

# Dinâmica do Carbono em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária

Júlio Cesar Salton

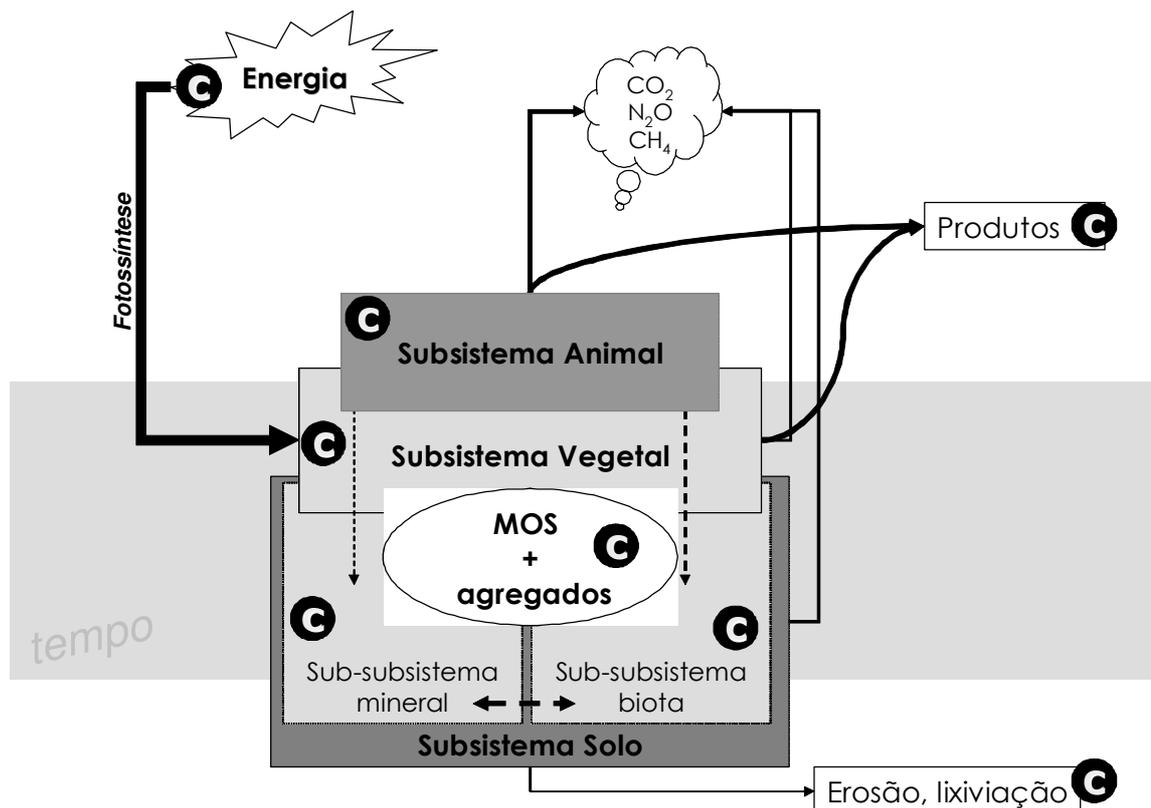
## INTRODUÇÃO

A agropecuária brasileira ao conciliar a adoção do Sistema Plantio Direto com a intensificação dos cultivos (safrinha e consórcios) está encaminhando soluções para graves e antigos problemas de conservação do solo e produção sazonal de forragem. Este novo sistema de produção agropecuário tem como fundamento a integração da lavoura com a pecuária, obtendo vantagens recíprocas através da alternância das atividades. Possui inúmeras conformações que se ajustam aos diversos ambientes edafoclimáticos, apresentando como principais resultados a quebra de ciclos de doenças e pragas, aumento da eficiência dos adubos e corretivos, maior reciclagem de nutrientes, maior produtividade vegetal, cobertura permanente do solo através das plantas e/ou palhadas que resultam em melhor qualidade do solo e ambiente produtivo.

Os sistemas de integração lavoura-pecuária incluem obrigatoriamente plantas forrageiras em rotação ou consorciadas com plantas de lavouras, as quais, geralmente, são pastejadas diretamente por animais. Esta configuração do sistema de produção, altera de forma marcante o aporte e a dinâmica de carbono no solo, em relação aos sistemas contendo apenas plantas de lavouras.

O aumento ou redução do estoque de carbono no solo decorrente da adoção de um determinado sistema agropecuário será correspondente ao saldo entre a entrada de C no sistema via fotossíntese ou animais, e as saídas do sistema via produtos, respiração, oxidação, fermentação, erosão, etc. conforme sintetizado no modelo conceitual apresentado na Fig. 1.

A existência de sistemas integrados de produção, no entanto, não é suficiente para garantir saldo positivo de C no solo. Havendo excessivo pastejo da forrageira, poderá não ocorrer sobra de material vegetal senescente em quantidade suficiente para suprir a necessidade de reposição de C ao sistema. Nesta situação, é provável que o sistema apresente um balanço negativo de carbono, pois, o aporte de material orgânico ao solo (parte aérea e raízes das plantas) é dependente da forma de manejo dos animais (pressão de pastejo).



**Fig. 1** – Modelo conceitual de um sistema de produção com integração lavoura-pecuária, onde o fluxo de energia é representado pelo fluxo de carbono, que inicia com a transformação da energia luminosa através da fotossíntese no Subsistema Vegetal. A parte não transformada em produto (grãos, carne) ou perdida para a atmosfera, pode ser armazenada no Subsistema Solo como matéria orgânica (MOS), proporcionando a formação de macro-agregados estáveis que resultam na auto-organização do sistema (múltiplas e complexas interações) em níveis de ordem crescentes, oportunizando a manifestação de propriedades emergentes (altamente desejáveis e relacionadas com a produtividade e qualidade dos sistemas). Como os fluxos (entradas e saídas) são dinâmicos ao longo do tempo o nível de organização do sistema obedece à continuidade e intensidade destes fluxos, que, sendo positivos, proporcionam aporte de energia para sua manutenção em um nível de ordem superior, desta forma com maior sustentabilidade. Fonte: Salton, (2005).

## ESTOQUES DE C NO SOLO

O aumento do teor de matéria orgânica no solo (MOS) está associado à melhoria de diversos atributos do solo, sejam químicos, físicos ou biológicos, uma vez que vários processos que ocorrem no sistema solo e suas interfaces estão intimamente relacionados à sua dinâmica e teor no solo, servindo, inclusive como indicador de qualidade do solo (Mielniczuk, 1999). Neste sentido, a inclusão de plantas forrageiras em sistemas agrícolas constitui uma forma de incrementar o aporte de carbono ao solo. Silva et al. (2004), avaliaram pastagens cultivadas quanto ao armazenamento de carbono em Latossolos argilosos dos Cerrados e verificaram, em até 1 m de profundidade, que o acúmulo variou entre 97,1 a 113,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Nesta avaliação as espécies que proporcionaram maior

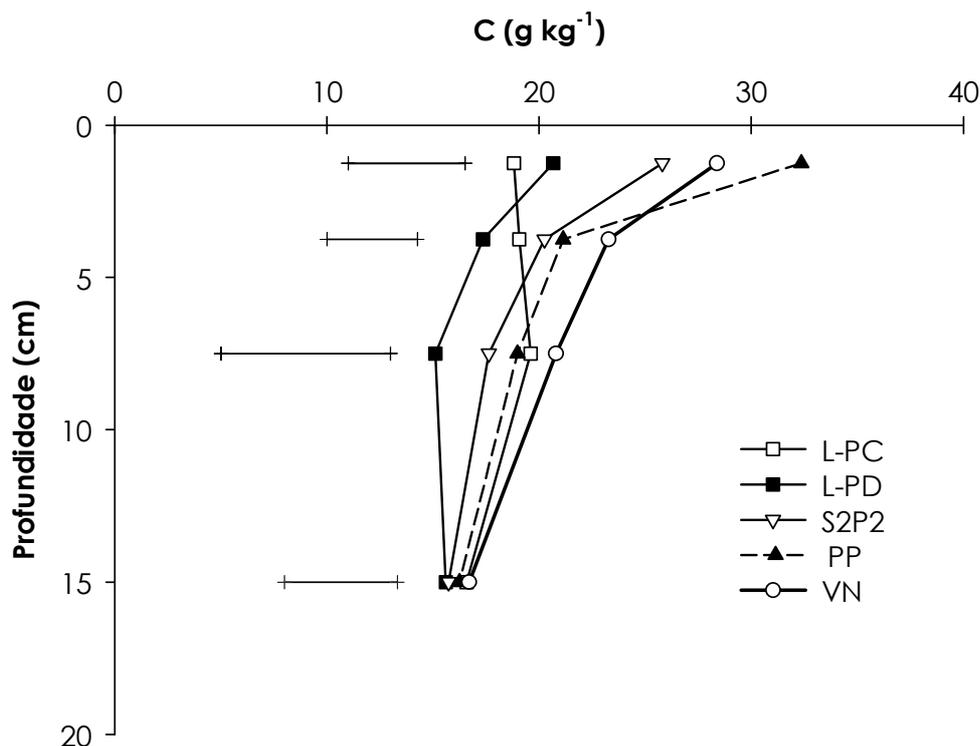
acúmulo foram o *Panicum maximum*, *B. brizantha* e *Paspalum atratum*, concentrando-se nas camadas superficiais, com cerca de 50% até 40 cm de profundidade. Lilienfein et al. (2003), ao compararem duas pastagens de *B. decumbens*, em condição “degradada” e “produtiva” verificaram entre outras variáveis, que os teores de carbono no solo (0 a 15 cm) foram de 22 e 27 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Na Região Centro-Oeste do Brasil, embora haja expressiva área de pastagem, com predomínio de plantas do gênero *Brachiaria*, estima-se que cerca de 60% destas áreas estejam degradadas; nesta situação, o acúmulo de carbono no solo é significativamente prejudicado.

Em experimentos conduzidos em Mato Grosso do Sul, verificaram-se expressivos aumentos no teor de MOS pelo uso de pastagem de *B. decumbens*, em rotação com soja, com ciclos de dois anos, alterando de 30 para quase 40 g kg<sup>-1</sup> na camada 0 a 5cm, no período de apenas três anos (Fabrício & Salton, 1999).

A dinâmica de acúmulo de C no solo é dependente do sistema de manejo empregado no solo, desde as operações de preparo, até as seqüências de culturas. A Fig. 2 apresenta a distribuição dos teores de C no perfil do solo, em função da adoção, durante nove anos, de quatro sistemas de manejo do solo, em comparação à situação da vegetação natural daquele ambiente.

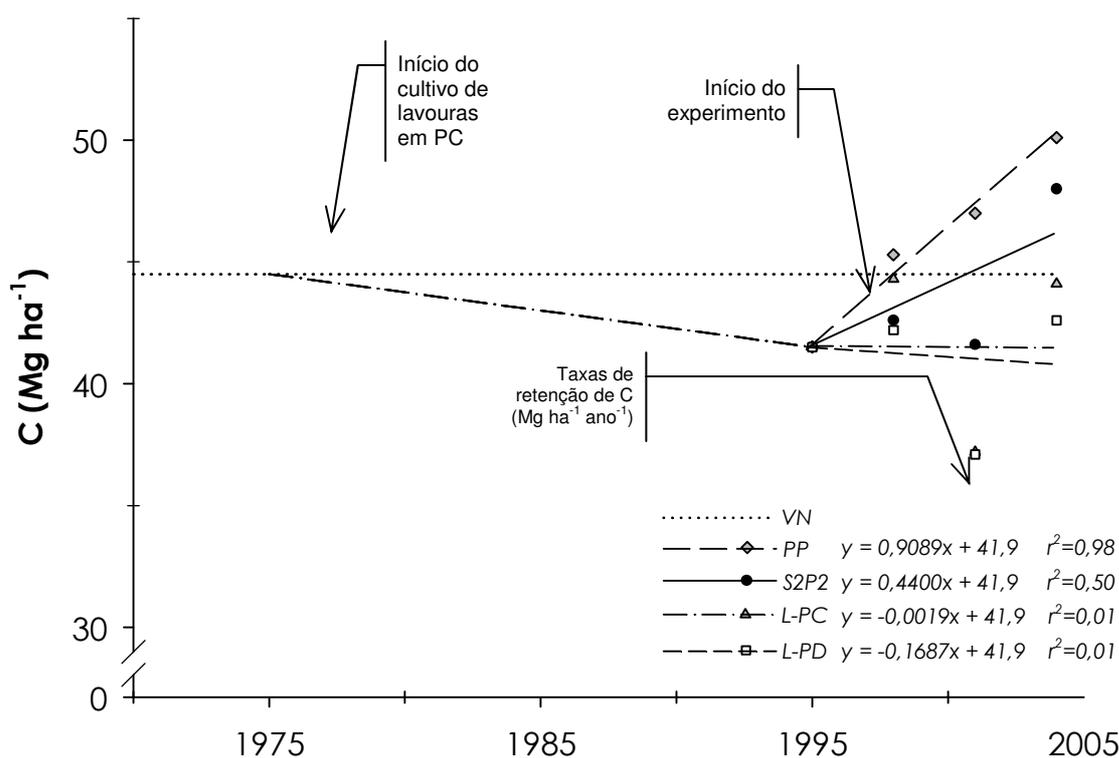
Diferenças significativas foram observadas na camada mais superficial (0 a 2,5 cm), onde os sistemas com a presença de pastagem (PP e S2P2) e a VN apresentaram valores superiores aos sistemas apenas com lavouras (L-PD e L-PC). Este fato, provavelmente, está associado ao maior aporte de material vegetal pelas pastagens. Também se observa que, para todos os sistemas de produção, os teores na camada mais profunda são semelhantes, fruto do manejo empregado antes da implantação do experimento, que neste caso consistia de agricultura em preparo convencional durante mais de 20 anos.

Os sistemas de manejo não foram capazes de alterar os estoques de C na camada mais profunda, atuando predominantemente na superfície do solo, o que pode fortalecer a importância da senescência de folhas da pastagem como fonte de C, além daquela decorrente da morte e decomposição do sistema radicular das plantas, que se concentra nestas camadas.



**Fig. 2** - Teor de carbono orgânico em camadas de um LVdf de Dourados, MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos. As barras indicam o valor para DMS 5%. L-PC = lavouras em sistema convencional, L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural.

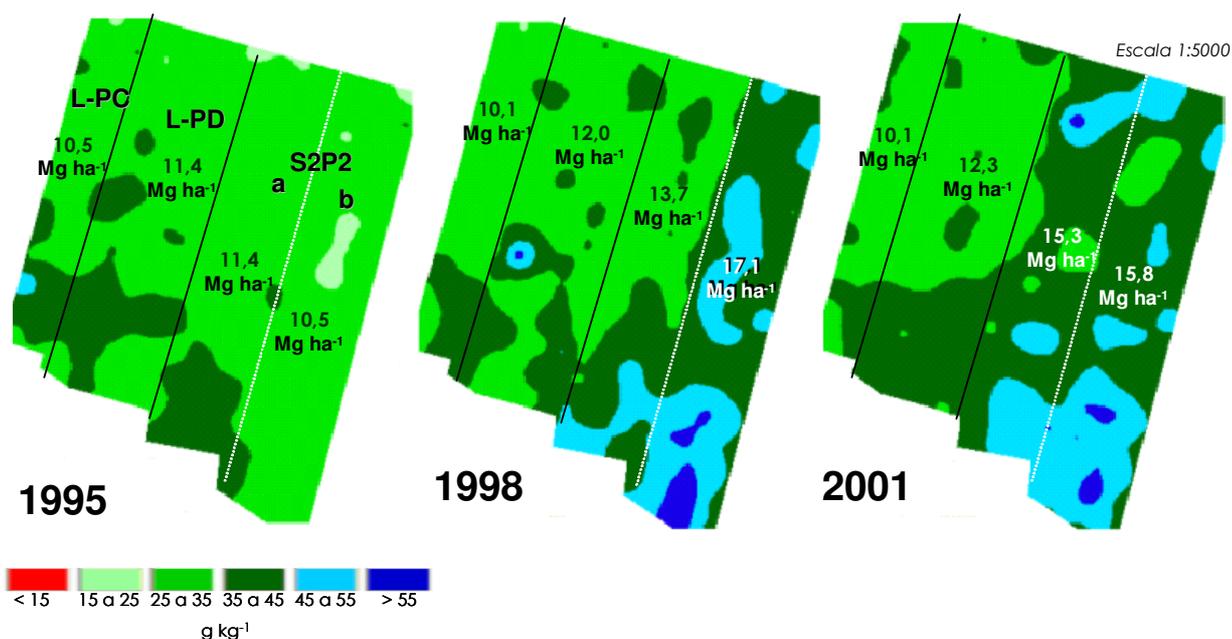
O estoque de C de um Latossolo Vermelho argiloso, submetido a diferentes sistemas de manejo, foi avaliado em um experimento de longa duração por Salton (2005). Neste trabalho foi considerado o estoque de C no solo sob vegetação natural (VN), como o da situação original, anterior ao uso agrícola, o qual correspondia a  $44,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . Com o início da utilização agrícola em meados da década de 1970, através de preparo convencional, teria havido redução deste valor para  $41,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$  em função da monocultura da soja associada ao manejo do solo adotado. A partir de 1995/96, com a implantação do experimento e utilização de outros sistemas de manejo, houve alteração nos estoques de C no solo, com acréscimos nos sistemas que incluem pastagens, ultrapassando os valores iniciais (VN), conforme está demonstrado na Fig. 3. As taxas anuais de retenção de C, na camada de 0 a 20 cm do solo, calculadas para os nove anos do experimento, foram de  $0,91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e de  $0,44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente para os sistemas PP e S2P2. Para os demais sistemas as taxas foram praticamente nulas. Maiores taxas de retenção de C no solo estão associadas a maior aporte de material orgânico ao solo pelas culturas (Lovato et al., 2004), o que se confirmou neste caso, com as maiores taxas coincidindo com a presença de pastagens.



**Fig. 3** - Evolução do estoque de carbono orgânico na camada de 0 a 20 cm de um LVdf de Dourados, MS submetido a usos e formas de manejo ao longo do tempo. L-PC = lavouras em sistema convencional, L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural.

Na Figura 3, observa-se ainda as taxas de retenção de C, as quais são muito superiores nos sistemas contendo pastagem, e o efeito da rotação braquiária/soja, que possibilita a existência de plantas na fase inicial de crescimento.

A distribuição espacial dos teores de MOS e dos estoques de C no solo do experimento de Dourados, foram avaliados por Hernani et al. (2005) e está apresentada na Fig. 4. Verifica-se claramente o efeito da introdução da pastagem, resultando no aumento dos teores de MOS e a importância da manutenção da pastagem, pois na gleba em que a pastagem foi sucedida por dois anos de lavoura, já se verifica uma pequena redução nestes teores. Nos sistemas exclusivamente com lavouras, apenas houve pequena redução no estoque no sistema L-PC e pequeno aumento no sistema L-PD.

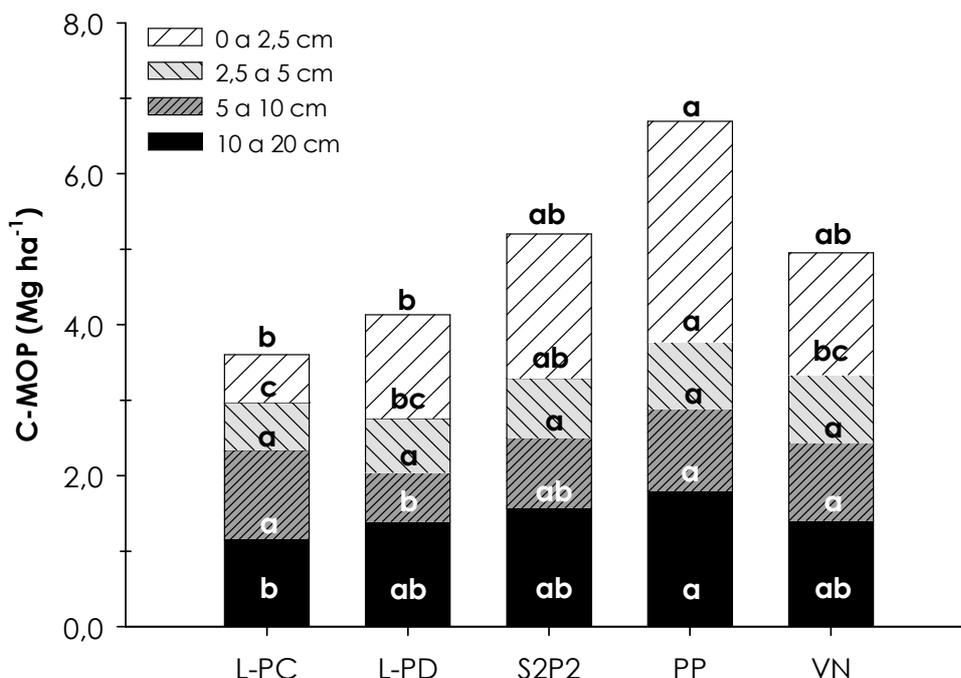


**Fig. 4** - Evolução da distribuição espacial do teor de matéria orgânica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e do estoque de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) da camada 0 a 5 cm de um Latossolo Vermelho argiloso, submetido três sistemas de manejo durante o período 1995 a 2001. L-PC = seqüência soja/aveia no sistema convencional, L-PD = seqüência soja/aveia/soja/trigo/nabo/milho em plantio direto, S2P2a = seqüência soja/aveia/soja/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos/soja/aveia/soja em plantio direto, S2P2b = seqüência de pastagem (*B. decumbens*) por dois anos/soja/aveia/soja/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto. Fonte: adaptado de Hernani et al. (2005).

## FRAÇÕES DO C NO SOLO

Uma das formas de melhor avaliar a dinâmica e a funcionalidade da MOS é através do fracionamento físico, que proporciona a quantificação da fração mais lábil, matéria orgânica particulada - MOP (fracionamento granulométrico) ou fração leve - FL (fracionamento densimétrico) e a respectiva concentração de C, que resulta na quantidade de C-MOP ou C-FL no solo e permite avaliar a eficiência dos sistemas de manejo em aportar matéria orgânica lábil ao solo. Esta fração posteriormente abastece o compartimento estável da MOS, constituída pela fração associada aos minerais ou fração pesada. Como a principal rota de entrada de C ao solo é via decomposição das raízes, em alta concentração nas camadas superficiais e dos resíduos deixados na superfície do solo, é esperado que a maior quantidade de C-MOP esteja na camada superficial, o que foi verificado por Salton (2005), em avaliação de experimento de longa duração em Dourados, MS. Neste experimento, a concentração na camada superficial foi observada em todos os sistemas de manejo, com exceção do sistema L-PC que apresentou maior quantidade de C-MOP na camada 5 a 10 cm, devido à deposição de material oriundo da superfície que foi incorporado ao solo nesta profundidade, pela atividade das grades de discos no preparo do solo. Na camada 0 a 2,5 cm evidenciou-se a contribuição da pastagem, com o sistema PP apresentando estoque de  $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  de C-MOP, enquanto o L-PC apresentou cerca de cinco vezes menos, apenas  $0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Fig. 5).

Para manutenção da atividade biológica e fluxo de C para o solo é fundamental que o solo apresente elevada quantidade de C-MOP. Por outro lado, caso o solo não disponha de matéria orgânica lábil em quantidade suficiente para suprir suas necessidades, os processos de oxidação da MOS irão resultar em redução do estoque de C no solo, dando início a processo de perda de qualidade e degradação do solo. Desta forma, ao possuir 6,7 Mg ha<sup>-1</sup> de C-MOP o sistema PP apresentou-se significativamente superior aos sistemas L-PC e L-PD, respectivamente com 3,6 e 4,1 Mg ha<sup>-1</sup> de C-MOP, estando o sistema S2P2 com 5,2 Mg ha<sup>-1</sup> em posição intermediária (Fig. 5).

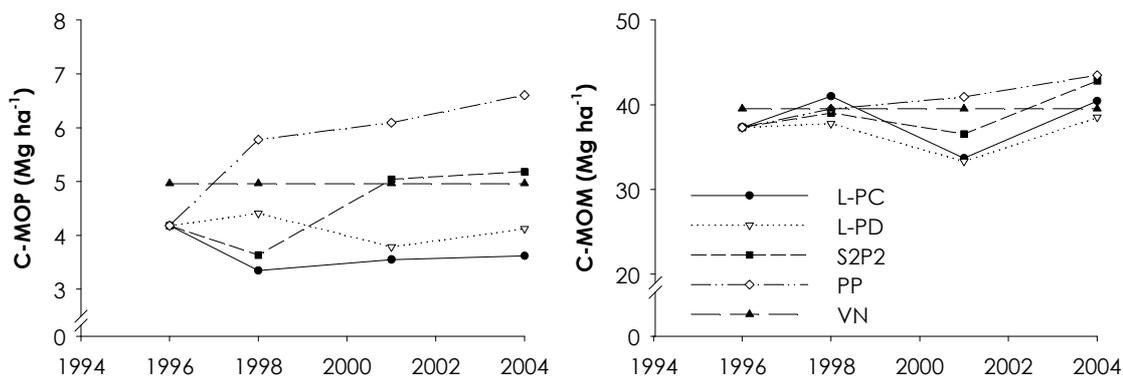


**Fig. 5** - Estoques de C-MOP em camadas de um LVdf de Dourados, MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos. Letras iguais para a profundidade no interior das barras e para a camada 0 a 20 cm no topo das barras, indicam semelhança a DMS 5%. L-PC = lavouras em sistema convencional, L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural.

Como as taxas de adição e de decomposição da fração particulada da MOS são superiores às verificadas com a fração associada aos minerais, sua capacidade de retratar os efeitos dos sistemas de manejo sobre a dinâmica do carbono no solo é mais evidente e pode ser utilizada como indicador. A rápida variação nos estoques, alterando-se com a introdução de pastagem no sistema, como pode ser observada na Fig. 6, onde se encontra a evolução dos estoques de C nas frações da MOS. Para a implantação deste experimento em Dourados, em 1995, o solo das parcelas destinadas à semeadura de pastagens foi preparado com várias gradagens que resultaram na eliminação dos resíduos vegetais e significativa redução no C-MOP (~3,5 Mg ha<sup>-1</sup>) que na amostragem seguinte, em 1998, para o sistema PP, já atingiu o valor de 5,8 Mg ha<sup>-1</sup>. No sistema S2P2, como a rotação iniciou pela cultura de soja e a pastagem apenas foi implantada na safra 1997/98, o aumento no estoque de C-MOP foi detectado na amostragem de 2000 quando atingiu a 5 Mg ha<sup>-1</sup>. Nos sistemas de

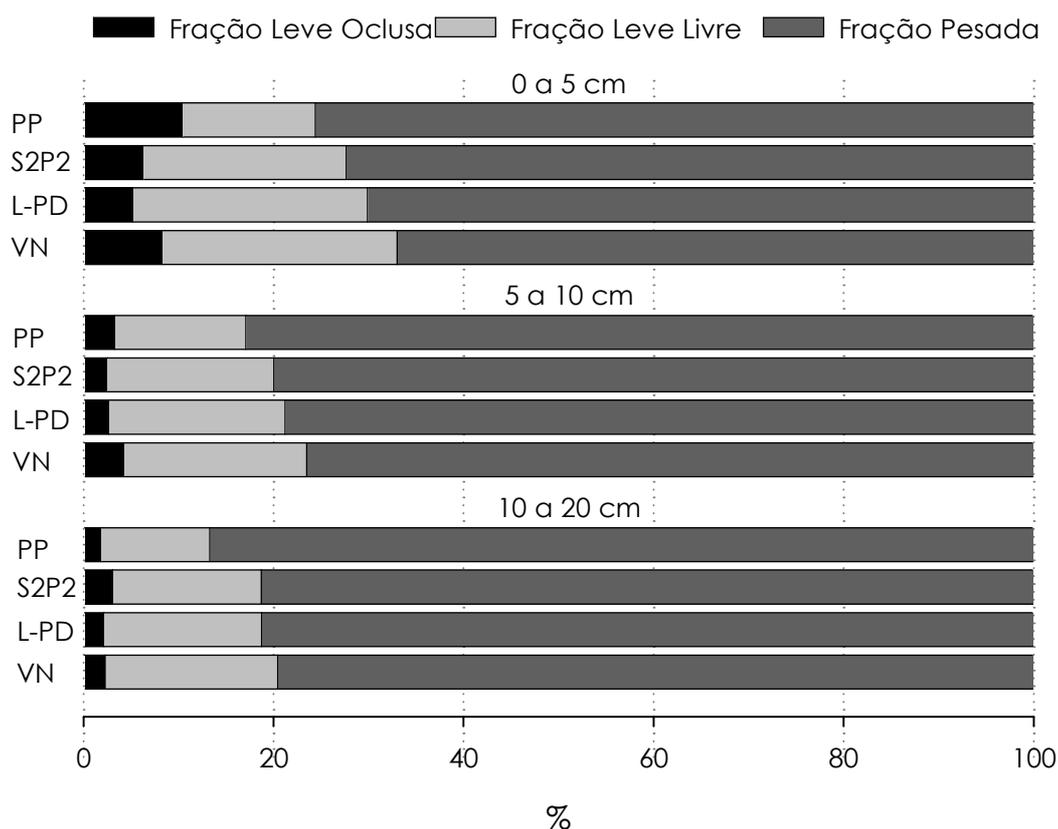
manejo com culturas anuais, o rendimento das culturas, quantidades de resíduos e as condições climáticas parecem ser determinantes das variações no estoque de C-MOP.

O estoque de C na fração da MOS associada aos minerais do solo também variou ao longo do tempo, sendo influenciado, entre outros fatores, pelas variações no estoque de C-MOP. Acréscimos de C-MOM somente ocorrem algum tempo após haver disponibilidade de C-MOP no solo, em situação que permita os processos de interação no solo e havendo capacidade da fração mineral do solo reter C através da formação de complexos organo-minerais. No caso deste experimento, as variações relativas do C-MOM, foram, proporcionalmente, numa amplitude inferior à variação da fração particulada no mesmo período de tempo, ficando os estoques muito próximos ao verificado para a condição de referência (VN), o qual apenas foi superado em 2004, através dos sistemas com pastagens.



**Fig. 6** - Evolução do estoque de C na matéria orgânica associada aos minerais (C-MOM) e particulada (C-MOP), na camada 0 a 20 cm de um LVdf de Dourados, MS submetido a sistemas de manejo no período 1996 a 2004. L-PC = lavouras em sistema convencional, L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural.

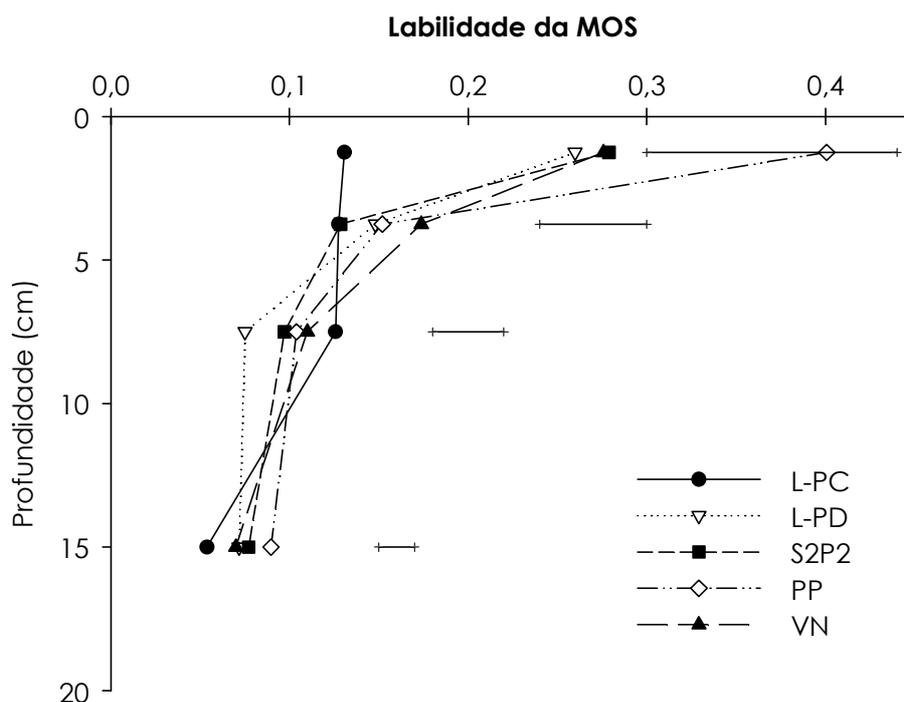
A matéria orgânica também pode ser fracionada através de sua densidade; assim, frações mais leves (lábil) podem ser separadas da fração pesada (pouco lábil) e quantificada a participação dos agregados do solo na proteção da MOS, através da menor acessibilidade dos compostos orgânicos presentes no interior dos agregados. Boeni (2007) avaliou as frações densimétricas da matéria orgânica do solo do experimento de Dourados, quantificando o teor de C presente nestas frações. Verificou que a participação dos agregados do solo é importante na proteção de C, especialmente na camada mais superficial e no sistema de pastagem permanente (PP) que supera ao valor da condição natural deste solo (VN). O sistema com a rotação lavoura/pastagem ocupa uma posição intermediária entre o sistema PP e o sistema contendo apenas lavoura em Plantio Direto (L-PD). A contribuição relativa da fração oclusa, em relação a fração leve total é expressiva em todos os sistemas, mas no sistema de rotação lavoura/pastagem (S2P2) chega a atingir 83%, na camada 0 a 5 cm (Fig. 7). Esta situação reflete a intensa interação existente entre o sistema radicular das plantas e as partículas do solo, contribuindo na formação de novos agregados e incorporando material orgânico ao solo.



**Fig. 7** - Distribuição relativa das frações densimétricas da matéria orgânica do solo em três camadas de um LVdf de Dourados, MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos. L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural. Fonte: Adaptado de Boeni (2007).

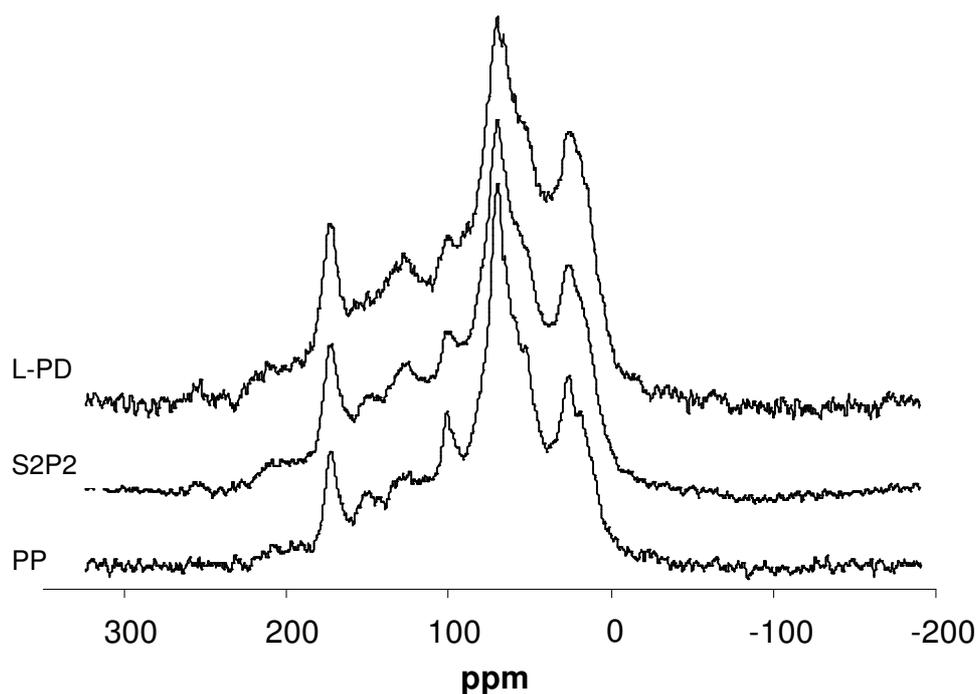
## QUALIDADE DA MOS

Além da quantidade de C nas frações da MOS, sua dinâmica e funcionalidade está associada ao tipo de material orgânico que é incorporado ao Sistema Solo, conforme modelo apresentado na Fig. 1. Desta forma, sistemas de manejo ao aportarem diferentes quantidades e qualidades variáveis de compostos orgânicos, alteram a labilidade da MOS, ou seja, a proporção de MOS lábil em relação à não-lábil ( $Lab = C-MOP/C-MOM$ ). De modo geral, os maiores valores são verificados na camada superficial (0 a 2,5 cm) decorrente da grande quantidade de resíduos vegetais aportados na superfície do solo, sendo que no caso do experimento de Dourados, houve a concentração nesta camada de 35% do C-MOP encontrado na camada 0 a 20 cm (Fig. 8). Para as demais profundidades, a labilidade da MOS reduziu-se a valores semelhantes aos dos outros sistemas de manejo. O sistema L-PC, no entanto, apresentou um comportamento diferente dos demais, a labilidade foi constante nas três primeiras camadas (0,13), sendo que na superfície (0 a 2,5 cm) foi o menor valor em comparação aos demais, enquanto que na camada 5 a 10 cm, foi a mais elevada. Este comportamento está associado à incorporação de resíduos vegetais (MOP) pelas gradagens no preparo do solo.



**Fig. 8** – Labilidade da MOS (C-MOP/C-MOM) de um LVdf de Dourados,MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos. As linhas indicam a DMS 5% para cada camada. L-PC = lavouros em sistema convencional, L-PD = lavouros em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural.

Sistemas de manejo do solo, ao influenciarem as quantidades de material orgânico aportadas a este e as taxas de ciclagem e de mineralização da MOS, exercem considerável influência sobre os níveis de MO do solo. No entanto, quando os sistemas de manejo diferem apenas na forma de preparo do solo, as alterações na dinâmica da MOS são esperadas apenas quanto à taxa de decomposição e intensidade de proteção física. A composição química da matéria orgânica está mais ligada à qualidade do material original (vegetação) do que as formas de manejo do solo, como a intensidade e forma de preparo do solo, que interferem na taxa de degradação deste material (Dieckow et al., 2004). Quando os sistemas de manejo do solo diferem na qualidade do material adicionado, como é o caso do experimento de Dourados, são esperadas significativas alterações qualitativas. Tais alterações podem ser avaliadas com a utilização de técnicas como a ressonância magnética nuclear (RMN), como foi efetuado por Boeni (2007), que utilizou amostras de solo do experimento de Dourados para comparar os sistemas de manejo. Os espectros obtidos de amostras de solo inteiro estão apresentados na Fig. 9, na qual se verifica certa semelhança entre os sistemas de manejo.



**Fig. 9** - Espectros de RMN  $^{13}\text{C}$  CPMAS das amostras de solo inteiro, na camada de 0 a 5 cm de um LVdf de Dourados, MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos. L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*.  
Fonte: Adaptado de Boeni (2007).

A quantificação de cada tipo de C foi realizada através da integração das áreas dos correspondentes picos no espectro. Os espectros de RMN  $^{13}\text{C}$  CPMAS foram divididos em quatro regiões de deslocamento químico, correspondentes a C alquil (0-45 ppm), C O-alquil (45-110 ppm), C aromático (110-160 ppm) e C carboxílico (160-220 ppm). A Tabela 1 apresenta os valores relativos das formas predominantes dos tipos de compostos presentes na MOS da camada 0 a 5 cm em três sistemas de manejo do experimento de Dourados. A presença de grupos alifáticos como carboidratos, celulose, hemicelulose, são mais facilmente degradados pela ação de microrganismos, do que compostos com predomínio de grupos aromáticos como a lignina, cujas ligações químicas são mais resistentes à ação mineralizadora, conferindo maior recalcitrância a estes compostos. Assim, culturas cuja decomposição resulte em maior quantidade de matéria orgânica mais aromática será mais estável no solo.

Não foram verificadas variações significativas na composição química da MO do solo inteiro, sendo apenas destacadas diferenças quanto ao C O-alquil, considerado o componente mais lábil quimicamente, representado pelos carboidratos (celulose, hemicelulose e quitina), os quais podem atuar como a primeira fonte de carbono e energia, por serem rapidamente decompostos pelos microrganismos.

A variação na contribuição das formas de C na MOS entre os sistemas de manejo, com maiores valores de C O-alquil na seqüência L-PD>S2P2>PP e inversa para C alquil, demonstra que o grau de decomposição da MOS encontra-se nesta ordem, mostrando tendência de melhoria na qualidade do solo contendo pastagens (em rotação ou permanente). Isto é explicado, provavelmente, pela substancial adição de material orgânico

recente, principalmente como resíduos vegetais e exudatos radiculares liberados durante o período de crescimento das gramíneas, cuja composição principal são polissacarídeos como C O-alquil. Por outro lado, o incremento de C alquil, juntamente com o menor aporte de resíduos vegetais ao solo (L-PD), é resultado da utilização preferencial de polissacarídeos pelos microrganismos.

Tabela 1 - Contribuição relativa de carbono (% de CO total) nas regiões de variação química dos espectros de RMN  $^{13}\text{C}$  CPMAS e a razão C O-alquil/C alquil em amostras de solo inteiro, na camada de 0-5 cm de um LVdf de Dourados, MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos.

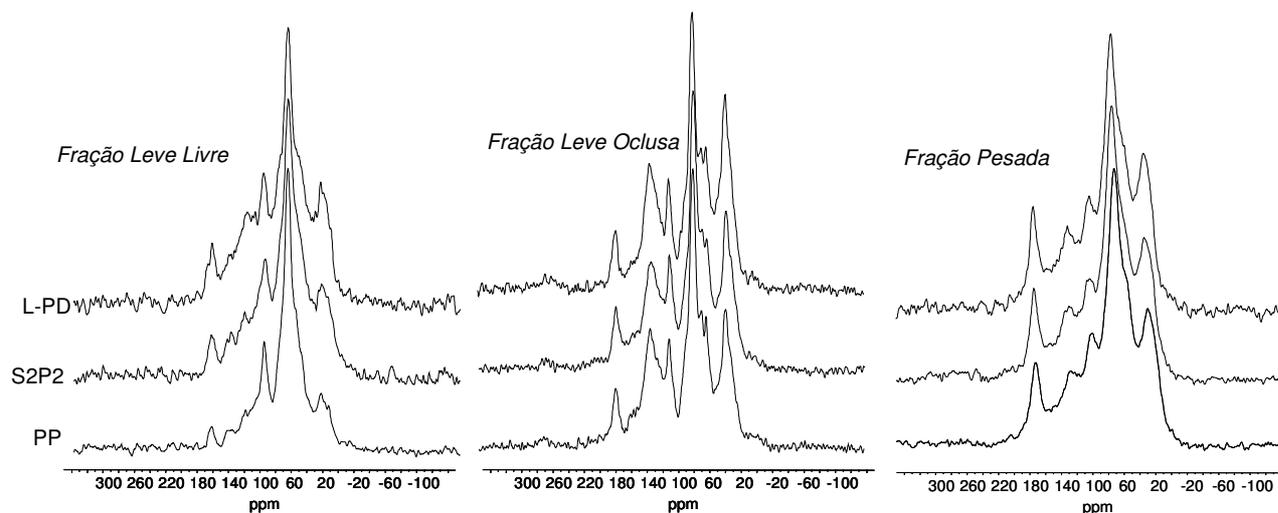
| Sistemas de manejo | C                                | C                              | C O-                      | C alquil      | CO-<br>alquil/<br>C alquil |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------|----------------------------|
|                    | carboxílico<br>(220-<br>160 ppm) | aromático<br>(160-<br>110 ppm) | alquil<br>(110-45<br>ppm) | (45-0<br>ppm) |                            |
| (%)                |                                  |                                |                           |               |                            |
| L-PD               | 10,8 ±<br>0,7 <sup>a</sup>       | 17,5 ±<br>0,1                  | 46,7 ±<br>0,2             | 24,9 ±<br>0,8 | 1,9                        |
| S2P2               | 10,3 ±<br>0,4                    | 16,8 ±<br>0,6                  | 50,2 ±<br>0,4             | 22,8 ±<br>0,6 | 2,2                        |
| PP                 | 10,0 ±<br>0,6                    | 17,0 ±<br>0,4                  | 52,0 ±<br>1,1             | 21,0 ±<br>0,2 | 2,5                        |

L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*.<sup>a</sup> Média ± erro padrão.

Fonte: Adaptado de Boeni (2007).

A avaliação qualitativa das frações densimétricas da MOS amplia as possibilidades de entendimento dos processos de decomposição e da dinâmica dos compostos orgânicos no solo. Assim, Boeni (2007) procedeu à análise pela espectroscopia de RMN das frações leve livre, leve oclusa e pesada, que resultaram nos espectros apresentados na Fig. 10.

Verifica-se que o principal sinal, em todas as situações, foi o correspondente ao grupo C O-alquil, de forma semelhante ao verificado na análise do solo inteiro (Fig. 9). De modo geral, as diferentes frações densimétricas da MOS apresentam os mesmos tipos de carbono, mas em proporções diferentes. A fração leve livre, por ser constituída de material ainda não decomposto ou parcialmente decomposto, mantém as características do material original; neste caso, os resíduos de plantas e organismos. Esta fração não dispõe de nenhum mecanismo adicional de proteção ou de empecilho à ação dos decompositores, sendo esta, função apenas da constituição original do material, ou seja, da recalcitrância molecular. Com a quantificação relativa de cada grupo de carbono, pode-se comparar a composição das frações (Tabela 2), onde verifica-se maior presença de C aromático (mais recalcitrante) e mais C alquil no sistema L-PD em comparação ao sistema PP, estando o sistema S2P2 em posição intermediária, ocorrendo situação inversa quanto ao grupo C O-alquil. Isto possivelmente está relacionado ao fato de que os sistemas contendo pastagens resultam em um intenso aporte de material vegetal (parte aérea e raízes), que constituirão a fração leve livre.



**Fig. 10** - Espectros de RMN  $^{13}\text{C}$  CPMAS das frações densimétricas da MOS, obtidas de amostras da camada 0 a 5 cm de um LVdf, submetido a sistemas de manejo durante nove anos em Dourados, MS. L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*.  
Fonte: Adaptado de Boeni, 2007.

A fração leve oclusa apresenta comportamento similar à leve livre, o que está de acordo com o processo de formação de agregados, com inclusão de fragmentos de plantas, principalmente raízes, no interior destes agregados, mantendo este material em menor contato com microrganismos e outros agentes decompositores. Este processo está visível nessas amostras, por ser tratar de um experimento onde os sistemas estão sendo conduzidos por vários anos, oportunizando a manifestação de forma tão evidente, do processo de agregação do solo e proteção da MOS.

A fração pesada apresenta a mesma tendência das frações mais lábeis, contudo em proporções bem inferiores, uma vez que neste caso é constituída por material altamente decomposto e estabilizado através de interações com os minerais do solo. A taxa de decomposição deste material é muito lenta, não sendo prontamente afetada por praticas de manejo do solo. Ainda assim, o sistema PP apresentou valor superior aos demais sistemas de C do grupo O-alquil demonstrando que as interações organo-minerais podem incluir também formas mais lábeis da MOS.

Considerando a relação C O-alquil/C alquil, como um indicador sensível das alterações qualitativas das frações orgânicas, verifica-se que os sistemas de manejo avaliados podem ser classificados em ordem crescente, da seguinte forma: L-PD > S2P2 e PP.

Tabela 2 - Contribuição relativa de carbono (% de CO total) nas regiões de variação química dos espectros de RMN <sup>13</sup>C CPMAS e a razão C O-alkil/C alquil das frações densimétricas da MOS, na camada de 0-5 cm de um LVdf de Dourados, submetido a sistemas de manejo durante nove anos.

| fração | Sistema de manejo | C (%)                     |                         |                        |                     |                     |
|--------|-------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
|        |                   | carboxílico (220-160 ppm) | aromático (160-110 ppm) | C O-alkil (110-45 ppm) | C alquil (45-0 ppm) | C O-alkil/ C alquil |
| LL     | L-                | 6,9 ±                     | 21,7 ±                  | 53,5 ±                 | 17,9 ±              | 2,99                |
|        | PD                | 0,4 *                     | 1,0                     | 1,1                    | 0,8                 |                     |
|        | S2                | 6,3 ±                     | 18,5 ±                  | 57,8 ±                 | 17,4 ±              |                     |
|        | P2                | 0,3                       | 0,9                     | 1,1                    | 0,8                 |                     |
|        | PP                | 6,2 ±                     | 17,6 ±                  | 62,8 ±                 | 13,4 ±              |                     |
| LO     | L-                | 6,3 **                    | 23,8                    | 45,3                   | 24,6                | 1,84                |
|        | PD                |                           |                         |                        |                     |                     |
|        | S2                | 7,9                       | 23,3                    | 47,8                   | 21,0                |                     |
|        | P2                |                           |                         |                        |                     |                     |
| P      | PP                | 7,1                       | 21,0                    | 52,2                   | 19,8                | 2,63                |
|        | L-                | 10,6 ±                    | 17,2 ±                  | 50,3 ±                 | 21,9 ±              |                     |
|        | PD                | 0,5                       | 0,2                     | 0,2                    | 0,4                 |                     |
|        | S2                | 9,9 ±                     | 16,7 ±                  | 51,7 ±                 | 21,7 ±              |                     |
|        | P2                | 0,4                       | 0,2                     | 0,2                    | 0,4                 |                     |
|        | PP                | 9,6 ±                     | 16,4 ±                  | 53,7 ±                 | 20,3 ±              | 2,64                |
|        |                   | 0,4                       | 0,2                     | 0,2                    | 0,4                 |                     |

*FLL*: fração leve livre; *FLO*: fração leve oclusa; *FP*: fração pesada; *PD*: plantio direto de culturas anuais; *PD2P2*: rotação lavoura-pastagem sob plantio direto (soja no verão e aveia preta no inverno por dois anos, seguido por dois anos de pastagem de *Brachiaria decumbens*); *PP*: pastagem permanente de *Brachiaria decumbens*. \*Média ± erro padrão, proveniente da análise das amostras em triplicata \*\* valores correspondentes a apenas uma repetição por tratamento.

Fonte: Adaptado de Boeni (2007).

## PROTEÇÃO FÍSICA DA MOS

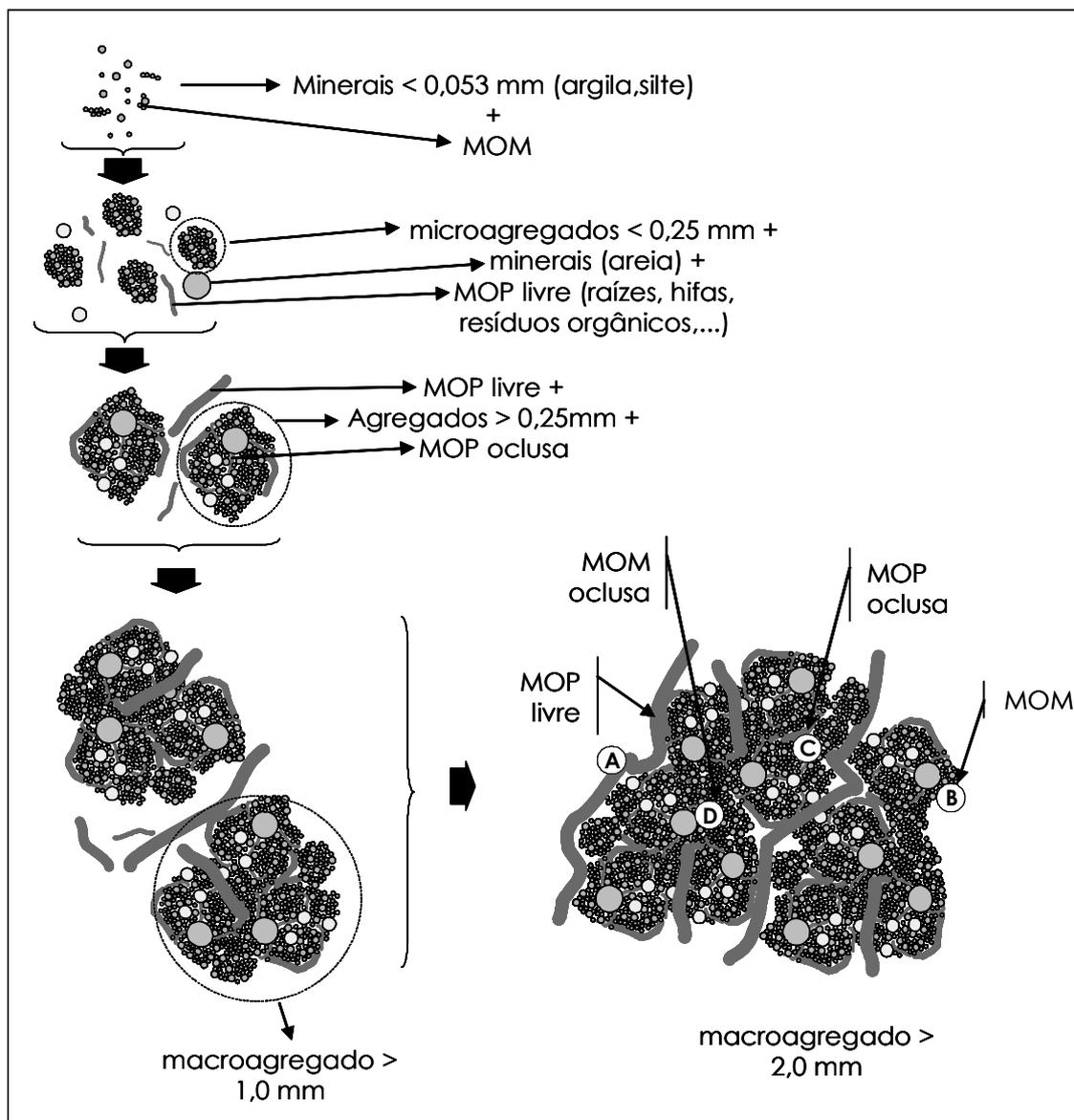
A MOS pode estar fisicamente protegida da decomposição, pela oclusão de material orgânico no interior de agregados do solo, dificultando a acessibilidade de microrganismos e enzimas a estes sítios. Este mecanismo é função do tipo de solo e do manejo adotado, de tal forma que para um mesmo tipo de solo, os sistemas de manejo que favoreçam a formação de agregados pela presença de raízes, resíduos e maior atividade biológica no solo, terão maiores quantidades de MOS protegida fisicamente. O fato da MOS localizar-se e estar protegida dentro de agregados depende da resistência desses agregados, o que está condicionado a sua estabilidade em água e a estresses mecânicos.

A Fig. 11 apresenta um esquema ilustrando o processo de formação de macroagregados, a localização de frações da MOS e o respectivo grau de proteção ao ataque dos organismos decompositores. Para a mesma condição de proteção física, a

recalcitrância do material orgânico e o tipo predominante das ligações entre o material orgânico e fração mineral são os responsáveis pela persistência dos complexos organo-minerais.

A utilização de pastagens pode resultar em maior agregação do solo pelo desenvolvimento do sistema radicular, aporte de material vegetal ao solo e por não necessitar de operações de preparo do solo, que promovem a perda de C do solo pela ruptura dos macroagregados (Six et al., 1999, 2004), mantendo inalterado o interior do solo por maior período de tempo, contribuindo para a formação e existência de agregados maiores, que será mais eficiente quanto maior for o tempo de presença de pastagens. Na formação dos macroagregados pela atividade das raízes, o material orgânico que se encontrava fracamente associado à superfície mineral, passa a ser protegido do ataque da microbiota do solo por estar agora em uma posição de mais difícil acesso de O<sub>2</sub> e portanto com reduzida atividade biológica, sendo desta forma preservado e acumulado no solo (Fig. 11).

Macroagregados formados por processos físicos, através de operações mecânicas de máquinas, equipamentos ou pelo pisoteio de animais podem não ser estáveis. O que confere maior estabilidade aos agregados são agentes cimentantes oriundos de fenômenos biológicos, como a atividade microbiana, liberação de exudatos por raízes, crescimento e funcionamento das raízes, crescimento e morte dos tecidos, entre outros. A estabilidade dos macroagregados, está ligada, principalmente, a ação de agentes transientes (polissacarídeos) e temporários (raízes e hifas), os quais são dependentes de constante abastecimento de C.

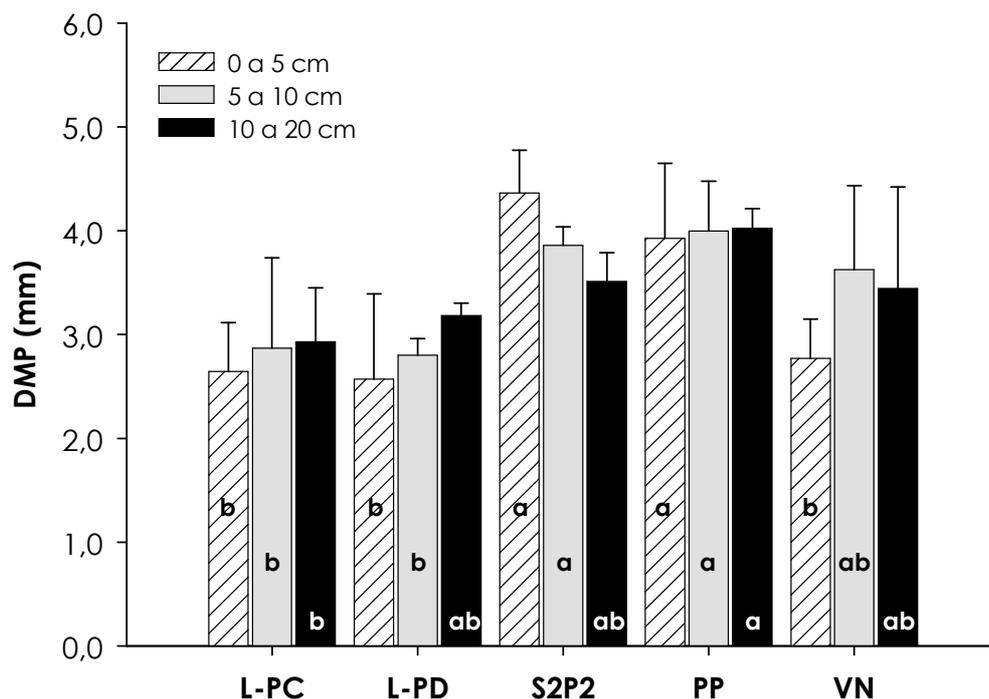


**Fig. 11** - Esquema ilustrando o processo de formação de macroagregados constituídos por partículas minerais e matéria orgânica em diferentes posições, classificada como MOP livre: matéria orgânica particulada livre, MOP oclusa: matéria orgânica particulada oclusa, MOM: matéria orgânica associada aos minerais. As letras indicam a maior suscetibilidade ao ataque pelos microrganismos decompositores, sendo o sítio A o mais suscetível e D o menos suscetível ( $A > B > C > D$ ).

Fonte: Salton (2005).

O tamanho médio dos agregados estáveis em água é avaliado através do diâmetro médio ponderado (DMP), que foi medido para os sistemas de manejo do experimento de Dourados. Nesta avaliação o DMP para os sistemas que incluem pastagens está em torno de 4 mm, significativamente superior aos sistemas que contam apenas com lavouras, tanto em plantio direto como com preparo convencional que apresentam DMP inferior a 3 mm (Fig. 12). A presença de agregados com maior tamanho médio, nos sistemas com pastagens (S2P2 e PP), ocorre em todas as profundidades do solo, sendo maior nas camadas superficiais. A maior existência de macroagregados estáveis pode ser relacionada à

presença e atividade do sistema radicular das plantas e à ausência de revolvimento do solo com gradagens.



**Fig. 12** - Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados estáveis de camadas de um LVdf de Dourados,MS submetido a sistemas de manejo durante nove anos. L-PC = lavouras em sistema convencional, L-PD = lavouras em plantio direto, S2P2 = rotação soja por dois anos/pastagem (*B. decumbens*) por dois anos em plantio direto, PP = pastagem permanente de *B. decumbens*, VN = vegetação natural. Barras verticais indicam valor do desvio padrão da média, letras iguais indicam semelhança para DMS 5% dentro da mesma profundidade.

## SEQÜESTRO DE C

A rotação de lavouras e pastagens em PD pode proporcionar significativa contribuição no seqüestro de carbono, pois além das quantidades armazenadas no solo, deve-se considerar o volume não consumido de formas diretas e indiretas, provenientes do melhor uso de insumos industrializados (adubos, fungicidas, etc) e menor consumo de combustível. Também deve ser considerada a ausência de perdas por erosão, maior produtividade dos cultivos (maior eficiência), melhor qualidade de forragem para os animais e conseqüente maior produtividade animal (menor emissão de metano).

No Brasil, com vastas áreas com lavouras e pastagens, a simples adoção de determinadas práticas pode significar grande quantidade de carbono retirada da atmosfera. Utilizando-se os valores apresentados na Fig. 2 e Fig. 3 pode-se quantificar o potencial de seqüestro de C. Na hipótese de adoção do sistema de rotação soja-pastagem, em apenas em metade da área cultivada com soja na Região Centro-Oeste (~10 milhões de hectares), poder-se-ia atingir cifras de 2,2 Tg de C ano<sup>-1</sup> considerando apenas a camada 0 a 20 cm (5.000.000 ha x 0,43 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Em outra situação possível, pode-se estimar a quantidade adicional de C incorporado ao solo através da melhoria das pastagens, que apresentam taxas de seqüestro em torno de 0,8 Mg de C ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> quando bem manejadas e taxa inferior a 0,4 Mg de C ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> quando em degradação. Ao considerar a adoção de

medidas para melhoria das pastagens (ajuste de carga e adubação) em apenas 1/3 das áreas de pastagem da Região Centro-Oeste, poderia ser atingido 6,0 Tg de C ano<sup>-1</sup> (15.000.000 ha x 0,4 Mg de C ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>). Desta forma, a soma destas duas situações corresponderia à expressiva cifra de 8,8 Tg de C ano<sup>-1</sup>.

Práticas como o PD, rotação de culturas, uso de leguminosas, adubação e manejo de pastagens, entre outras, proporcionam efetiva contribuição para um balanço positivo de carbono. O seqüestro de carbono pelos sistemas agrícolas deve ser considerado como um ganho adicional, decorrente da utilização de tecnologias adequadas cuja principal finalidade é a de produzir de forma sustentável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOENI, M. **Proteção física da matéria orgânica em Latossolos sob sistemas com pastagens na região do Cerrado Brasileiro**. 2007. 136 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. **Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo de carbono**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. 17 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, 12).
- FABRÍCIO, A. C.; SALTON, J. C. **Alterações no teor de matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de produção**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1999. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 7).
- HERNANI, L. C.; BACA, J. F. M.; FABRÍCIO, A. C.; FERNANDES, N. F.; MANZATTO, C. V.; SALTON, J. C. **Dinâmica espaço-temporal do fósforo e da matéria orgânica do solo em agrossistemas**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 83 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 27; Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 72).
- LILIENFEIN, J.; WILCKE, W.; VILELA, L.; AYARZA, M. A.; LIMA, S. C.; ZECH, W. Soil fertility under native Cerrado and pasture in the Brazilian savanna. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1195-1205, 2003.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Carbono e nitrogênio adicionados e sua relação com o rendimento do milho e estoques destes elementos no solo em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 175-187, 2004.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F. A. de O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. Cap. 2, p. 1-9.
- SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 357–363, 2004.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, p 7-31, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p. 1350-1358, 1999.