de 0,20–0,40 m, no período seco, o que mostra que a presença de material orgânico, aliada ao não revolvimento do solo e à rotação de culturas, pode acumular C no perfil do solo.

De modo geral, independentemente da camada avaliada, os maiores valores para o NT foram observados nos sistemas PD5 e PD9, tanto no período chuvoso como no seco (Tabela 2). Na camada de 0,10–0,20 m, o sistema PC3 alcançou valores de NT semelhantes aos observados com plantio direto. Nos sistemas em que o solo é revolvido, a MOS é distribuída por toda a camada arável, o que faz com que os teores de COT em profundidades maiores possam ser semelhantes ou até superiores aos do sistema PD (Ussiri & Lal, 2009).

Tabela 2. Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) e relação C/N, em Latossolo Amarelo sob cinco sistemas de manejo, em dois períodos de coleta (chuvoso e seco) e quatro profundidades⁽¹⁾.

Sistema de manejo ⁽²⁾	0,00–0,05 m		0,05–0,10 m		0,10–0,20 m		0,20–0,40 m	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
COT (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	30,65a	21,82a	18,09b	9,99c	13,39a	7,59c	9,30a	5,77bc
Plantio convencional (PC3)	17,95c	12,04d	18,43b	12,07b	15,14a	8,35c	9,18a	4,91c
Plantio direto (PD3)	16,58c	17,58c	18,45b	13,38b	11,01b	7,56c	7,98a	7,06ab
Plantio direto (PD5)	22,03b	20,10ab	21,81a	18,79a	15,03a	10,81b	9,89a	8,73a
Plantio direto (PD9)	20,41b	18,94bc	18,68b	17,61a	15,20a	12,89a	8,80a	8,86a
NT (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	0,97b	1,07ab	0,77b	0,75c	0,61bc	0,48b	0,43ab	0,45b
Plantio convencional (PC3)	0,74c	0,86c	0,78b	1,02a	0,80a	0,70a	0,48ab	0,49b
Plantio direto (PD3)	0,95b	1,01b	0,82b	0,88b	0,52c	0,47b	0,40b	0,43b
Plantio direto (PD5)	1,11a	1,16a	0,99a	0,95ab	0,80a	0,75a	0,52a	0,61a
Plantio direto (PD9)	1,18a	1,19a	0,89a	0,99ab	0,71ab	0,71a	0,46ab	0,54ab
Relação C/N								
Cerrado nativo	31,28a	20,30a	23,48a	13,40c	21,89a	15,95ab	21,67a	12,87bc
Plantio convencional (PC3)	24,19b	14,02b	24,21a	12,10c	18,84a	11,87c	18,97a	10,02c
Plantio direto (PD3)	17,53c	17,38ab	22,48a	15,14bc	21,20a	15,81ab	20,17a	16,47a
Plantio direto (PD5)	19,68c	17,33ab	22,19a	19,81a	18,85a	14,26bc	19,02a	14,24ab
Plantio direto (PD9)	17,42c	15,93b	21,00a	17,81ab	21,36a	18,09a	19,02a	16,33a

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾PC3, plantio convencional por três anos; PD3, plantio direto por três anos; PD5, plantio direto por cinco anos; e PD9, plantio direto por nove anos.

Portanto, o revolvimento do solo pode contribuir para a adição de N ao solo em profundidade pois cerca de 95% do N está associado aos esqueletos de C da MOS (Silva & Mendonça, 2007).

Quanto à relação C/N, os maiores valores foram observados no cerrado nativo, nos períodos chuvoso e seco, na camada superficial, que atingiu $C/N > 30$ no período chuvoso (Tabela 2). Para as demais camadas, observou-se diferença significativa para a relação C/N apenas no período seco. No período sem chuva, os teores de C no solo tendem a decrescer, ao contrário dos teores de N, que podem aumentar em consequência da atividade microbiana e da rápida decomposição dos tecidos vegetais. A biomassa microbiana do solo apresenta ciclagem rápida e responde intensamente a flutuações sazonais de umidade e temperatura, ao cultivo e ao manejo de resíduos, e é mais sensível ao manejo do solo que o teor de COT (Leite et al., 2003a). As menores relações C/N foram observadas no PC3, no período seco. A ausência de cultivos de cobertura poder ter contribuído para esse resultado.

O sistema PD5 apresentou os maiores estoques de COT, exceto na camada de 0,10–0,20 m no período seco (Tabela 3), enquanto que, em geral, o sistema PC3 apresentou os menores valores, seguido pelo PD3. Os menores valores de estoque de COT no plantio convencional podem ser atribuídos ao aumento da decomposição promovido pelo revolvimento do solo e exposição da MOS protegida nos agregados. Já os baixos valores obtidos no sistema PD3 podem ser atribuídos ao pouco tempo de adoção do plantio direto. Sá et al. (2004), em experimento de longa duração, em Latossolo Vermelho no Paraná, relataram que a consolidação dos efeitos do plantio direto sobre as características do solo ocorre somente cinco após a implantação, quando se observa maior equilíbrio entre o processo de imobilização e mineralização da MOS.

Os maiores estoques de COT foram observados na camada 0,00–0,20 m (Figuras 1). O sistema PD5 acumulou a maior quantidade de COT no período chuvoso, nas camadas de 0,00–0,20 m e 0,20–0,40 m, com 53,80 e 26,50 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente. O PD9 acumulou mais C no período seco, com 44,90 e 26,75 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente para as mesmas camadas. Salton et al. (2008), na região do Mato Grosso do Sul, reportaram que a presença de gramíneas no plantio direto favorece a formação de agregados mais estáveis, e estão relacionadas ao aumento do teor de C

no solo e a maior taxa de sequestro de CO_2 . No presente trabalho, os estoques de N mantiveram-se estáveis, com os maiores valores observados no sistema PD5, em todas as camadas, e no sistema PD9 até a camada de 0,20 m (Tabela 3). O maior tempo de adoção do PD pode ter favorecido estes resultados.

Essa maior estabilidade ocasionou maiores taxas de sequestro de carbono em todo o perfil do solo, entre os períodos chuvoso e seco, e foi maior no PD5, intermediária no PD9 e menor nos sistemas PC3 e PD3 (Tabela 3). O plantio direto proporcionou maior sequestro de carbono no período seco, em todos os sistemas, e as maiores emissões foram observadas em PC3, de -4,65 e -3,66 $Mg\ ha^{-1}$ por ano, nos períodos

Tabela 3. Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) e taxas de emissão e de sequestro de carbono ($C-CO_2$), em Latossolo Amarelo sob cinco sistemas de manejo, em dois períodos de coleta (chuvoso e seco) e quatro profundidades⁽¹⁾.

Sistema de manejo ⁽²⁾	Estoque COT		Estoque NT		C-CO ₂	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
	----- (Mg ha ⁻¹) -----		----- (Mg ha ⁻¹) -----		(Mg ha ⁻¹ por ano)	
0,00–0,05 m						
Cerrado nativo	14,41ab	10,03c	0,45c	0,49c	-	-
Convencional (PC3)	10,67c	7,04d	0,44c	0,50c	-4,65	-3,66
Direto (PD3)	10,94c	11,69bc	0,62b	0,67b	-4,28	2,03
Direto (PD5)	16,08a	14,57a	0,82a	0,84a	1,17	3,33
Direto (PD9)	13,26b	12,59b	0,77a	0,79ab	-0,23	1,17
0,05–0,10 m						
Cerrado nativo	10,67c	6,04c	0,45c	0,45b	-	-
Convencional (PC3)	11,72bc	7,30c	0,49bc	0,61a	1,35	1,54
Direto (PD3)	12,74b	9,37b	0,57bc	0,61a	2,81	4,07
Direto (PD5)	15,92a	13,72a	0,72a	0,69a	3,89	5,64
Direto (PD9)	13,45b	12,86a	0,61ab	0,72a	1,47	3,13
0,10–0,20 m						
Cerrado nativo	18,08c	9,94c	0,83b	0,63c	-	-
Convencional (PC3)	20,59b	10,94c	1,09a	0,92b	3,06	1,22
Direto (PD3)	16,29c	11,34c	0,76b	0,71c	-2,20	1,71
Direto (PD5)	21,95ab	15,57b	1,17a	1,09a	2,86	4,13
Direto (PD9)	22,65a	19,47a	1,06a	1,07a	2,11	4,37
0,20–0,40 m						
Cerrado nativo	25,68b	16,17c	1,19cd	1,26c	-	-
Convencional (PC3)	24,79bc	13,18d	1,31bc	1,31c	-1,20	-3,66
Direto (PD3)	23,48c	21,17b	1,16d	1,29c	-2,69	6,12
Direto (PD5)	29,06a	26,02a	1,53a	1,83a	2,44	7,23
Direto (PD9)	26,22b	26,75a	1,38b	1,64b	0,38	4,85

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. PC3, plantio convencional por três anos; PD3, plantio direto por três anos; PD5, plantio direto por cinco anos; PD9, plantio direto por nove anos; valores positivos indicam sequestro e valores negativos indicam emissão de carbono.

chuvoso e seco, respectivamente, na camada de 0,00–0,05 m. Essa mesma emissão foi observada na camada de 0,20–0,40 m. Os teores de COT nas frações FAF e FAH variaram entre os sistemas, nas diferentes profundidades e períodos, com valores superiores observados na fração FAH (Tabela 4). Houve diferença significativa entre os sistemas PD5 e PD9 quanto à FAF até a camada de 0,20–0,40 m, no período chuvoso, e entre cerrado, PC3 e PD5 até a camada de 0,10–0,20 m, no período seco. Na camada superficial de 0,00–0,05 m, o cerrado nativo manteve valor superior para FAH e, entre os sistemas, o PD5 e o PD9 mantiveram FAH superior somente no período seco. Nas demais camadas, os sistemas sob plantio direto obtiveram maiores teores para FAH até a camada de 0,10–0,20 m, no período chuvoso. Loss et al. (2006), em estudo feito em Latossolo Amarelo sob diferentes coberturas vegetais, observaram maiores valores para FAF e FAH na área com floresta, à profundidade de até 0,10 m, e também observaram baixos valores para FAF e FAH em profundidade, com maior presença de FAF até 0,70 m, tanto nos sistemas de cultivo como no solo com floresta. O maior conteúdo de FAF em comparação à FAH, observado em profundidade, deve-se à maior solubilidade desta fração sob diferentes condições de pH (Martins et al., 2009); porém, os maiores valores da FAH em comparação à FAF são consequência da intensa humificação e da rápida mineralização do material orgânico depositado no solo (Cunha et al., 2007).

A fração HUM foi predominante, com maior teor ($17,60 \text{ g kg}^{-1}$) observado na camada superficial de 0,00–0,05 m, no cerrado, resultado associado à maior quantidade de COT nesse tratamento (Tabela 4). Os sistemas PD5 e PD9 em geral apresentaram maiores teores de FAF e FAH, exceto na camada de 0,20–0,40 m, no período chuvoso. Os maiores teores de HUM e os maiores índices de humificação foram observados no PC3 (acima de 90%), independentemente dos sistemas e das profundidades, no período seco (Figura 2 B).

Quanto à relação FAH/FAF, os maiores valores foram observados na camada superficial 0,00–0,05 m, para o cerrado, PC3 e PD3, no período chuvoso, e para o cerrado, PD5 e PD9, no período seco (Tabela 4). Na camada de 0,05–0,10 m, no período chuvoso, destacou-se o PC3, que foi exceção no período seco. O cerrado nativo e o PC3 obtiveram os maiores valores, até a camada de 0,10–0,20 m, no período chuvoso. A relação das frações FAH e FAF no extrato alcalino ($EA = FAH/FAF$) e indica o grau de conversão do carbono orgânico insolúvel do solo a frações solúveis. Em geral, os valores de EA são maiores nos solos arenosos, em razão da perda seletiva da fração mais solúvel (Martins et al., 2009). A relação EA/HUM foi significativamente superior no sistema PD5, em todos os períodos e profundidades avaliados, exceto na camada de 0,20–0,40 m no período seco; essa relação também foi satisfatória no PD9, o que pode indicar maior iluviação do C no perfil do solo para estes sistemas. Solos sob vegetação nativa de

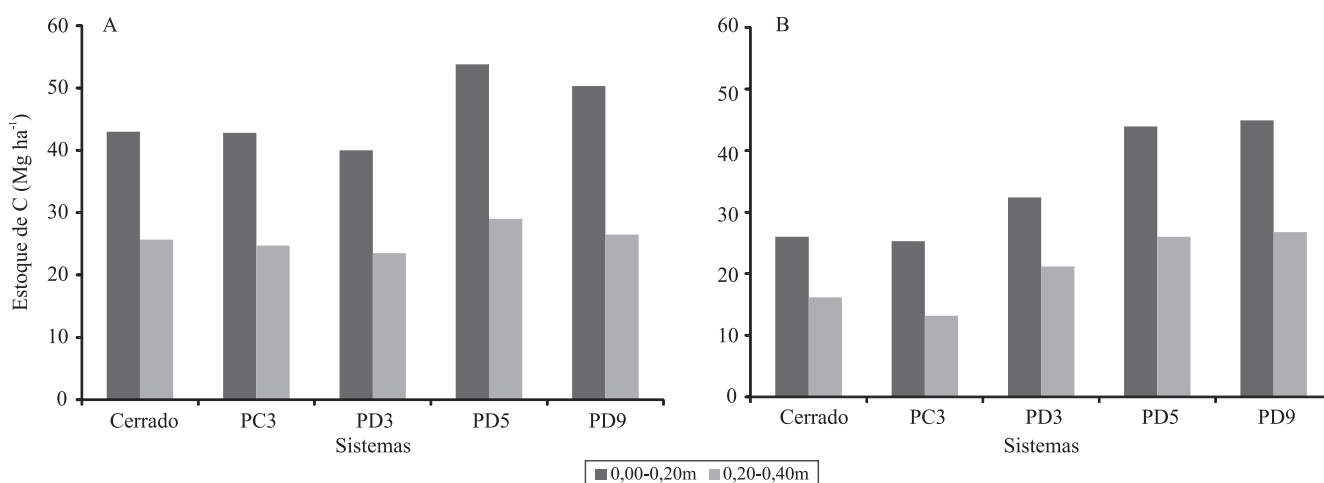


Figura 1. Estoques de carbono orgânico total (COT) de um Latossolo Amarelo sob cinco sistemas de manejo, em quatro profundidades e dois períodos de coleta: A, período chuvoso; e B, período seco. PC3, plantio convencional por três anos; PD3, PD5 e PD9, plantio direto por três, cinco e nove anos, respectivamente.

Tabela 4. Teores das frações de ácidos fúlvicos (FAF), frações de ácidos húmicos (FAH), frações huminas (HUM), relação entre ácidos húmicos e fúlvicos em extrato alcalino (EA=FAH/FAF) e relação entre EA e humina (EA/HUM), em Latossolo Amarelo sob cinco sistemas de manejo, em dois períodos de coleta (chuvoso e seco) e quatro profundidades⁽¹⁾.

Sistema de manejo ⁽²⁾	0,00–0,05 m		0,05–0,10 m		0,10–0,20 m		0,20–0,40 m	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
FAF (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	1,36bc	2,32a	0,68bc	1,13b	0,67cd	1,15ab	1,07a	0,97a
Plantio convencional (PC3)	0,43d	1,57b	0,46c	1,87a	0,38d	1,57a	0,33c	0,58a
Plantio direto (PD3)	0,95c	1,73b	1,04b	1,23b	0,91bc	0,81c	0,55bc	0,79a
Plantio direto (PD5)	1,70ab	1,83b	1,80a	1,46ab	1,44a	1,38ab	0,98ab	0,55a
Plantio direto (PD9)	2,05a	1,58b	1,85a	1,30b	1,38ab	0,91bc	0,95ab	0,56a
FAH (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	7,38a	5,27a	3,03b	2,25b	0,79b	1,54a	0,37a	1,82a
Plantio convencional (PC3)	2,16c	2,58b	2,82b	2,81ab	0,78b	1,90a	0,21a	0,99a
Plantio direto (PD3)	4,02b	2,81b	3,60ab	2,79ab	1,42ab	1,42a	0,09a	0,92a
Plantio direto (PD5)	4,54b	5,33a	4,64a	3,59ab	2,44a	1,82a	0,33a	1,04a
Plantio direto (PD9)	4,46b	4,38a	3,73ab	3,74a	2,28a	1,57a	0,35a	0,89a
FHUM (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	17,60a	11,16a	10,83a	5,44b	8,06a	3,99b	5,25a	2,62b
Plantio convencional (PC3)	4,04d	6,84c	4,95d	6,62ab	4,98c	4,43b	4,96a	2,71ab
Plantio direto (PD3)	7,73c	7,91bc	6,40cd	8,50a	5,36bc	4,44b	3,46a	4,32ab
Plantio direto (PD5)	10,28b	9,97a	9,64ab	7,87a	7,19ab	5,46ab	3,96a	4,56a
Plantio direto (PD9)	8,17c	9,37ab	7,72bc	7,78a	7,57a	6,62a	4,93a	4,34ab
FAH/FAF (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	5,36a	2,28ab	4,84b	2,04ab	1,97a	1,32a	0,34a	1,93a
Plantio convencional (PC3)	5,33a	1,72b	6,26a	1,49b	2,01a	1,20a	0,88a	1,74a
Plantio direto (PD3)	4,34a	1,61b	3,50bc	2,30ab	1,71b	1,76a	0,47a	1,15a
Plantio direto (PD5)	2,70b	3,08a	2,57cd	2,56ab	1,72b	1,32a	0,33a	1,92a
Plantio direto (PD9)	2,17b	2,80ab	2,03cd	2,88a	1,67b	1,88a	0,34a	1,60a
EA/FHUM (g kg ⁻¹)								
Cerrado nativo	1,76bc	2,79a	0,96c	1,54b	0,77cd	1,55ab	1,15a	1,78a
Plantio convencional (PC3)	1,03d	1,96b	1,10c	2,31a	0,54d	2,00a	0,37b	0,94b
Plantio direto (PD3)	1,48cd	2,10b	1,65b	1,56b	1,19bc	1,13c	0,57ab	1,01b
Plantio direto (PD5)	2,15ab	2,36ab	2,27a	1,91ab	1,78a	1,71ab	1,07a	0,78b
Plantio direto (PD9)	2,61a	2,05b	2,35a	1,78ab	1,69ab	1,15bc	1,02a	0,76b

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾PC3, plantio convencional por três anos; PD3, PD5 e PD9, plantio direto por três, cinco e nove anos, respectivamente.

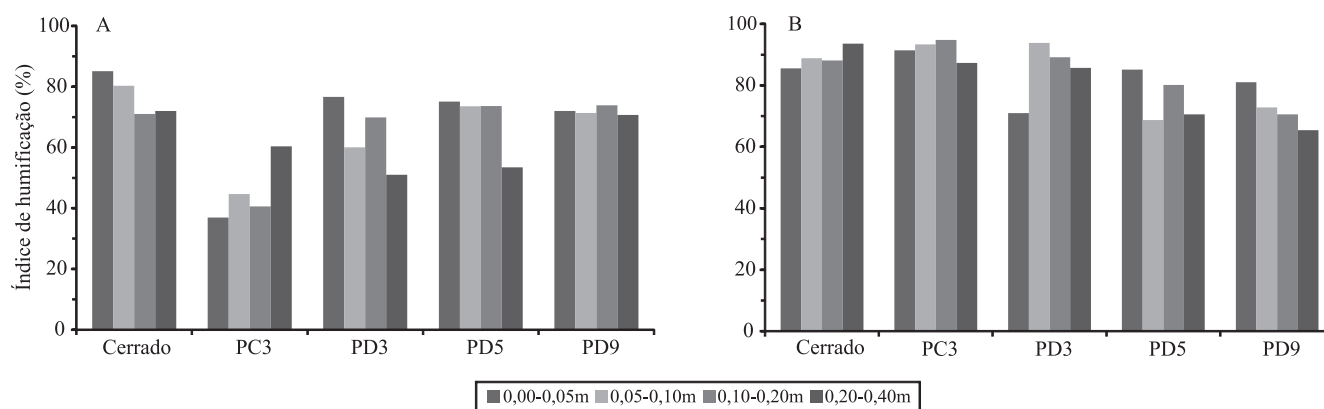


Figura 2. Índice de humificação de um Latossolo Amarelo sob cinco diferentes sistemas de manejo, em duas profundidades e dois períodos de coleta: A, período chuvoso; e B, período seco. PC3, plantio convencional por três anos; PD3, PD5 e PD9, plantio direto por três, cinco e nove anos, respectivamente.

cerrado e pastagens tendem a ter menor relação entre o extrato alcalino e a humina, em razão da composição dos resíduos vegetais pobres em lignina, precursor químico da humina, ácidos húmicos e outros compostos recalcitrantes (Silva & Mendonça, 2007; Martins et al., 2009).

O índice de humificação variou entre os sistemas, a diferentes profundidades (Figuras 2 A e B), e o menor valor (36,96%) foi observado na camada de 0,00–0,05 m, no período chuvoso, e o maior (94,78%) na camada de 0,10–0,20 m, no período seco, ambos no PC3. De acordo com Silva & Mendonça (2007), as substâncias húmicas contribuem com cerca de 85 a 90% dos solos minerais. O baixo índice de humificação (<60%) observado no PC3, no período chuvoso, até 0,20 m, pode ser atribuído ao processo de aração e gradagem, ocorrido 27 dias antes do plantio. Entretanto, os sistemas sob PD obtiveram menores taxas de humificação da MOS, com os melhores resultados observados no PD9, no período seco (Figura 2 B).

Conclusões

1. Os sistemas de plantio direto acumulam maiores teores de carbono orgânico total e nitrogênio total no perfil do solo após cinco anos de implantação, em razão da maior estabilidade das frações húmicas e menor grau de mineralização da matéria orgânica do solo.

2. No sistema plantio direto, a adição da matéria orgânica do solo influencia positivamente, após cinco anos, a relação carbono/nitrogênio, as substâncias húmicas solúveis, o extrato alcalino, e proporciona menor índice de humificação.

3. O plantio direto, associado ao uso de forrageira, tem capacidade de estocar e sequestrar carbono em profundidade e pode ser considerado como alternativa sustentável para a mitigação das emissões de CO₂.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas; ao CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (Fapepi), por auxílio financeiro; e à família Maggioni, pela cessão da área experimental.

Referências

- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLAM, P.R.; GALLO, J.R. **Método de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (IAC. Boletim técnico, 78).
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.677-683, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000700009.
- BENITES, V.M.; MADARI, B.; MACHADO, P.L.O.A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 7p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 16).
- BREMMER, J.M. Nitrogen total. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.1085-1121.
- CANELLAS, L.P.; SANTOS, G. de A. **Humusfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas**. Campos dos Goytacazes: UENF, 2005. 310p.
- CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; MELO, C.R. de; CERRI, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.34, p.277-290, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000200001.
- CUNHA, T.J.F.; MADARI, B.E.; BENITES, V. de M.; CANELLAS, L.P.; NOVOTNY, E.H.; MOUTTA, R. de O.; TROMPOWSKY, P.M.; SANTOS, G. de A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica**, v.37, p.91-98, 2007. DOI: 10.1590/S0044-59672007000100010.
- FRANZLUEBBERS, A.J.; SCHOMBERG, H.H.; ENDALE, D.M. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. **Soil and Tillage Research**, v.96, p.303-315, 2007. DOI: 10.1016/j.still.2007.07.001.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, P.L.O.A.; MATOS, E.S. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic forest zone, South-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, v.41, p.717-730, 2003. DOI: 10.1071/SR02037.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A.; GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.821-832, 2003a. DOI: 10.1590/S0100-06832003000500006.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; BRITO, R.J. de. Distribuição das substâncias húmicas em solos de tabuleiros sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Universidade Rural**, v.26, p.68-77, 2006.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adições de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques

- no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.175-187, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000100017.
- MADARI, B.; MACHADO, P.L.O.A.; TORRES, E.; ANDRADE, A.G.; VALENCIA, L.I.O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.80, p.185-200, 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.006.
- MARTINS, E. de L.; CORINGA, J. do E.S.; WEBER, O.L. dos S. Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico – LVAd sob diferentes agrossistemas. **Acta Amazonica**, v.39, p.655-660, 2009. DOI: 10.1590/S0044-59672009000300021.
- NICOLOSO, R. da S.; LOVATO, T.; CARNEIRO, T.J.; BAYER, C.; LANZANOVA, M.C. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2425-2433, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000600020.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.475-483, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000300009.
- PASSOS, R.R.; RUIZ, H.A.; MENDONÇA, E. de S.; CANTARUTTI, R.B.; SOUZA, A.P. de. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1119-1129, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000500027.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E.; BUCKENER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M.F.M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE FILHO, S.P. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, v.84, p.45-61, 2004.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRICIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100002.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SANTOS, H.P. dos; FONTANELI, R.S.; SPERA, S.T.; TOMM, G.O. Efeito de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP) sobre a fertilidade do solo em plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.31, p.719-727, 2009. DOI: 10.4025/actasciagron.v31i4.925.
- SILVA, F. de A.S. e; AZEVEDO, C.A.V. de. Principal components analysis in the software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7., 2009, Reno. **Proceedings**. Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.
- SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. de C.; FEIGEL, B.J.; VENZKE FILHO, S. de P.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). II - Emissões de CO₂ e N₂O. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1023-1029, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400026.
- SWIFT, R.S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMNER, M.E. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America; American Society of Agronomy, 1996. p.1011-1020. (Soil Science Society of America Book Series, 5).
- USSIRI, D.A.N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an Alfisol in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v.104, p.39-47, 2009. DOI: 10.1016/j.still.2008.11.008.
- WOLF, D.C.; WAGNER, G.H. Carbon transformation and soil organic matter formations. In: SYLVIA, D.M.; HARTEL, P.G.; FUHRMANN, J.J.; ZUBERER, D.A. **Principles and applications of soil microbiology**. 2nd ed. New Jersey: Pearson Education, 2005. p.285-332.
- YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1988. DOI: 10.1080/00103628809368027.
- ZHONGKUI, L.; WANG, E.; SUN, O.J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. **Geoderma**, v.155, p.211-223, 2010. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.12.012.

Recebido em 20 de fevereiro de 2012 e aprovado em 15 de fevereiro de 2013