

CARBONO TOTAL E $\delta^{13}\text{C}$ EM AGREGADOS DO SOLO SOB VEGETAÇÃO NATIVA E PASTAGEM NO BIOMA CERRADO⁽¹⁾

Ciniro Costa Junior⁽²⁾, Marisa de Cássia Piccolo⁽³⁾, Marcos Siqueira Neto⁽⁴⁾, Plínio Barbosa de Camargo⁽⁵⁾, Carlos Clemente Cerri⁽⁶⁾ & Martial Bernoux⁽⁷⁾

RESUMO

Diferentes sistemas de uso e manejo alteram o teor de carbono no solo (C), porém diminuições no C do solo têm sido reportadas quando áreas de Cerrado nativo são convertidas em pastagem. Disso resulta a necessidade da realização de pesquisas em diferentes sistemas e condições edafoclimáticas, a fim de elucidar as tendências encontradas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a agregação, os teores de C e a abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ do solo em uma área cultivada há nove anos sob lavoura seguida de 20 anos sob pastagem, a qual atualmente apresenta sinais de degradação (PA), comparando-a a uma vegetação nativa no bioma Cerrado (CE) que ocorre em área adjacente. As áreas de estudo estão localizadas no município de Rio Verde (GO), em solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de textura argilosa. Em amostras de solo coletadas nas camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm de profundidade, foram determinados a distribuição de agregados estáveis em água (micro, meso e macroagregados), o diâmetro médio aritmético (DMA) e geométrico (DMG), os teores de C total e de $\delta^{13}\text{C}$, o tempo de residência média do C (TRM) e a fração da matéria orgânica leve livre (FLL). Os resultados indicaram que o uso sob lavoura seguido de pastagem reduziu em 21 % o estoque de C original, possivelmente devido ao menor aporte de material na FLL. O solo apresentou elevada agregação e não houve diferenças significativas entre as áreas avaliadas. No entanto, os teores de C nos macroagregados foram menores na PA em relação ao CE, enquanto nos microagregados não houve diferença entre os sistemas de uso, sugerindo, respectivamente, maior e menor sensibilidade ao manejo e menor e maior proteção do C por essas classes de agregados. Os valores de TRM e as análises isotópicas reforçaram esses resultados, mostrando, ainda, substituição de 83 % do C original durante os 29 anos de cultivo. O constante aporte

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor. Recebido para publicação em 29 de julho de 2010 e aprovado em 13 de abril de 2011.

⁽²⁾ Doutorando do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo – CENA/USP. CP 96, CEP 13400-970 Piracicaba (SP). E-mail: cinirojr@hotmail.com

⁽³⁾ Pesquisadora do Laboratório de Ciclagem de Nutrientes do CENA/USP. E-mail: mpiccolo@cena.usp.br

⁽⁴⁾ Pós-Doutorando do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA/USP. E-mail: msiqueir@gmail.com

⁽⁵⁾ Pesquisador do Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP. E-mail: pcamargo@cena.usp.br

⁽⁶⁾ Pesquisador do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA/USP. E-mail: cerri@cena.usp.br

⁽⁷⁾ Pesquisador do Institut de Recherche pour le Développement-IRD, Montpellier, França. E-mail: martial.bernoux@ird.fr

de resíduos vegetais, assim como a manutenção do C no interior dos macro e mesoagregados, são importantes fatores para que ocorra o acúmulo de C nesse tipo de solo.

Termos de indexação: agregação do solo, matéria orgânica do solo, composição isotópica.

SUMMARY: TOTAL CARBON AND $\delta^{13}\text{C}$ IN SOIL AGGREGATION UNDER NATIVE VEGETATION AND PASTURE IN THE BRAZILIAN CERRADO BIOME

Different management systems affect soil C, however decreases in the C stocks of native Cerrado areas converted to pasture have been reported. This calls for further research on this trend, under different management systems and soil-climatic conditions. The objective of this study was to evaluate soil aggregation, C levels and natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ in a 20 year-old pasture (PA), following nine years of cropping, with signs of degradation compared to soil under native Cerrado (CE) in an adjacent area. The studied areas are located in Rio Verde, state of Goiás (Brazil), with soil classified as clayey Oxisol. In samples from the layers 0–5, 5–10 and 10–20 cm the distribution of water stable aggregates (microaggregates, mesoaggregates and macroaggregates), mean weight diameter (MWD) and mean geometric diameter (DMG), C contents and $\delta^{13}\text{C}$, the mean residence time of C (TRM), and the free light fraction of organic matter (FLL) were determined. Results indicated that grazing after cropping reduced the original C stock by 21 %, possibly due to a lower FLL input. Soil showed high aggregation and no significant difference between the assessed areas was observed. However, C levels in macroaggregates were lower in PA compared to CE, while in microaggregates C was not affected, suggesting, respectively, greater and lower sensitivity to management and lower and greater protection of C by these aggregate classes. Values of TRM and isotopic abundance reinforced these findings, showing a replacement of 83 % of the original C after crop and pasture cultivation for 29 years. A constant application of plant residues to the soil surface as well as C maintenance within macro and mesoaggregates are essential factors to ensure C accumulation in this soil type.

Index terms: Soil aggregation; soil organic matter; isotopic composition.

INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro e ocupa aproximadamente 25 % do território nacional, sendo superado em área apenas pela Floresta Amazônica; é considerado uma das últimas fronteiras agrícolas do planeta (Borlaug, 2002). Atualmente, mais da metade dos dois milhões de km² originais do Cerrado já foi convertida em outros usos da terra, dos quais as pastagens plantadas, compostas basicamente por espécies gramíneas de origem africana, ocupam aproximadamente 500.000 km² (Klink & Machado, 2005).

Os solos do Cerrado são amplamente dependentes da matéria orgânica do solo (MOS), frequentemente representada pela quantidade de carbono (C), para a manutenção de sua fertilidade, uma vez que ela apresenta um potencial de cargas negativas dependentes de pH superior à fração mineral do solo, rica em óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Lopes, 1983).

Diversos autores têm reportado que a conversão do Cerrado para uso com lavouras e pastagens conduz à diminuição da quantidade de C do solo (Silva et al., 2004; Maia et al., 2009; Siqueira Neto et al., 2009).

Por outro lado, uma variedade de opções de sistemas de manejo (como irrigação, fertilização e introdução de leguminosas) tem mostrado favorecer a manutenção ou até mesmo o aumento do C nesses solos (Silva et al., 2004; Salton et al., 2008).

Devido à complexidade da dinâmica do C no solo, torna-se difícil estabelecer padrões quanto à mudança da vegetação nativa para outros usos do solo, como a pastagem. Maia et al. (2009) afirmaram que fatores como variabilidade espacial, tipos de clima e solo, além do histórico de manejo, são apontados como os principais responsáveis por essas diferenças. Esses autores mostraram ainda a existência de uma lacuna desse tipo de pesquisa no bioma Cerrado quando comparado ao bioma Amazônico e, por isso, concluíram que novas pesquisas necessitam ser conduzidas nesse bioma para ampliar o conhecimento sobre a dinâmica do C em pastagens nas regiões tropicais.

Uma das maneiras mais citadas de verificar o impacto da mudança de uso da terra na dinâmica do C é o estudo da agregação do solo. Os agregados do solo protegem fisicamente o C da mineralização acentuada promovida pela alteração do uso ou

intensificação do preparo, favorecendo sua manutenção ou acúmulo (Six et al., 2004).

O tipo de vegetação é um dos fatores considerados importantes na formação dos agregados, principalmente pela ação mecânica das raízes ou pela excreção de substâncias com ação cimentante e, indiretamente, fornecendo nutrientes à fauna do solo (Bronick & Lal, 2005). A vegetação também interfere na estruturação dos solos: as gramíneas, por apresentarem sistema radicular fasciculado, são mais eficientes em aumentar e manter a estabilidade de agregados que as espécies vegetais com sistema radicular pivotante, mesmo em sistemas de cultivos anuais com revolvimento do solo, onde o sistema radicular é renovado constantemente (Salton et al., 2008).

Salton et al. (2008) destacaram que a formação e manutenção da agregação do solo verificadas em condição de vegetação natural de Cerrado foram semelhantes às observadas sob rotação lavoura-pastagem em ciclos de dois anos, ou mesmo com pastagem permanente com gramínea, devido à elevada influência do sistema radicular, porém apenas os macroagregados tiveram relação com os teores de C no solo.

Entretanto, deve-se considerar que, em solos sob clima tropical, o C pode ter papel secundário na formação dos agregados (Denef & Six, 2005), ocorrendo nessa situação, principalmente, a ligação mineral-mineral por meio de interações eletrostáticas entre óxidos (principalmente de Fe e Al) (Fabrizzi et al., 2009). Nesse caso, existe a possibilidade de o C do solo assumir dinâmica diferenciada, que não seja totalmente associada à agregação do solo.

A técnica da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ nos agregados do solo pode ser útil para examinar mais especificamente as mudanças do C na conversão do Cerrado para uso sob pastagem (Jastrow et al., 1996). Diferenças na assinatura isotópica natural entre plantas de ciclo fotossintético C3 ($\approx -27\text{‰}$) e C4 ($\approx -11\text{‰}$) (Smith & Epstein, 1971) permitem acessar a dinâmica do C onde pastagens (plantas C4) passam a ocupar solos em que o C foi formado a partir da vegetação nativa do Cerrado – que possui fitosionomia arbórea (com predomínio de plantas C3) (Roscoe et al., 2001).

Com o propósito de aumentar o conhecimento sobre o impacto da conversão do Cerrado para uso sob pastagem na dinâmica do C do solo, a presente pesquisa avaliou a agregação, os teores de C e as abundâncias naturais de $\delta^{13}\text{C}$ do solo sob pastagem e vegetação nativa no bioma Cerrado.

MATERIAL & MÉTODOS

As áreas de estudo estão localizadas no município de Rio Verde, Estado de Goiás, sob clima do tipo Aw

de acordo com a classificação de Köppen (tropical, com chuvas concentradas no verão e período seco bem definido durante a estação de inverno). A média anual da precipitação é de 1.500 mm, e a da temperatura, de 23 °C. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (Embrapa, 2006), cuja vegetação original predominantemente é arbórea, com fitofisionomia de Cerradão e mata seca subcaducifolia (Eiten, 1972).

Para seleção das áreas de estudo, foi considerada a homogeneidade nas características do solo (material de origem, textura e classe), utilizando inicialmente a base de dados do projeto Radam Brasil (Brasil, 1981). Para melhor caracterização, em cada área foi feita a descrição do perfil pedológico até 1,5 m de profundidade. As características verificadas foram cor (Munsell, 1954), teores de argila, silte e areia (Embrapa, 1997), densidade do solo (Blake & Hartge, 1986) e a composição mineralógica que foi determinada em um difrator de raios X Phillips PW-1830.

No quadro 1 estão apresentados os resultados das principais características dos horizontes diagnósticos A e Bw₁ em perfis do solo. Mais detalhes sobre o trabalho de seleção das áreas podem ser obtidos em Siqueira Neto et al. (2010).

Quadro 1. Características dos horizontes diagnósticos A e Bw₁ em perfis de Latossolo Vermelho distrófico nas áreas estudadas no município de Rio Verde (GO)

Característica	Cerradão	Pastagem
Horizonte A		
Cor (úmida) ⁽¹⁾	2,5 YR 3/3	2,5 YR 3/3
Profundidade (cm)	0–6	0–17
Densidade (g cm ⁻³)	0,87	1,23
Areia (g kg ⁻¹) ⁽²⁾	414	274
Silte (g kg ⁻¹) ⁽³⁾	45	45
Argila (g kg ⁻¹) ⁽³⁾	541	681
Horizonte Bw ₁		
Cor (úmida)	2,5 YR 3/6	2,5 YR 3/6
Profundidade (cm)	36 – 79	36 – 76
Densidade (g cm ⁻³)	1,23	1,21
Areia (g kg ⁻¹)	313	303
Silte (g kg ⁻¹)	69	56
Argila (g kg ⁻¹)	628	641
Mineralogia ⁽⁴⁾		
Quartzo ⁽⁵⁾	+++	+++
Caulinita	++++	++++
Gibbsita	+++	+++
Hematita	++	++
Anatásio	+	+

⁽¹⁾ Cor úmida (Carta de Munsell, 1954). ⁽²⁾ Teores de areia determinados por peneiramento úmido (Embrapa, 1979). ⁽³⁾ Teores de silte e argila determinados pelo método do densímetro após dispersão em hexametáfosfato e digestão da matéria orgânica em H₂O₂. ⁽⁴⁾ Composição mineralógica determinada por difração de raios X. ⁽⁵⁾ + = Intensidade do sinal e quantidade de picos apresentada no espectro das amostras.

Portanto, pode-se assumir que o meio atuou de forma uniforme nas unidades experimentais, de modo que os atributos do solo são facilmente identificáveis como homogêneos para receber os tratamentos. Dessa forma, o delineamento experimental empregado pode ser considerado como inteiramente casualizado (DIC), constando de duas áreas (tratamentos) com seis pseudorreplicações em diferentes sítios topográficos. Isso se aplica, pois o DIC é considerado o delineamento mais simples dentro da estatística. Nesse delineamento, as unidades experimentais se distribuem ao acaso, e o número de repetições pode ser igual ou diferente. Para sua aplicação, há necessidade apenas de que o meio atue de modo uniforme em todas as unidades experimentais e que estas sejam facilmente identificadas para receber o tratamento (Hurlbert, 1984).

Foi avaliada uma área sob vegetação nativa original de Cerradão (CE), situada nas coordenadas de 17° 39' 07" de latitude sul e 51° 02' 49" de longitude oeste, caracterizada por um estrato arbóreo semidecidual com altura entre 15 e 25 m, e uma área adjacente sob pastagem (PA), situada nas coordenadas de 17° 38' 58" de latitude sul e 51° 03' 57" de longitude oeste, cultivada com braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf) nos últimos 20 anos. Antes da semeadura da pastagem, a área PA foi cultivada com arroz (*Oryza sativa* L.) por dois anos, seguidos por sete anos de milho (*Zea mays* L.) em sistema de preparo convencional (SPC), totalizando 29 anos de cultivo. Atualmente a pastagem apresenta sinais de degradação física da gramínea, com baixa produtividade e pastejo excessivo pelos animais.

A caracterização físico-química do solo nas áreas foi realizada no início do estudo, em fevereiro de 2007 (Quadro 2). O pH foi determinado em água, usando a relação solo:solução de 1,0:2,5. Os teores de argila foram determinados pelo método do densímetro, após a dispersão da argila com hexametáfosfato e a digestão do material orgânico com H₂O₂ (Embrapa, 1997). A densidade do solo foi determinada em amostras indeformadas, coletadas com auxílio de anéis de aço inoxidável com 5,3 de altura e 5,0 cm de diâmetro interno (aproximadamente 104,00 cm³), utilizando-se método do anel volumétrico descrito por Blake & Hartge (1986). A capacidade de troca de cátions potencial do solo (T) e a saturação por bases (V %) foram calculadas a partir das determinações dos teores

de cátions trocáveis (Raij & Quaggio, 1983) e da acidez potencial do solo (Embrapa, 1997).

A coleta das amostras para caracterização dos agregados consistiu na retirada de monólitos de solo nas camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm. A separação dos agregados em classes de tamanho foi realizada com a desagregação e peneiramento em meio úmido, utilizando-se o método descrito por Kemper & Chepil (1965) com as alterações propostas por Silva & Mielniczuk (1997). Dessa forma, foram obtidas três classes de agregados, denominadas: macroagregados (diâmetro > 2,00 mm), mesoagregados (diâmetro entre 2,00 e 0,25 mm) e microagregados (diâmetro entre 0,25 e 0,053 mm). Os valores obtidos no peneiramento foram usados para cálculo do diâmetro médio aritmético dos agregados (DMA), por meio da equação 1:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi \times i) \quad (1)$$

em que wi é a proporção da massa de cada classe em relação à massa total; e xi , o diâmetro médio da respectiva classe, expresso em mm.

O diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG), por sua vez, foi calculado por meio da equação 2:

$$DMP = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n wi \log xi}{\sum_{i=1}^n wi} \right] \quad (2)$$

em que wi é o peso dos agregados (g) em cada classe de agregados xi .

Para as determinações dos teores de C total e isotópico ($\delta^{13}C$), amostras do solo como um todo e de cada uma das classes de agregados obtidas foram secas ao ar, homogeneizadas, moídas, passadas em peneiras de 0,10 mm e analisadas por combustão a seco por analisador elementar acoplado a um espectrômetro de massas Carlo Erba® Delta Plus, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (Piracicaba – SP). O C total foi determinado por combustão seca pelo equipamento LECO® CN-2000, em cada uma das classes de agregados separadas. Os estoques de C foram calculados multiplicando-se os valores do teor de C e densidade do solo para cada camada de solo, que foram então somadas para constituir o valor da camada de 0–20 cm de solo.

Quadro 2. Atributos físico-químicos da camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado, em Rio Verde, GO

Área	Argila	Ds	pH H ₂ O	P	K	Ca	Mg	H + Al	T	V
	g kg ⁻¹	kg dm ⁻³		mg kg ⁻¹			mmol _c dm ⁻³			%
CE	541 a	1,0	4,7	6,8	1,1	1,0	1,3	79,2	82,6	4,1
PA	641	1,2	6,1	8,3	0,9	11,2	11,0	30,0	55,2	44,7

CE: cerradão; PA: pastagem; Ds: densidade do solo; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H + Al: acidez potencial; T: capacidade de troca de cátions potencial; V %: saturação por bases.

Contudo, uma vez que as áreas amostradas apresentaram valores diferentes na densidade do solo, optou-se pela correção do estoque de C do solo pela massa de solo da área sob vegetação nativa, seguindo os cálculos de acordo com a equação 3 (Sisti et al., 2004):

$$Ec = \sum_{n-i} E + \{[Mai - (\sum_n Ma - \sum_n Mr)] Ci\} \quad (3)$$

em que Ec é o estoque corrigido de C pela massa de solo, em Mg ha^{-1} ; $\sum_{n-i} E$, o somatório dos estoques das camadas, sem a última camada amostrada, em Mg ha^{-1} ; Mai , a massa de solo da última camada de solo amostrado, em Mg ha^{-1} ; $\sum_n Ma$, o somatório da massa total de solo amostrada, em Mg ha^{-1} ; $\sum_n Mr$, o somatório da massa de solo referência; e Ci , o teor de C na última camada amostrada, em g kg^{-1} .

A participação do C introduzido pela pastagem (C_p) no estoque de C e nas frações de agregados do solo foi calculada segundo proposto por Bernoux et al. (1998) (Equação 4).

$$\delta^{13}\text{Ct} \times \text{Ct} = \delta^{13}\text{C3} \times \text{C3} + \delta^{13}\text{C4} \times \text{C4} \quad (4)$$

em que $\delta^{13}\text{Ct}$ é a composição isotópica do C do solo; Ct, o teor de C do solo; $\delta^{13}\text{C3}$, a composição isotópica das plantas C3 do local ($-27,84 \pm 0,50 \text{‰}$); C3, o teor de C do solo proveniente das plantas C3; $\delta^{13}\text{C4}$, a composição isotópica das plantas C4 do local ($-13,52 \pm 0,07 \text{‰}$); e C4, o teor de C do solo proveniente das plantas C4.

A estimativa do tempo de residência médio (TRM) do C do solo derivado da vegetação original do Cerrado foi obtida usando um modelo de decaimento de primeira ordem proposto por Six & Jastrow (2002), segundo a equação 5.

$$\text{TRM} = \frac{-t}{\ln \text{Ct}/\text{Co}} \quad (5)$$

em que t é o tempo desde a conversão da área nativa; Ct, o conteúdo de C remanescente (estoque e agregados) da vegetação nativa no solo sob pastagem; e Co, o conteúdo de C no solo sob Cerrado.

A fração leve livre (FLL) foi obtida pelo procedimento proposto por Sohi et al. (2001). A qual foi extraída em uma solução de NaI com densidade de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$, conforme sugerido por Janzen et al. (1992). Para isso, foram colocados 5 g de solo em frasco de centrífuga de 50 mL, sendo adicionados 35 mL de NaI. Os frascos foram agitados manualmente por 30 s, de maneira que as frações orgânicas menos densas ficassem na superfície da solução. A seguir, as amostras foram então centrifugadas a 18.000 rpm por 15 min, em temperatura ambiente de 18°C . A fração orgânica sobrenadante na solução (FLL) foi succionada e separada por filtração a vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm - Millipore). A FLL foi seca a 65°C , determinando-se a massa e quantificando-a.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e a comparação de médias foi realizada pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para as correlações de Pearson, foi aplicado o teste t ($p < 0,01$ e $0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Carbono total do solo (C)

Os teores de C foram maiores em superfície (0–5 cm) e decresceram com a profundidade, resultado da deposição de resíduos vegetais em superfície com posterior decomposição e deslocamento do C para as camadas mais profundas. Foram observados valores maiores no solo sob Cerradão, em relação à pastagem, nas camadas de 0–5 e 5–10 cm (Quadro 3).

Os menores teores de C sob PA resultaram em um estoque de C do solo 21 % menor em relação ao CE na camada de 0–20 cm, sugerindo que após 29 anos de uso desse solo – sendo nove com culturas anuais manejadas com cultivo convencional e 20 sob pastagem de braquiária – houve perda de aproximadamente $9,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C, ou seja, aproximadamente $0,32 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Quadro 3). Nas camadas de 0–5 e 10–20 cm sob PA essa redução foi de 16 e 10 %

Quadro 3. Teores de C total, estoque de C, carbono derivado da pastagem e tempo de residência média (TRM) da camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado, em Rio Verde, GO

Camada	C total ⁽¹⁾		Estoque de C ⁽¹⁾		C derivado da pastagem ⁽²⁾	TRM ⁽²⁾
	CE	PA	CE	PA	PA	PA
cm	g kg ⁻¹		Mg ha ⁻¹		%	Ano
0–5	38,93 ^a	21,25 ^b	14,00 ^a	11,68 ^b	87,70 ^a	8,78 ^a
5–10	19,95 ^b	18,58 ^a	9,79 ^a	10,43 ^a	84,00 ^{ab}	11,30 ^b
10–20	22,43 ^b	16,88 ^{ab}	22,55 ^a	20,37 ^b	79,32 ^b	11,92 ^b
0–20	25,93 ^a	18,40 ^b	46,34 ^{*a}	37,08 ^{*a}	82,60	10,03

⁽¹⁾ Valores seguidos de mesma letra na linha do atributo do solo avaliado não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ⁽²⁾ Valores seguidos de mesma letra na coluna do atributo avaliado não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). *: Valores corrigidos pela massa fixa de solo. CE: Cerradão; PA: pastagem.

respectivamente, em relação aos teores de C observados no CE, evidenciando maior sensibilidade da camada superficial ao uso da terra.

A conversão da vegetação nativa em pastagem (derrubada das árvores, queima do material e preparo do solo) e, principalmente, o uso e manejo subsequente são fatores que controlam a redução, o aumento ou a manutenção do C no solo (Fearnside & Barbosa, 1998; Murty et al., 2002). Estudos mostram que, para pastagens bem manejadas (com uso de corretivos, fertilização e pastejo rotacionado), os estoques de C são mantidos após a conversão da vegetação nativa (Conant et al., 2004; Silva et al., 2004; Salton et al., 2008). Por outro lado, a substituição da vegetação nativa por pastagens manejadas inadequadamente (degradadas) resultou na redução do C original do solo em diversas regiões do Cerrado e da Amazônia (Maia et al., 2009).

A diminuição do estoque de C no uso PA pode ser atribuída à baixa produtividade da gramínea, evidenciada pela menor quantidade de FLL na camada de 0–5 cm de solo em relação ao uso CE, indicando que a adição insuficiente de resíduos vegetais levou ao declínio do estoque de C no solo. Pastagens com baixa produtividade adicionam baixa quantidade de resíduos vegetais na superfície, além de comprometerem o bom desenvolvimento do sistema radicular devido à baixa produção de fotoassimilados, que são importantes fatores no processo de acúmulo de C no solo (Siqueira Neto et al., 2009).

A FLL é um dos atributos do solo mais sensíveis ao manejo do solo e, conseqüentemente, indicador do declínio da pastagem, podendo ser considerado um eficiente indicador na redução do C no solo. Oliveira et al. (2004a) também reportaram menores quantidades de resíduos vegetais no solo em pastagens degradadas sob Latossolos no bioma Cerrado.

Adicionalmente, o cultivo realizado anteriormente à introdução da pastagem (nove anos em cultivo convencional) pode ter relação com os menores teores e estoque de C observados no uso sob PA em relação ao CE (Quadro 4). O sistema convencional de preparo, devido ao revolvimento intenso do solo, expõe frações de C que permanecem oclusas nos agregados do solo, favorecendo uma elevada oxidação microbiana (Six et

al., 2000); estima-se que 0,54 Mg ha⁻¹ de C é perdido anualmente em Latossolos do bioma Cerrado manejados sob esse sistema de preparo (Metay et al., 2007).

Considerando-se a taxa de oxidação estimada por Metay et al. (2007), o Latossolo em estudo apresenta potencial de perda de aproximadamente 4,8 Mg ha⁻¹ de C no período de nove anos em que foi manejado sob cultivo convencional, anteriormente à instalação da pastagem, e 4,4 Mg ha⁻¹ de C nos 20 anos de uso sob pastagem, resultando em uma taxa média de perda de 0,22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C (Quadro 4). Esse resultado está muito próximo do valor reportado por Maia et al. (2009), de 0,28 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C, determinado em pastagens degradadas no Cerrado e na Amazônia.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo também diferiram significativamente entre as áreas, com valores mais negativos sob o uso CE (Figura 3). A assinatura isotópica aumentou significativamente em profundidade sob essa área, passando de -26 ‰ na camada de 0–5 cm para -23 ‰ na camada de 10–20 cm. Esses resultados estão de acordo com outros estudos realizados em perfis de solos sob vegetação nativa de ciclo C₃ (Volkoff & Cerri, 1987; Schwendenmann & Pendall, 2008) e podem ser atribuídos à discriminação isotópica do C feita pelos microrganismos do solo durante a decomposição da material orgânico (Balesdent & Mariotti, 1996).

Na pastagem, os valores tenderam a decrescer com a profundidade, passando de -14,5 ‰ na camada de 0–5 cm para -15,0 ‰ na camada de 10–20 cm, indicando a gradativa substituição da MOS original pela adicionada pela espécie C₄ (Figura 3). Essa substituição foi de 83 % quando considerada a camada de 0–20 cm (Quadro 5).

A porção de substituição foi mais elevada que a encontrada por outros autores em estudos realizados no bioma Cerrado (Roscoe et al., 2001) e semelhante à verificada em Latossolos e Neossolos da Amazônia (Choné et al., 1991; Trumbore et al., 1995; Neill et al., 1997) e na América Central (Schwendenmann & Pendall, 2008). Entretanto, os resultados foram consistentes quando considerado que a conversão da vegetação nativa em pastagem leva à substituição de metade ou mais do C derivado da vegetação nativa no período de 8 a 20 anos e de aproximadamente 100 % em 80 anos (Feigl et al., 1995).

Quadro 4. Diâmetro médio aritmético (DMA) e geométrico (DMG) dos agregados da camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado, em Rio Verde, GO

Tratamento	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm
CE	4,02 a ⁽¹⁾	4,06 a	4,02 a	2,69 a	2,75 a	2,72 a
PA	3,87 a	3,94 a	3,94 a	2,49 a	2,49 a	2,41 a

⁽¹⁾ Valores seguidos de mesma letra dentro de cada linha e atributo do solo estudado não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CE: Cerradão; PA: pastagem.

Quadro 5. Teores de C total e % C derivado da pastagem e tempo de residência média (TRM) do C de diferentes classes de agregados na camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado, em Rio Verde, GO

Área	C total (g kg^{-1}) ⁽¹⁾			% C derivado da pastagem ⁽¹⁾			TRM (ano) ⁽¹⁾		
	Macro ⁽²⁾	Meso	Micro	Macro	Meso	Micro	Macro	Meso	Micro
					0–5 cm				
CE	53,44 a	58,17 a	31,83 a	-	-	-	-	-	-
PA	34,80 b	37,17 b	23,00 b	85,06a	76,58a	81,13a	8,58 b	10,53b	10,04b
					5–10 cm				
CE	33,53 a	35,23ab	21,71 a	-	-	-	-	-	-
PA	28,56 b	30,54b	23,21 a	85,21a	75,83ab	79,36ab	9,65ab	12,80ab	13,24a
					10–20 cm				
CE	32,82 a	29,58 a	21,79 a	-	-	-	-	-	-
PA	27,46 b	26,27 a	23,96 a	81,20b	72,81 b	77,64b	10,81b	14,07a	14,26a

⁽¹⁾ Valores seguidos de mesma letra dentro de cada linha do atributo do solo avaliado não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

⁽²⁾ Macro: macroagregados; meso: mesoagregados; e micro: microagregados. CE: Cerradão; PA: pastagem.

Entretanto, diferentemente do presente estudo, as pastagens citadas foram implantadas diretamente após o desmatamento da vegetação nativa. Assim, a elevada substituição da MOS (Quadro 5) pode ter alguma relação com o uso intermediário do solo sob cultivo convencional, num período de nove anos entre o desmatamento e a implantação da pastagem. Sugere-se que o uso sob cultivo convencional deixou o solo com significativo déficit de C em relação ao nível original, estimado em $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C ou $0,53 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C, quando a pastagem foi implantada. Esta, por sua vez, acumulou grande quantidade de C por meio da eficiência produtiva (Conant et al., 2001), posteriormente perdida pela deficiência no manejo subsequente.

Ainda com base nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ sob PA, foi determinado o tempo de residência média (TRM) significativamente menor na camada de 0–5 cm de solo (8,8 anos), com valores maiores nas camadas de 5–10 cm (11,3 anos) e 10–20 cm (11,9 anos), sendo o valor médio para a camada de 0–20 cm estimado em 10 anos (Quadro 5). O aumento do TRM em profundidade indica maior estabilidade e menor taxa de renovação do C à medida que se aprofunda no perfil do solo – característica também reportada por Schwendenmann & Pendall (2008). Os resultados obtidos são semelhantes aos apresentados por Six et al. (2002), que mostraram elevada variabilidade no TRM para solos tropicais, com valores entre 13 e 108 anos.

Agregação do solo

A distribuição das classes de agregados estáveis em água do solo indicou predominância de macroagregados e mesoagregados (em torno de 90 %) para as três camadas e áreas estudadas (Figura 2); consequentemente, os valores de DMA e DMG não apresentaram diferenças.

A predominância de macro e mesoagregados é uma característica de solos tropicais e evidencia a elevada

influência das interações eletrostáticas dos óxidos e minerais de argila do tipo 1:1 no processo de agregação (Oliveira et al., 2004b; Fabrizzi et al., 2009). Essas interações são consideradas como “agentes cimentantes permanentes”, os quais têm efeito predominante na formação e estabilização de microagregados, enquanto a formação e estabilização de macroagregados são determinadas por agentes cimentantes temporários, que têm ação mecânica, como as hifas de fungos e as raízes das plantas (Tisdall & Oades, 1982).

Salton et al. (2008) destacaram que valores de DMA semelhantes ou superiores aos verificados na condição de vegetação natural de Cerrado somente foram obtidos com pastagem permanente ou com a rotação lavoura-pastagem em ciclos de dois anos. Esses resultados comprovaram que o crescimento das raízes aumenta a atividade microbiana e a produção de agentes de agregação, além de atuar mecanicamente na formação e estabilização dos agregados (Denef & Six, 2005; Salton et al., 2008). Assim, mesmo com a baixa produtividade, houve forte influência do sistema radicular da gramínea em manter a agregação do solo.

Esses resultados sugerem, ainda, que a implantação da pastagem após nove anos sob cultivo convencional possivelmente recuperou parte da agregação do solo, considerando que o sistema de manejo convencional tenha afetado negativamente essa propriedade. Estudos evidenciaram que o manejo convencional em Latossolos no bioma Cerrado resulta em menores índices de DMA e DMG em relação à vegetação nativa, devido principalmente ao revolvimento do solo pelos implementos agrícolas, que rompem agregados maiores (Oliveira et al., 2004b; Wendling et al., 2005).

C e $\delta^{13}\text{C}$ associado aos agregados do solo

No quadro 5 encontram-se os teores de C obtidos em cada uma das classes de agregados. Na camada de 0–5 cm, os mesoagregados apresentaram os maiores

teores de C em relação aos macro e microagregados, independentemente do sistema de uso avaliado, enquanto nas demais camadas os microagregados apresentaram os menores valores.

Os teores de C para cada classe de agregados diminuíram com o aumento da profundidade, mais expressivamente no uso sob CE, enquanto no uso sob PA houve diferença apenas nos microagregados, que apresentaram valores menores (Quadro 5) – resultado que evidencia o maior acúmulo de C na camada superficial em relação às mais profundas.

Quando considerada a camada de 0–20 cm, foram verificadas as maiores médias nos macro e mesoagregados no CE, que apresentaram teores de C de 39,9 e 40,9 g kg⁻¹, respectivamente, mas não nos microagregados (25,1 g kg⁻¹), ao passo que para a PA foram encontrados 30,3, 31,3 e 23,4 g kg⁻¹, respectivamente, para macro, meso e microagregados (Quadro 5). Esses resultados demonstram que a situação atual da pastagem, caracterizada pela degradação, afetou negativamente os teores de C nos macro e mesoagregados em relação ao CE, sugerindo maior sensibilidade ao uso da terra por essas classes. Por sua vez, os teores de C similares entre as áreas nos microagregados demonstraram que o C se encontra mais protegido nessa classe e não foi afetado pelo sistema de manejo empregado. Comportamento semelhante foi verificado por Passos et al. (2007), que compararam os efeitos do manejo do solo sobre os teores de C em diferentes classes de agregados e verificaram maior suscetibilidade de variação no C em agregados com diâmetro > 0,25 mm em comparação aos microagregados, que são considerados mais estáveis devido à ação mais efetiva dos agentes de agregação permanentes em relação aos temporários (Tisdal & Oades, 1982).

O menor valor de TRM encontrado nos macroagregados (8,5) em relação aos mesoagregados (10,5) e microagregados (10,1) confirma que as modificações do C no solo ocorreram mais rapidamente nessa classe (Quadro 5).

Segundo Six et al. (2004), o mecanismo que leva ao acúmulo de C no solo deve-se a uma situação ótima entre o *turnover* de macroagregados e a mineralização do C, favorecendo sua oclusão nos macroagregados, com posterior estabilização em microagregados, junto aos minerais do solo. Nesse sentido, a menor quantidade de C sob PA em relação ao CE possivelmente foi insuficiente para oclusão nos macroagregados (Figura 1). Dessa forma, levou-se a um déficit, em que a oxidação foi maior que a estabilização mesmo com elevada agregação.

Assim, a agregação semelhante entre a PA e o CE, embora com diferentes teores de C em agregados maiores (Quadro 5), demonstra que na situação avaliada a dinâmica de agregação foi influenciada sobretudo pela presença de óxidos no solo e por efeito mecânico do sistema radicular (Denef & Six, 2005; Salton et al., 2008; Fabrizzi et al., 2009).

O conteúdo de C e os processos biológicos possuem elevada influência na agregação de solos de clima temperado, onde há predominância de argilas 2:1. Nesse caso, a agregação do solo tem sido reportada como fator primordial na proteção e acúmulo de C (Six et al., 2004). Entretanto, em solos tropicais, o conteúdo de C e processos biológicos podem ter papel secundário na formação de agregados (Denef & Six 2005), ocorrendo nessa situação, como principal fator de agregação, a ligação mineral-mineral devido às interações eletrostáticas entre óxidos, principalmente de Fe e Al.

Esse aspecto pode ser comprovado pelos resultados apresentados no quadro 6, que mostram a interdependência entre alguns atributos estudados, os quais indicaram correlações entre os índices de agregação DMA e DMG e os teores de C nas classes de macro e mesoagregados apenas na camada de 0–5 cm. Essas modificações se refletiram, ainda, quando analisada a camada de 0–20 cm de solo, evidenciando a maior concentração e sensibilidade do C às mudanças decorrentes da conversão do Cerradão.

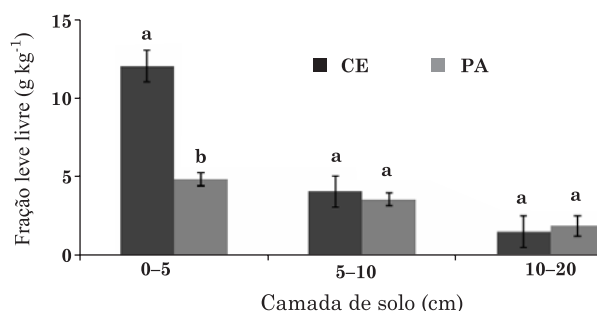


Figura 1. Fração leve livre da matéria orgânica do solo (FLL) de um Latossolo Vermelho sob Cerradão (CE) e pastagem (PA) em Rio Verde (GO) (n=6). Letras iguais dentro de uma mesma camada de solo não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

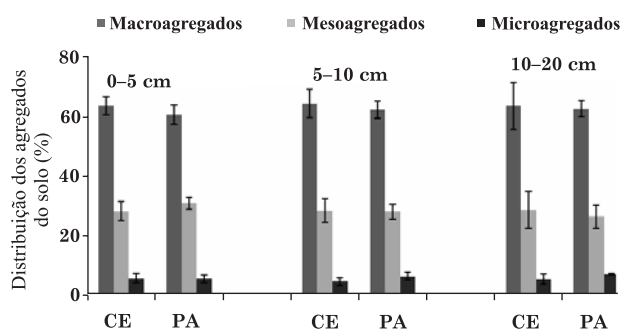


Figura 2. Distribuição das classes de agregados estáveis em água nas camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm (n=6) de um Latossolo Vermelho para a camada de 0–20 cm sob Cerradão (CE) e pastagem (PA) em Rio Verde (GO). Letras iguais dentro de uma mesma camada de solo não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

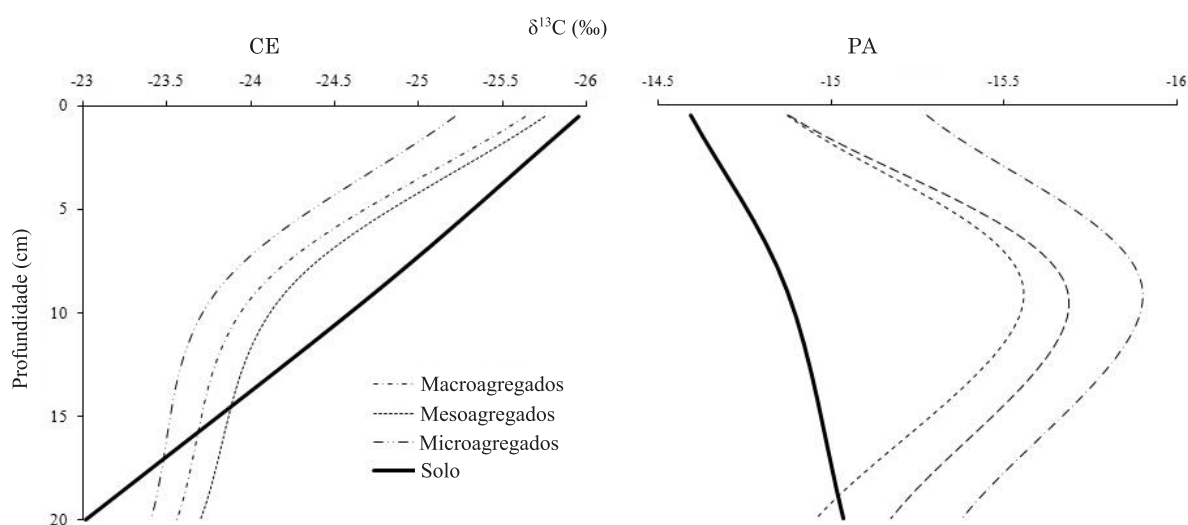


Figura 3. Composição isotópica do carbono do solo total e em diferentes classes de agregados sob Cerradão (CE) e pastagem (PA) em um Latossolo Vermelho, em Rio Verde, GO.

Quadro 6. Valores da correlação de Pearson entre o C do solo, o C de diferentes classes de agregados e o diâmetro médio aritmético (DMA) e geométrico (DMG) dos agregados na camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado, em Rio Verde, GO

Índices de agregação	Agregados do solo			C total
	Macroagregados	Mesoagregados	Microagregados	
		0–5 cm		
DMP ⁽²⁾	0,55** ⁽¹⁾	0,56**	ns	0,54**
DMG ⁽²⁾	0,54**	0,62**	ns	0,55**
		5–10 cm		
DMP	-0,55**	ns	-0,78***	ns
DMG	-0,52**	ns	-0,80***	ns
		10–20 cm		
DMP	ns	ns	-0,66***	ns
DMG	ns	ns	-0,66***	0,48*
		0–20 cm		
DMP	ns	ns	-0,53***	0,50*
DMG	ns	ns	-0,57***	0,51*

ns: não significativo ($p \leq 0,05$). ** e *** significativo a 5 e 1 %, respectivamente.

Salton et al. (2008) encontraram correlações semelhantes, relatando que uma pastagem permanente com gramínea foi capaz de manter a agregação do solo com valores semelhante aos do solo sob Cerrado e que apenas a formação e estabilização dos macroagregados estiveram relacionadas aos teores de C no solo.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ nos agregados do solo seguiram a mesma tendência do solo como um todo e também foram significativamente maiores em superfície em todas as classes de agregados (Quadro 3). Em PA, os agregados do solo indicaram substituição do C em 85, 76 e 81 %, respectivamente, para as classes macro, meso e microagregados na camada de 0–5 cm

(Quadro 5). Contudo, não foram verificadas diferenças significativas entre as classes de agregados nas demais camadas de solo avaliadas, possivelmente em razão do baixo número de amostras, ou devido ao alto coeficiente de variação.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos foram verificados nos microagregados, com elevação à medida que aumentou o diâmetro da classe de agregados (Figura 3). Esses resultados sugerem que a formação desses agregados ocorreu em associação com o C recentemente incorporado nos macro e mesoagregados, enfatizando a tendência observada. Essa observação mostrou ainda a maior suscetibilidade do C à oxidação nos macro (preferencialmente) e mesoagregados,

porém mais protegida nos microagregados (Six et al., 2002; De Galdo et al., 2003).

CONCLUSÕES

1. O uso sob lavoura e pastagem por 29 anos reduziu em 20 % o teor original de C em relação à manutenção sob Cerradão na camada de 0–20 cm, devido ao menor aporte de material na fração leve livre de C na camada superficial.

2. A conversão do Cerradão em lavoura seguida de pastagem não alterou a agregação do solo, porém menores teores de C foram verificados nos macro e mesoagregados.

3. A análise isotópica mostrou que 83 % do C original foi substituído após a conversão do Cerradão em pastagem.

4. O tempo de residência média (TRM) do carbono foi menor nos macro e mesoagregados em relação aos microagregados, demonstrando a proteção do C nesta última classe.

5. A manutenção do C no interior dos macro e mesoagregados e o constante aporte de resíduos vegetais nesse tipo de solo são os fatores que determinam o acúmulo de C no solo.

AGRADECIMENTOS

Ao proprietário da Fazenda Alvorada, pela contribuição na execução do trabalho. À Fundação Agrisus, à FAPESP (04/15538-7), ao Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM), ao Ministério das Relações Exteriores (SCAC-MAE) da França e ao acordo bilateral CAPES-COFECUB, pelo financiamento do trabalho.

LITERATURA CITADA

- BALESDENT J. & MARIOTTI, A. Measurement of soil organic matter turnover using ^{13}C natural abundance. In: BOUTTON T.W. & YAMASAKI S.I., eds. Mass spectrometry of soils. New York, Marcel Dekker, 1996. p.83-112.
- BERNOUX, M.; CERRI, C.C.; NEILL, C. & MORAES, J.F.L. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, 82:43-58, 1998.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, America Society of America, 1986. Part 1. p.364-367.
- BORLAUG, N.E. Feeding a world of 10 billion people: The miracle ahead. In: BAILEY, R., ed. Global warming and other eco-myths. Roseville, Competitive Enterprise Institute, 2002. p.29-60.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.. Rio de Janeiro, 1981. Folha SE.22-x-r Rio Verde – GO. 640p. (Levantamento dos Recursos Naturais, 25)
- BRONICK, C.J. & LAL, R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124:3-22, 2005.
- CHONÉ, T.; ANDREUX, F.; CORREA, J.C.; VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. Changes in organic matter in an Oxisol from the central Amazonian forest during eight years as pasture, determined by ^{13}C composition. In: BERTHELIN, J., ed. Diversity of environmental biogeochemistry. New York, Elsevier, 1991. p.307-405.
- CONANT, R.T.; PAUSTIAN, K. & ELLIOT, E.T. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecol. Appl.*, 11:343-355, 2001.
- CONANT, R.T.; SIX, J. & PAUSTIAN, K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States: II Change in soil carbon fractions along a forest pasture chronosequence. *Biol. Fert. Soils*, 40:194-200, 2004.
- DEL GALDO, I.; SIX, J.; PERESSOTTI, A. & COTRUFO, M.F. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable isotopes. *Global Change Biol.*, 9:1204-1213, 2003.
- DENEF, K. & SIX, J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *Eur. J. Soil Sci.*, 56:469-479, 2005.
- EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. *Bot. Rev.*, 38:201-341, 1972.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Manual de métodos de análise do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FABRIZZI, K.P.; RICE, C.W.; AMADO, T.J.C.; FIORIN, J.; BARBAGELATA, P. & MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry*, 92:129-143, 2009.
- FEARNSIDE, P.M. & BARBOSA, R.I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *For. Ecol. Manag.*, 108:147-166, 1998.
- FEIGL, B.J.; MELILLO, J. & CERRI, C.C. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondonia (Brazil). *Plant Soil*, 175:21-29, 1995.
- HURLBERT, S.H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecol. Monogr.*, 54:187-211, 1984.

- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; BRANDT, S.A.; LAFOND, G.P. & TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1799-1806, 1992.
- JASTROW, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 28:665-676, 1996.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; ENSMINGER, L.E.; WHITE, J.L. & CLARK, F.E., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.
- KLINK, C.A. & MACHADO, R.B. Conservation of Brazilian Cerrado. *Conserv. Biol.*, 19:707-713, 2005.
- LOPES, A.S. Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fósforo, 1983.
- MAIA, S.M.F.; OGLE, S.M.; CERRI, C.E.P. & CERRI, C.C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. *Geoderma*, 149:84-91, 2009.
- METAY, A.; MOREIRA, J.A.A.; BERNOUX, M.; BOYER, T.; DOUZET, J.M.; FEIGL, B.; FELLER, C.; MARAUX, F.; OLIVER, R. & SCOPEL, E. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil Tillage Res.*, 94:122-132, 2007.
- MUNSELL COMPANY INC. Munsell Soil Color Charts. Baltimore, Munsell Company, 1954.
- MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M.U.F.; McMURTRIE, R.E. & MCGILVRAY, H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Chang. Biol.*, 8:105-123, 2002.
- NEILL, C.; MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; CERRI, C.C.; MORAES, F.L.; PICCOLO, M.C. & BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. *Ecol. Appl.*, 7:1216-1225, 1996.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:327-336, 2004b.
- OLIVEIRA, O.C.D.; OLIVEIRA, I.P.D.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R. & BODDEY, R.M. Chemical and biological indicators of decline/degradation of *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. *Agric. Ecol. Environ.*, 103:289-300, 2004a.
- PASSOS, R.R.; RUIZ, H.A.; CANTARUTTI, R.B. & MENDONÇA, E.S. Carbono orgânico de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1109-1118, 2007.
- RAIJ, B.van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 16p.
- ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J. & VASCONCELLOS, C.A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. *Geoderma*, 104:185-202, 2001.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M. & BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *R. Bras. Ci. Solo* 32:11-21, 2008.
- SCHWENDENMANN, L. & PENDALL, E. Response of soil organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation. *Biol. Fert. Soil*, 44:1053-1062, 2008.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:313-319, 1997.
- SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; CORAZZA, E.J. & VIVALDI, L. Carbon storage under cultivated pastures in a clayey Oxisol in the Cerrado Region, Brazil. *Agric., Ecol. Environ.*, 103:357-363, 2004.
- SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C.C. & BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. *Acta Sci. Agron.*, 31:709-717, 2009.
- SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A.N.; DOUZET, J.; FELLER, C.; PICCOLO, M.C.; CERRI, C.C. & BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. *Soil Tillage Res.*, 110:187-195, 2010.
- SISTI, C.J.; SANTOS, H.P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 76:39-58, 2004.
- SIX, J. & JASTROW, J.D. Soil organic matter turnover. In: LAL, R., eds. *Encyclopaedia of soil science*. New York, Marcel Dekker, 2002. p.936-942.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; GRYZE, S. & DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.*, 79:7-31, 2004.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.T. & PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 32:2099-2103, 2000.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M. & ALBRECHT, A. Soil carbon matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22:755-775, 2002.
- SMITH, B.N. & EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiol.*, 47:380-384, 1971.
- SOHI, S.; MAHIEU, N.; RAH, J.R.M.; POWLSON, D.S.P.; MADARI, B. & GAUNT, J.L. Procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1121-1128, 2001.

- TISDALL, J.M. & OADES, L.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- TRUMBORE, S.E.; DAVIDSON, E.A.; CAMARGO, P.B.; NEPSTAD, D.C. & MARTINELLI, L.A. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Glob. Biog. Cycles.*, 9:515-528, 1995.
- VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. Carbon isotopic fractionation in subtropical Brazilian grassland soils. Comparison with tropical forest soils. *Plant Soil*, 27:27-31, 1987.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S. & NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:487-494, 2005.