

SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

BALANÇO DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL⁽¹⁾

Rodrigo da Silveira Nicoloso⁽²⁾, Thomé Lovato⁽³⁾, Telmo Jorge Carneiro
Amado⁽⁴⁾, Cimélio Bayer⁽⁵⁾ & Mastrângello Enívar Lanzasova⁽²⁾

RESUMO

A integração lavoura-pecuária tem apresentado um avanço recente em áreas historicamente utilizadas com pecuária de corte extensiva no sul do Brasil. O inadequado manejo das pastagens de inverno associado ao uso da monocultura da soja no verão podem limitar o aporte de resíduos vegetais ao solo e reduzir os estoques de C orgânico do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto do aumento da frequência de pastejo no inverno e de sistemas de culturas de verão no estoque de C orgânico total do solo (COT). O experimento, realizado por quatro anos sob sistema plantio direto, seguiu um delineamento de blocos ao acaso, em arranjo bifatorial 3x3, com quatro repetições. O fator A foi constituído por três intervalos de pastejos durante o inverno: sem pastejo (SP), pastejo a cada 28 dias (P28) e pastejo a cada 14 dias (P14). O fator B constou de três sistemas de culturas de verão: monocultura de soja (Mon-S), monocultura de milho (Mon-M) e rotação anual de soja e milho (Rot-S/M). Foram quantificadas as adições de C ao solo via resíduos vegetais e os estoques de COT do solo segundo os métodos de camada e massa equivalentes de solo. O aumento da frequência de pastejo diminuiu o aporte de C oriundo das pastagens de inverno de 5,3 Mg ha⁻¹ no tratamento SP, para 1,7 e 1,3 Mg ha⁻¹ nos tratamentos P28 e P14, respectivamente. O milho foi a cultura que proporcionou o maior aporte de C ao solo, com uma média de 6,0 Mg ha⁻¹, enquanto a soja adicionou apenas 2,2 Mg ha⁻¹. Os estoques de C orgânico calculados com base em camadas equivalentes de solo foram superestimados nos tratamentos P14 e P28 e subestimados no tratamento SP em comparação aos resultados obtidos com base nas massas equivalentes de solo, que foram utilizados para comparação dos sistemas de manejo. Os estoques de C orgânico nas camadas de 0-0,025, 0,025-0,05 e 0,05-0,10 m foram linearmente relacionados à adição anual de C pelas culturas (pastagem + culturas anuais), sendo necessária a adição de 4,48 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em outubro de 2008.

⁽²⁾ Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Av. Roraima s/n. CEP 97105-900. Santa Maria (RS). Bolsista CAPES. E-mail: rsnicoloso@mail.ufsm.br; mlanzanova@mail.ufsm.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, UFSM. E-mail: tlovato@smail.ufsm.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos, UFSM. Bolsista CNPq. E-mail: tamado@smail.ufsm.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, Caixa Postal 15100, CEP 91501-970 Porto Alegre (RS). Bolsista CNPq. E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

a manutenção do estoque original de C orgânico da camada de 0–0,10 m. A baixa adição de C ao solo pelos resíduos vegetais no tratamento P14 resultou numa emissão líquida estimada de C para a atmosfera (0,05 a 0,27 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), enquanto o solo no tratamento SP atuou como um dreno de C atmosférico (0,19 a 0,30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). No tratamento P28, o comportamento do solo como fonte ou dreno de C dependeu do sistema de cultura de verão, tendo sido estimada uma emissão líquida de C do solo sob Mon-S (0,04 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e uma retenção líquida de C sob Mon-M (0,15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e Rot-S/M (0,11 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). O maior intervalo entre pastejos, durante o inverno, associado à utilização do milho no verão contribuiu para maiores adições de resíduos vegetais e acúmulo de C orgânico no solo.

Termos de indexação: Matéria orgânica do solo, seqüestro de carbono, pastagens de inverno.

SUMMARY: SOIL ORGANIC CARBON BUDGET UNDER CROP-LIVESTOCK INTEGRATION IN SOUTHERN BRAZIL

In southern Brazil, crop-livestock integration is increasing in areas traditionally used for extensive beef cattle production. The poor winter pasture management associated to the use of soybean monoculture in the summer may be restrictive for the incorporation of plant residues into the soil and reduce soil organic carbon stocks. The objective of this study was to evaluate the impact of the increase of winter pasture grazing frequencies and summer crop systems on the soil organic C stock. The experiment was carried out for four years under no-tillage and the experiment had a randomized block design and a 3 x 3 bifactorial arrangement with four replications. Factor A consisted of three grazing intervals in the winter: No grazing (NG), Grazing every 28 days (G28) and Grazing every 14 days (G14); and factor B consisted of three summer-cropping systems: Soybean monoculture (Mon-S), Corn monoculture (Mon-C) and annual soybean-corn rotation (Rot-S/C). The addition of C to the soil through plant residues and the soil organic C stock were quantified by the methodologies of equivalent soil layer and equivalent soil mass. The increase of the grazing frequencies reduced the C input by winter forages from 5.3 Mg ha⁻¹ in treatment NG, to 1.7 and 1.3 Mg ha⁻¹ in the treatments G28 and G14, respectively. Corn as summer crop resulted in the highest C input to the soil with a mean of 6.0 Mg ha⁻¹, while the soybean input was only 2.2 Mg ha⁻¹. The soil organic C stock calculated by the equivalent soil layer method was overestimated in the treatments G14 and G28 and underestimated in treatment NG as compared to results obtained by the soil mass equivalent method, which was used to compare the management systems. The organic C stock in the layers 0–0.025, 0.025–0.05 and 0.05–0.10 m had a linear relationship with the annual C supply through plants (winter pastures + summer crops), requiring an additional 4.48 Mg ha⁻¹ year⁻¹ to maintain the original organic C stock in the 0–0.10 m layer. The lower C supply through plant residues in the G14 treatment resulted in an estimated net C emission to the atmosphere (0.05 to 0.27 Mg ha⁻¹ year⁻¹), while the soil in treatment NG acted as an atmospheric C sink (0.19 to 0.30 Mg ha⁻¹ year⁻¹). In treatment G28, the soil performance as source or sink of atmospheric C was dependent on the summer crop type; A soil net C emission was verified under Mon-S (0.04 Mg ha⁻¹ year⁻¹) and a net C retention under Mon-C (0.15 Mg ha⁻¹ year⁻¹) and Rot-S/C (0.11 Mg ha⁻¹ year⁻¹). The longest intervals between winter grazing associated to corn in the summer contributed to increases in biomass and soil organic C accumulation.

Index terms: soil organic matter, carbon sequestration, winter pastures.

INTRODUÇÃO

A integração lavoura-pecuária (ILP) é uma atividade econômica de expressão no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo o Censo Agropecuário Brasileiro de 1996, a ILP era praticada em cerca de 23,5 % da

área de produção de culturas anuais de grãos do Estado, que era de aproximadamente 4 milhões de hectares (IBGE, 1996). No entanto, nos últimos dez anos, a demanda de grãos do mercado internacional resultou em modificações no cenário agrícola brasileiro com aumento da área plantada com a cultura da soja.

No RS, este aumento se deu em grande parte em áreas ocupadas com a tradicional pecuária de corte extensiva. Segundo Cassol (2003), somente no ano agrícola 2002/2003, houve um acréscimo de 20 % na área plantada com a cultura da soja. Por outro lado, a pecuária de corte gaúcha não sofreu redução no número de cabeças, que tem se mantido estável em torno de 14,5 milhões de animais (Brasil, 2004). Assim, pela característica primária da ILP de constituir-se numa alternância temporária entre o cultivo de grãos e o uso de forrageiras para pastejo animal (Moraes et al., 1998), é possível conjecturar que ela teve papel fundamental em viabilizar estas atividades distintas e potencialmente concorrentes num mesmo espaço físico. Da mesma maneira, ainda pode-se afirmar que a ILP contribuiu decisivamente para a melhoria da produtividade da pecuária gaúcha nos últimos anos.

A ILP praticada no sul do Brasil e particularmente no Estado do RS caracteriza-se basicamente pela utilização de uma cultura anual de grãos no verão e o uso de pastagem de inverno composta predominantemente por gramíneas. Por razões de ordem econômica, a soja tem se constituído na principal cultura de verão, e a aveia e o azevém têm sido as forrageiras que predominantemente formam as pastagens de inverno. Essas pastagens são geralmente manejadas pelo método de pastejo contínuo, com lotação animal variável de acordo com a oferta de forragem e cultivadas preponderantemente sob sistema plantio direto (SPD) (Cassol, 2003). Porém, para o sucesso do SPD, devem-se considerar as necessidades de manutenção de elevada cobertura de solo durante todo o ano, de aporte contínuo e abundante de resíduos vegetais e do emprego de rotação de culturas (Mielniczuk, 1988). Neste sentido, o pastejo contínuo e intenso da forragem produzida no inverno, que poderia servir de cobertura de solo, pode expor o solo à degradação e reduzir seu estoque de C orgânico total (COT). Portanto, visando à sustentabilidade do sistema produtivo, há necessidade de investigar sistemas de pastejo que proporcionem, no final do ciclo de utilização das pastagens, o aporte de uma quantidade satisfatória de fitomassa ao solo, possibilitando o estabelecimento e desenvolvimento das culturas de verão sob alta cobertura de solo. Ainda, a seleção de culturas de grãos de verão, com características para produzir grande quantidade de fitomassa, deve ser considerada nas áreas de ILP, a fim de compensar a retirada de resíduos durante o inverno para alimentação animal.

O COT pode ser utilizado como indicador do efeito de sistemas de manejo na qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994; Conceição et al., 2005). Normalmente em solos sob pastagem natural, os teores de COT se mantêm estáveis ao longo do tempo, devido à igualdade entre as quantidades de C adicionadas pelas plantas e das quantidades de C perdidas principalmente por oxidação microbiana e erosão. Historicamente, estima-se que solos do sul do Brasil sob campo nativo ou mata perderam aproximadamente 50 % dos estoques de COT em apenas 10 a 15 anos de cultivo com preparo

convencional (lavoura e gradagem), baixo aporte de resíduos e intensa erosão (Bayer & Mielniczuk, 1999). Recentemente, o avanço da agricultura e da soja em áreas de campo nativo tem sido realizado em SPD. A adoção desse sistema de manejo conservacionista pode ser favorável à redução das perdas de estoque de COT do solo, que anteriormente estava sob campo nativo pela manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo e proteção física da matéria orgânica em agregados de solo (Six et al., 2004; Conceição, 2006).

A eficiência do SPD em manter o estoque de COT provavelmente está relacionada ao manejo da pastagem (frequência de pastejo) e do sistemas de culturas de verão em monocultura ou rotação. Adicionalmente ao efeito na qualidade do solo, a ILP pode ser uma fonte ou dreno de C para a atmosfera. De forma indireta, esta função ambiental do solo pode ser avaliada a partir do balanço de COT no solo sob diferentes sistemas de manejo (Costa et al., 2006). Em solos agrícolas no sul do Brasil, Bayer et al. (2006a) estimaram taxa média de retenção de C atmosférico de 0,48 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em solos com plantio direto, quando comparados a solos com preparo convencional. Estima-se que a inclusão de pastagem em integração com lavouras amplie esse potencial de retenção de C atmosférico no solo devido ao desenvolvido sistema radicular das forrageiras (d'Andrea et al., 2004).

Este estudo teve por objetivo avaliar o impacto da intensidade de uso das pastagens de inverno e do sistema de cultura de verão sobre os estoques de COT, e, a partir desses resultados, inferir sobre o comportamento do solo no sistema de integração lavoura-pecuária como fonte ou dreno de C para atmosfera.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área de campo nativo pertencente à Agropecuária Capitão Rodrigo, situada no município de Jari, RS (longitude 54 ° 13 ' W, latitude 29 ° 17 ' S e altitude 441 m), na região do planalto médio gaúcho. Este município é representativo do avanço da agricultura destinada à soja sobre a área de pecuária extensiva. O clima da região é do tipo Cfa 1, segundo a classificação de Köppen, com precipitações pluviais e temperaturas médias anuais variando de 1.558 a 1.762 mm e de 17,1 a 17,9 °C, respectivamente. O solo do local é um Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (Embrapa, 1999), e apresenta teor de argila de 280 g kg⁻¹ e COT de 27,7 g kg⁻¹ na camada 0–0,10 m.

Antes da instalação do experimento, a área era mantida sob pastagem natural com a exploração de bovinocultura de corte sob pastejo extensivo. Em abril de 2001, a área experimental de 1,6 ha foi cercada, excluindo-a de bovinos para que o campo nativo produzisse suficiente fitomassa, fosse dessecado, e as culturas de soja e milho fossem implantadas. Em outubro de 2001, o solo foi analisado quimicamente,

segundo métodos descritos em Tedesco et al. (1995), e apresentou: pH-H₂O 4,9; 2,7 mg dm⁻³ de P (Mehlich-1); 155 mg dm⁻³ de K (Mehlich-1); 9,7 mmol_c dm⁻³ de Al³⁺; 30 mmol_c dm⁻³ de Ca²⁺; e 1,3 mmol_c dm⁻³ de Mg²⁺; acidez potencial (H + Al) de 69,7 mmol_c dm⁻³; 56 mmol_c dm⁻³ de CTC efetiva; 17 % de saturação por Al; e 40 % de saturação por cátions de reação básica. Foram aplicados 3 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 100 %) na superfície do solo. Em novembro de 2001, procedeu-se à dessecação da pastagem nativa com herbicida de ingrediente ativo glifosato, na dose de 4,5 L ha⁻¹, e realizou-se a implantação das culturas da soja e do milho em SPD.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema bifatorial 3 x 3, com quatro repetições. A área de cada parcela foi de 60 m², com dimensões de 6 x 10 m. O fator A foi constituído por três sistemas de manejo das pastagens de inverno: sem pastejo (SP), pastejo a cada 28 dias (P28) e pastejo a cada 14 dias (P14). O fator B constou de três sistemas de culturas de verão: monocultura de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (Mon-S), monocultura de milho (*Zea mays* L.) (Mon-M) e rotação anual de soja e milho (Rot-S/M). As parcelas referentes ao tratamento Rot-S/M foram duplicadas de maneira que, durante o verão, já houvesse parcelas com soja e milho conforme o sistema de rotação proposto, possibilitando, assim, a comparação do efeito da adição de C dessas culturas com aquelas de outros tratamentos. O experimento teve duração de quatro anos (abril de 2001 a março de 2005).

As pastagens de inverno foram semeadas durante o mês de abril de cada ano, compostas por um consórcio de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) e azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), na proporção de 80 e 20 kg ha⁻¹ de sementes viáveis, respectivamente. O azevém foi semeado a lanço e incorporado no solo por ocasião da semeadura mecanizada da aveia em linha com espaçamento de 0,175 m. O primeiro pastejo foi realizado quando as pastagens produziram aproximadamente 1,0 Mg ha⁻¹ de matéria seca ou 0,30 m de altura, o que ocorreu, normalmente, entre os 50 e 60 dias após a emergência das plantas. Os pastejos subsequentes foram realizados de acordo com o definido para cada experimento. Devido ao ciclo de crescimento das pastagens, as áreas do experimento P28 receberam três pastejos por inverno, e nas áreas do experimento P14 foram feitos cinco pastejos por inverno. No momento dos pastejos, a área experimental foi dividida em três subáreas separadas por cercas elétricas segundo o intervalo de pastejos. O pastejo era conduzido de modo que os animais se alimentassem de maneira uniforme de toda a forragem disponível. Foram utilizadas 50 fêmeas de bovinos da raça Aberdeen Angus, com peso médio aproximado de 350 kg cada. Os animais permaneciam na pastagem por aproximadamente duas horas, sendo retirados da área quando o resíduo da pastagem atingia uma altura mínima aproximada de 0,10 m em todas as parcelas.

Após o último pastejo, as pastagens foram deixadas em descanso por um mês para que acumulassem fitomassa para a posterior dessecação e semeadura das culturas de verão. As pastagens de inverno não receberam adubação, como é feito pela maioria dos produtores. O milho e a soja foram semeados no mês de novembro de cada ano. O milho (híbrido simples Pioneer 3081) foi semeado em linha com espaçamento de 0,70 m e população de 55.000 plantas/ha, enquanto a soja (variedade RR 4910) foi semeada em linha com espaçamento de 0,35 m e população de 300.000 plantas/ha. A soja e o milho receberam anualmente 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O. O milho ainda recebeu anualmente 120 kg ha⁻¹ de N, sendo 30 kg ha⁻¹ por ocasião da semeadura e o restante parcelado em duas aplicações nos estádios V₄₋₆ e V₈₋₁₀ de desenvolvimento da cultura. A soja foi inoculada com *Bradyrhizobium* específico para a cultura. Os demais tratamentos culturais aplicados, referentes à utilização de herbicidas, inseticidas ou fungicidas, seguiram as recomendações técnicas vigentes para o Estado do Rio Grande do Sul (Reunião..., 2000; Indicações..., 2001).

Para determinar do volume de resíduos a ser acrescentado ao solo em cada sistema de cultura, foram coletadas amostras da parte aérea vegetal para quantificação da matéria seca adicionada ao solo pelas pastagens de inverno no final do período de diferimento e também pelas culturas da soja e milho. As amostras das pastagens de inverno foram coletadas com o auxílio de um quadro de aço com 0,25 m² de área interna. A cultura da soja foi amostrada quando as plantas estavam no estágio R₄, no qual, segundo Padovan et al. (2002), é o estágio em que se determina a quantidade de material vegetal aportado ao solo por esta cultura no final do seu ciclo. Para isso, foram coletadas as plantas de soja em dois metros lineares da área útil da parcela. A cultura do milho foi amostrada por ocasião da sua maturação fisiológica. Neste caso, foram coletadas aleatoriamente quatro plantas de milho na área central das parcelas.

O material vegetal coletado foi seco em estufa a 60 ± 5 °C até massa constante. As adições de C via resíduos vegetais ao solo foram calculadas em função da quantidade de matéria seca adicionada ao solo pela parte aérea das pastagens de inverno e pelas culturas de verão, considerando uma concentração de C no tecido vegetal de 40 % para este cálculo e considerando-se uma contribuição do sistema radicular equivalente a 30 % da matéria seca da parte aérea das culturas (Lovato et al., 2004). Devido ao reduzido tempo em que os animais permaneciam na área experimental, optou-se por desconsiderar possíveis adições de C via dejetos produzidos por eles durante o pastejo.

Em janeiro de 2005, foram coletadas amostras de solo para avaliação dos estoques de C orgânico. As amostras foram coletadas com trado calador nas camadas de 0–0,025, 0,025–0,05 e 0,05–0,10 m de profundidade do solo. Em cada amostra, foram

determinados os teores de C orgânico, seguindo o método descrito por Nelson & Sommers (1996). Os estoques de C orgânico foram calculados com base em camadas (Bayer et al., 2000) e massas equivalentes de solo (Ellert & Bettany, 1995), utilizando como referência a massa do solo em campo nativo. Os valores de densidade do solo (DS) nas camadas 0–0,05 e 0,05–0,10 m de solo foram determinados por meio da coleta de amostras de solo indeformadas, segundo o método do anel volumétrico descrito por Embrapa (1997), na mesma ocasião da coleta de amostras de solo para análise de C orgânico (Quadro 1).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e os valores médios foram comparados pelo teste de Tukey a 5 %. A relação entre a adição de C pelos resíduos vegetais e os estoques de C orgânico no solo foi avaliada pela significância dos coeficientes de determinação de equações lineares.

Quadro 1. Valores de densidade nas camadas de 0–0,5 e 0,05–0,10 m e da massa de solo da camada de 0–0,10 m do solo nas diferentes freqüências de pastejo no inverno e dos sistemas de cultura de verão

| Tratamento | Densidade do solo | | Massa de solo |
|--------------|-------------------|---------------------|---------------|
| | 0–0,05 m | 0,05–0,10 m | 0–0,10 m |
| | | Mg m ⁻³ | |
| | | Mg ha ⁻¹ | |
| Campo Nativo | 1,08 | 1,37 | 1.225 |
| SP | Mon-S | 0,87 | 1.085 |
| | Mon-M | 1,04 | 1.195 |
| | Rot-S/M | 1,06 | 1.210 |
| P28 | Mon-S | 1,20 | 1.270 |
| | Mon-M | 1,17 | 1.265 |
| | Rot-S/M | 1,16 | 1.250 |
| P14 | Mon-S | 1,20 | 1.265 |
| | Mon-M | 1,23 | 1.275 |
| | Rot-S/M | 1,29 | 1.295 |

SP: sem pastejo; P28: pastejo a cada 28 dias; P14: pastejo a cada 14 dias; Mon-S: monocultura de soja; Mon-M: monocultura de milho; Rot-S/M: Rotação de cultura soja e milho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Adições de C pelos resíduos vegetais

A produção de forragem pelas pastagens de inverno e os rendimentos das culturas de verão foram elevados durante todo o período avaliado, alcançando médias nas culturas de grãos de 2,9 e 7,2 Mg ha⁻¹ para a soja e milho, respectivamente. Mais detalhes sobre o desempenho das pastagens de inverno e os rendimentos de soja e milho podem ser encontrados em Nicoloso et al. (2006).

Os diferentes sistemas de cultura de verão e de manejo da pastagem de inverno resultaram em distintos aportes de resíduos culturais sobre a superfície do solo e, conseqüentemente, em distintas adições de C via resíduos de parte aérea e raízes (Quadro 2).

Pode-se observar que a adição de C oriunda dos resíduos vegetais da soja manteve-se estável, em torno de 2,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na média de todos os tratamentos durante o período avaliado. O milho e as pastagens de inverno apresentaram também aumento de sua produção de C ao longo do período de realização deste trabalho. Esses resultados parecem associados à melhoria da fertilidade do solo, promovida pela adubação aplicada nas culturas de verão (Nicoloso, 2005).

Na ausência de pastejo, as pastagens contribuíram com a maior adição de C ao solo nos sistemas Mon-S e Rot-S/M. No sistema Mon-M, houve um equilíbrio nas adições de inverno (pastagem) e de verão (cultura de grão). Quando houve pastejo, verificou-se redução de mais de 50 % na adição de resíduos ao solo vindo das pastagens, independente do sistema de cultura utilizado. Neste caso, em todos os tratamentos, os resíduos das culturas de verão passaram a ser a principal fonte de C ao solo. Este resultado foi mais evidente nos sistemas com milho do que com soja. No sistema Mon-S, o intervalo de pastejo reduziu em aproximadamente 54 e 59 % o aporte total de C para os tratamentos P28 e P14, respectivamente, em relação ao tratamento SP. Na Mon-M, o aumento da freqüência de pastejo reduziu apenas em 23 e 37 % o aporte total de C para os mesmos tratamentos em relação ao tratamento SP. Este resultado foi devido ao fato de o milho adicionar mais do que o dobro de C ao solo do que a soja. Portanto, o maior aporte de C foi verificado quando da inclusão do milho no sistema de cultura de verão. À medida que a soja aumentou sua participação, houve decréscimo no aporte de C ao solo, que, no sistema Mon-S P14, foi de 2,92 Mg ha⁻¹, contrastando com a Mon-M SP, que foi 2,6 vezes maior.

Métodos de cálculo de estoques de C orgânico no solo

Verificou-se que o cálculo baseado em camadas equivalentes de solo superestimou os estoques de C orgânico nos sistemas que tiveram pastejo (P28 e P14) e o subestimou no sistema sem pastejo (SP) (Figura 1).

Nas médias das diferentes camadas de solo, houve superestimativa do estoque de COT do solo em 6 % no tratamento P28 e de 10 % no tratamento P14, decorrentes do aumento da densidade do solo à medida que houve aumento da intensidade de pastejo (Quadro 1) em comparação com o solo de campo nativo. Esse aumento da densidade do solo agregou um erro elevado ao cálculo dos estoques de C orgânico do solo, eliminado quando calculado com base em massas equivalentes de solo. Portanto, na ILP o método da

Quadro 2. Adições anuais de C pelos resíduos vegetais ao solo em função da frequência de pastejo da pastagem no inverno e dos sistemas de cultura de verão

| Tratamento | | Ano | | | | | | | | | | | | Média | | | | |
|---------------------|---------|----------|------|-------|----------|-------|------|-------|----------|-------|------|-------|----------|-------|----------|--|--|--|
| | | 2001 | | | | 2002 | | | | 2003 | | | | | 2004 | | | |
| | | C Nativo | Soja | Milho | Pastagem | Total | Soja | Milho | Pastagem | Total | Soja | Milho | Pastagem | | Total | | | |
| Mg ha ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SP | Mon-S | 2,41 | 2,39 | - | 3,32 | 5,71 | 2,57 | - | 4,36 | 6,93 | 2,35 | - | 5,39 | 7,74 | 5,69 c | | | |
| | Mon-M | 2,41 | - | 4,07 | 2,26 | 6,33 | - | 6,45 | 2,86 | 9,31 | - | 6,63 | 5,67 | 12,30 | 7,59 a | | | |
| | Rot-S/M | 2,41 | 2,33 | - | 2,51 | 4,84 | - | 6,04 | 2,93 | 8,97 | 2,63 | - | 4,05 | 6,68 | 6,27 b* | | | |
| | Rot-M/S | 2,41 | - | 3,94 | 1,99 | 5,93 | 2,59 | - | 3,46 | 6,05 | - | 7,30 | 5,45 | 12,75 | | | | |
| P28 | Mon-S | 2,41 | 2,51 | - | 1,91 | 4,42 | 1,92 | - | 1,17 | 3,09 | 2,11 | - | 1,46 | 3,56 | 3,37 f | | | |
| | Mon-M | 2,41 | - | 3,67 | 1,41 | 5,08 | - | 6,12 | 1,78 | 7,90 | - | 5,98 | 2,11 | 8,09 | 5,87 bc | | | |
| | Rot-S/M | 2,41 | 2,28 | - | 1,45 | 3,73 | - | 5,47 | 2,28 | 7,85 | 2,25 | - | 1,57 | 3,82 | 4,63 de* | | | |
| | Rot-M/S | 2,41 | - | 3,52 | 1,15 | 4,67 | 2,31 | - | 2,14 | 4,35 | - | 6,13 | 1,73 | 7,86 | | | | |
| P14 | Mon-S | 2,41 | 2,45 | - | 0,87 | 3,32 | 1,87 | - | 0,94 | 2,81 | 1,96 | - | 1,20 | 3,16 | 2,92 g | | | |
| | Mon-M | 2,41 | - | 3,66 | 0,65 | 4,31 | - | 4,90 | 0,89 | 5,79 | - | 4,94 | 1,55 | 6,49 | 4,75 d | | | |
| | Rot-S/M | 2,41 | 2,64 | - | 1,01 | 3,65 | - | 5,22 | 1,39 | 6,61 | 2,06 | - | 0,92 | 2,98 | 4,20 e* | | | |
| | Rot-M/S | 2,41 | - | 4,03 | 0,72 | 4,75 | 2,31 | - | 1,92 | 4,23 | - | 5,08 | 1,48 | 6,56 | | | | |
| Média | SP | 2,41 | 2,36 | 4,01 | 2,52 | 5,81 | 2,58 | 6,25 | 3,40 | 7,92 | 2,49 | 6,97 | 5,14 | 9,92 | 6,52 | | | |
| | P28 | 2,41 | 2,40 | 3,60 | 1,48 | 4,57 | 2,12 | 5,80 | 1,84 | 5,70 | 2,18 | 6,06 | 1,72 | 5,83 | 4,62 | | | |
| | P14 | 2,41 | 2,55 | 3,85 | 0,81 | 3,94 | 2,09 | 5,06 | 1,29 | 4,67 | 2,01 | 5,01 | 1,29 | 4,81 | 3,96 | | | |
| Média geral | 2,41 | 2,41 | 2,43 | 3,82 | 1,60 | 4,77 | 2,26 | 5,70 | 2,18 | 6,10 | 2,23 | 6,01 | 2,72 | 6,85 | | | | |

SP: sem pastejo; P28: pastejo a cada 28 dias; P14: pastejo a cada 14 dias; Mon-S: monocultura de soja; Mon-M: monocultura de milho; Rot-S/M: Rotação de cultura soja e milho; Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5 %. *Média das parcelas duplicadas.

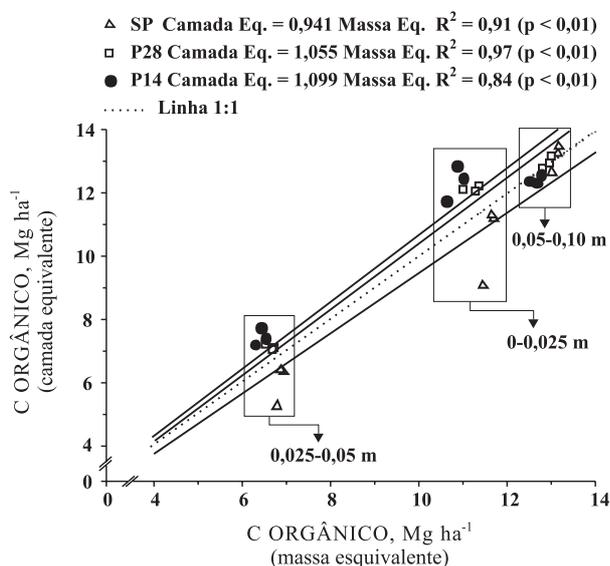


Figura 1. Comparação entre os estoques de C orgânico das camadas de 0–0,025, 0,025–0,050 e 0,050–0,10 m calculadas em massa e camada equivalentes de solo.

massa equivalente foi o mais eficiente para determinar o estoque de C no solo. Por outro lado, no tratamento SP a subestimativa foi de aproximadamente 7 %, que deve ao fato de que a densidade do solo nesse sistema, de maneira geral, diminuiu em relação ao solo em

campo nativo. Isto provavelmente está associado ao histórico de pastejo extensivo utilizado neste campo nativo, que pode ter ocasionado um incremento na densidade. No SP, o acúmulo de C na superfície também pode ter contribuído para diminuir a densidade por meio de maior agregação e atividade biológica.

Os resultados obtidos neste trabalho confirmam a importância do cálculo dos estoques de C orgânico com base em massas equivalentes de solo, eliminando o efeito dos sistemas de uso e manejo na densidade do solo (Ellert & Bettany, 1995). A seguir, o efeito dos sistemas de manejo no C orgânico são discutidos baseados exclusivamente nos estoques calculados com base em massa equivalente de solo.

Balanço de COT

A variação dos estoques de C orgânico nas camadas de 0–0,025, 0,025–0,05 e 0,05–0,10 m, em comparação com a condição original do solo de campo nativo, foi diretamente relacionada ao aporte total de C (pastagem no inverno + culturas no verão) (Figura 2). O efeito da frequência de pastejo no inverno e das culturas de verão na variação dos estoques de C orgânico nas camadas superficiais do solo (0–0,025 e 0,025–0,05 m) deve ser decorrente da adição de C fotossintetizado pela pastagem e culturas na superfície do solo. Na camada subsuperficial (0,05–0,10 m), esse efeito pode ser decorrente principalmente da contribuição do sistema radicular da pastagem e de culturas nos

diferentes tratamentos (Figura 2a), uma vez que quatro anos podem ser considerados um período relativamente curto para que esse efeito seja decorrente da migração de compostos orgânicos solúveis a partir da superfície do solo (d'Andrea et al., 2004). O maior coeficiente angular da equação que relaciona a adição anual de C ao solo e com a variação do estoque de C orgânico no solo em relação ao campo nativo indica que o efeito dos tratamentos no C orgânico está ocorrendo de forma mais expressiva na camada superficial do solo (0–0,025 m), sendo semelhante nas demais camadas.

Verifica-se uma estimada necessidade de adição anual de 4,5 Mg ha⁻¹ de C ao solo (Figura 2b), o que equivale a uma quantidade aproximada de 11 Mg ha⁻¹ de matéria seca (parte aérea+raízes) para a manutenção dos estoques originais de C do solo. A partir do coeficiente angular da equação que relaciona a variação anual dos estoques de C orgânico no solo e

a adição anual de C pelos resíduos vegetais (Figura 2b), estima-se um coeficiente de humificação de 12,5 %, ou seja, a cada 100 kg ha⁻¹ de C adicionado ao solo, aproximadamente 12,5 kg ha⁻¹ de C são incorporados na matéria orgânica do solo. Os resultados obtidos neste estudo foram semelhantes aos obtidos por Bayer et al. (2006b) em Argissolo Vermelho da Depressão Central do RS, que verificaram a necessidade de adição de 3,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C para manutenção dos estoques de C orgânico do solo e um coeficiente de humificação de 14,6 %.

De maneira geral, verifica-se que o solo com alta frequência de pastejo (P14) apresentou diminuição de 0,05 a 0,27 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no estoque de C orgânico, a qual foi maior no sistema Mon-S, intermediário no sistema com Rot-S/M, e menor no sistema Mon-M, devido a seus efeitos na quantidade de resíduo vegetal adicionada ao solo (Figura 2b). Por outro lado, no sistema sem pastejo (SP), o alto aporte de C determinou uma retenção de C orgânico no solo, em comparação ao solo original de campo nativo, variando de 0,19 a 0,30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, cujas maiores taxas foram verificadas nos sistemas que incluem milho no verão. O aumento da frequência de pastejo reduziu a capacidade do sistema em reter C orgânico no solo, e quando foi associado a soja em monocultura mesmo numa baixa intensidade de pastejo (P28), houve decréscimo no estoque de C orgânico do solo. Este resultado é importante, pois se trata do sistema mais utilizado pelos produtores na ILP.

Do ponto de vista ambiental, verifica-se que o solo somente atuou como um dreno de C atmosférico quando não houve pastejo ou quando o pastejo teve baixa frequência (P28). No verão, houve alta adição de resíduos decorrente do cultivo do milho em monocultura ou em rotação com a soja. Porém, com o uso mais intensivo das pastagens de inverno (P14), o solo atuou como fonte de C para a atmosfera em todos os sistemas de cultura investigados e, quando foi associada a soja em monocultivo, observou-se taxa de emissão de 0,27 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C. As taxas de acúmulo de C no tratamento SP foram semelhantes às descritas por Amado et al. (2006) para sistemas de rotações de culturas, envolvendo soja e milho, comparando áreas manejadas sob plantio direto com outras sob preparo convencional no RS. Se forem comparados os tratamentos mais contrastantes em termos de sequestro de C, SP Mon-M contra P14 Mon-S, a taxa de sequestro obtida foi 0,59 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Em termos ambientais e visando manter ou melhorar a qualidade do solo, ficou evidente que a opção por uso mais intensivo das pastagens de inverno não deve ser associado à monocultura de soja de verão.

CONCLUSÕES

1. O aumento da frequência de pastejo na pastagem de inverno reduziu a quantidade de C aportada ao solo.

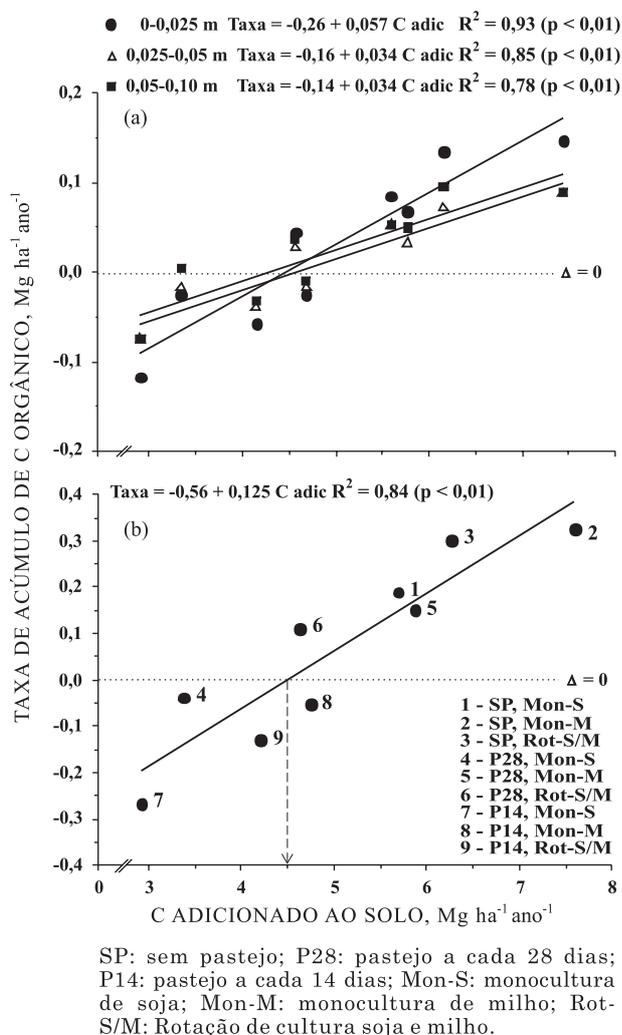


Figura 2. Relação entre a adição de C via resíduos vegetais e as taxas de acúmulo de C orgânico nas camadas de (a) 0–0,025, 0,025–0,05, 0,05–0,10 m e (b) 0–0,10 m do solo.

Em áreas sob pastejo bovino, as culturas de verão foram responsáveis por mais da metade do aporte de C ao solo, devendo-se, nesta situação, incluir no sistema de rotação de culturas espécies com alta produção de fitomassa.

2. Em áreas de integração lavoura-pecuária, a estimativa do estoque de C deve ser feita com base em massas equivalentes de solo.

3. Foi necessária a adição de 4,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C via resíduos vegetais para que sejam mantidos os estoques originais de C orgânico do solo em campo nativo.

4. O solo sob integração lavoura-pecuária tem potencial para ser um dreno de C atmosférico, desde que no inverno seja adotado um intervalo de pastejo de 28 dias e evite-se a monocultura de soja no verão.

AGRADECIMENTOS

Aos proprietários da Agropecuária Capitão Rodrigo, José e Mara Nicoloso, por cederem a área destinada ao experimento e pelo apoio à sua execução. Aos voluntários de iniciação científica, Vitor Girardello, Jardes Bragagnolo e Vagner Lopes da Silva. À CAPES e ao CNPq, pela concessão das bolsas aos envolvidos neste trabalho.

LITERATURA CITADA

- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B.C. & VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Quality*, 35:1599-1607, 2006.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.9-26.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in Southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIEKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian cerrado soil under no-till. *Soil Till. Res.*, 86:237-245, 2006a.
- BAYER, C.; LOVATO, T.; DIEKOW, J.; ZANATTA, J.A. & MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil Till. Res.*, 91:217-236, 2006b.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Departamento de Estatísticas Rebanho bovino brasileiro. *Efetivo por Estado*. Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 15 de Agosto de 2006.
- CASSOL, L.C. Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário em superfície. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 143p. (Tese de Doutorado)
- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos correlacionados. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:777-788, 2005.
- CONCEIÇÃO, P.C. Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 138p. (Tese de Doutorado)
- COSTA, F.S.; GOMES, J.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. *Ci. Rural*, 36:693-700, 2006.
- D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. & GUILHERME, L.R.G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:179-186, 2004.
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-22. (Publication, 35)
- ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. *Canadian J. Soil Sci.*, 75:529,538, 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Brasília, 1997. 212p. (Embrapa/CNPQ. Documentos, 1)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.
- FONTANELI, R.S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H.P.; IGNACZAC, J.C. & ZOLDAN, S.M. Análise econômica de sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2129-2137, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Censo Agropecuário 1995 – 1996*. Brasília, 1996. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 15 de ago. de 2006.
- INDICAÇÕES técnicas para a cultura do milho no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Fepagro; Embrapa Trigo; Emater/RS; Fecoagro/RS, 2001. 195p. (Boletim Técnico, 7)

- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. & VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e o rendimento do milho em sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:175-187, 2004.
- MIELNICZUK, J. Desenvolvimento de sistemas de culturas adaptadas à produtividade, conservação e recuperação de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., Campinas, 1988. A responsabilidade social da ciência do solo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p.109-116.
- MORAES, A.; LESAMA, M.F. & ALVES, S.J. Lavoura-pecuária em sistemas integrados na pequena propriedade. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE, 3., Pato Branco, 1998. Anais. Pato Branco, CEFET-PR, 1998. CD-ROM.
- NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A. & LOEPPERT, R.H., eds. *Methods of soil analysis: Chemical methods. Part 3*. Madison, American Society of America, 1996. p.961-1010.
- NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T. & LANZANOVA, M.E. Manejo das pastagens de inverno e potencial produtivo de sistemas de integração lavoura-pecuária no Estado do Rio Grande do Sul. *Ci. Rural*, 36:1799-1805, 2006.
- NICOLOSO, R.S. Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 149p. (Tese de Mestrado)
- PADOVAN, M.R.; ALMEIDA, D.L.; GUERRA, J.G.M.; RIBEIRO, R.L.D. & NDIAYE, A. Avaliação de cultivares de soja, sob manejo orgânico, para fins de adubação verde e produção de grãos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:1705-1710, 2002.
- REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 28., Santa Maria, 2000. Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2000/2001. Santa Maria, UFSM/CCR/Departamento de Defesa Fitossanitária, 2000. 148p.
- SIX, J.; OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; CONANT, R.T.; MOSIER, A.R. & PAUSTIAN, K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Global Change Biol.*, 10:155-160, 2004.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.