

Maria Francisca S. Pereira^{1*}

José Novo Júnior²

José Roberto de Sá³

Paulo César F. Linhares³

Francisco Bezerra Neto⁴

José Rivanildo de Souza Pinto²

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 06/01/2013. Aprovado em 10/06/2013.

¹Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Fitotecnia pela UFERSA. Mossoró – RN. mf.agro@yahoo.com.br *

²Engenheiros Agrônomos, Mestrandos em Fitotecnia pela UFERSA. Mossoró – RN.

agrojunior86@hotmail.com / rivanildo.ufersa@gmail.com

³Pesquisadores D.Sc. da UFERSA. Mossoró – RN. paulojitirana@yahoo.com.br / sajrobert@yahoo.com.br

⁴Professor e Pesquisador da UFERSA. Mossoró – RN. bezerra@ufersa.edu.br



Ciclagem do carbono do solo nos sistemas de plantio direto e convencional

RESUMO

O uso do solo em sistemas agrícolas atuam modificando tanto a entrada como a saída de Carbono para a atmosfera, em função da produção diferenciada de resíduos, número de cultivos, das espécies vegetais, da adubação, dos procedimentos de colheita, do preparo do solo e do manejo dos restos culturais. O objetivo de nossa revisão de literatura foi destacar a importância da matéria orgânica no manejo do solo, seu teor, importância dos microrganismos no equilíbrio do solo, mensuração do estoque de carbono e, sua ciclagem nos dois sistemas de manejo do solo (cultivo convencional e plantio direto). Desse modo, a adoção de sistemas de manejo deve ser levada em consideração, entre outros aspectos, quanto ao seu efeito sobre os teores de Matéria Orgânica do solo (MOS). O plantio direto, comparado ao convencional, é o sistema que melhor protege a matéria orgânica do solo, pois funciona à semelhança de um ambiente não perturbado. O carbono é um dos principais componentes da MOS, e os seus estoques irão variar em função das taxas de adição, por resíduos vegetais e, ou, animais, e de perdas, dentre elas, as decorrentes da erosão e da oxidação pelos microrganismos do solo. O ciclo do carbono é perfeito, pois o elemento é devolvido ao meio à mesma taxa a que é sintetizado pelos produtores. Nos solos agrícolas brasileiros, o plantio direto favorece tanto o aumento da biomassa microbiana do solo, quanto o sequestro de carbono, com incrementos de 5,2 a 8,5 Mg C ha⁻¹ superiores ao solo sob preparo convencional.

Palavras-chave: Matéria orgânica, Ciclo do carbono, Sistemas de manejo.

Ciclagem of the carbon of the soil in the systems of direct and conventional planting carrot

ABSTRACT

The use of the soil in agricultural systems acts modifying as much the entrance as the exit of Carbon for the atmosphere, in function of the differentiated production of residues, number of cultivations, of the vegetable species, of the manuring, of the crop procedures, of the preparation of the soil and of the handling of the cultural remains. The objective of our literature revision was to detach the importance of the organic matter in the handling of the

soil, tenor, importance of the microorganisms in the balance of the soil, stock of carbon and, ciclagem in the two systems of handling of the soil (at cultivate conventional and direct planting). This way, the adoption of handling systems should be taken into account, among other aspects, as for its effect on the tenors of Organic Matter of the soil (MOS). The direct planting, compared to the conventional, it is the system that best protects the organic matter of the soil, because it works to the similarity of an atmosphere not disturbed. The carbon is one of the main components of the MOS, and their stocks will vary in function of the addition taxes, for vegetable residues and, or, animals, and of losses, among them, the current of the erosion and of the oxidation for the microorganisms of the soil. The cycle of the carbon is perfect, because the element is returned to the middle to the same tax the one that is synthesized by the producers. In the Brazil agricultural soils, the direct planting favors the increase of the microbial biomass of the soil so much, as the kidnapping of carbon, with increments from 5,2 to 8,5 Mg C ha⁻¹ superiores to the soil under conventional preparation.

Key-words: Organic matter, Cycle of the carbon, Handling system.

INTRODUÇÃO

O uso e o manejo do solo em sistemas agrícolas atuam modificando tanto a entrada como a saída de C do solo para a atmosfera, em função da produção diferenciada de resíduos, do número de cultivos, das espécies vegetais, da adubação, dos procedimentos de colheita, dos métodos adotados de preparo do solo e do manejo dos restos culturais (LAL; BRUCE, 1999). Em sistemas naturais, os fatores de formação do solo são os determinantes primários dos processos de ciclagem de C, uma vez que exercem influência sobre o aporte de resíduos e sobre as saídas de C do solo (STEVENSON, 1994). De acordo com Zinn, Lal e Resck (2005), a conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas envolve uma série de atividades que afetam as taxas de adição e decomposição da matéria orgânica do solo (MOS).

A MOS é um componente fundamental da capacidade produtiva dos solos, por causa dos seus efeitos sobre a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de troca de cátions do solo, a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, a agregação, a infiltração, a retenção de água, a aeração e a atividade e biomassa microbiana. Desse modo, a adoção de sistemas de manejo deve ser levada em consideração, entre outros aspectos, quanto ao seu efeito sobre os teores de MO dos solos (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Dentre os atributos biológicos sensíveis às alterações nos sistemas de manejo do solo e culturas, destaca-se a biomassa microbiana, que representa a parte viva da MOS e contém, em média, de 2 a 5 % do CO e até 5 % do N total nos solos tropicais (SMITH; PAUL, 1990). O C da biomassa microbiana, por ser o destino inicial do C em transformação no solo, apresenta rápida ciclagem, responde a flutuações sazonais de umidade e temperatura

e ao manejo dos resíduos e é o compartimento da MOS que responde mais rápido às mudanças nos sistemas de manejo, podendo ser utilizado, em relação ao teor de CO, como identificador mais precoce de alterações na MOS e na qualidade do solo (POWLSON et al., 1987; ANDERSON; DOMSCH, 1989).

Parte dessa MOS é composta pela matéria orgânica leve (MOL), que é uma fração ativa no solo, constituída por resíduos orgânicos parcialmente humificados em vários estádios de decomposição, com tempo de residência no solo que varia de um a cinco anos (JANZEN et al., 1992). Além de ser constituída, principalmente, de partes de plantas, ela pode apresentar resíduos de animais e microrganismos em diversos estádios de decomposição (PEREIRA et al., 2010).

Em regiões tropicais, as condições de temperaturas elevadas, os altos índices pluviométricos e, em consequência, a intensa atividade microbiana propiciam a rápida decomposição dos materiais orgânicos depositados no solo (SILVA; MACHADO, 2000; MIELNICZUK et al., 2003). As maiores taxas de decomposição da MOS observadas em áreas sob cultivo ocorrem devido às perturbações físicas do solo, que implicam rompimento dos macroagregados (reduz a proteção física da MOS), expondo-a aos processos microbianos, contribuindo, dessa forma, para aumentar as taxas de emissão de CO₂ para a atmosfera (ZINN; LAL; RESCK, 2005).

Segundo alguns autores, o uso de implementos agrícolas no preparo do solo provoca alterações na distribuição e na estabilidade dos agregados, diminuindo a percentagem de macroagregados e aumentando a dos microagregados (COLEMAN et al., 1994; CASTRO FILHO et al., 2002). De acordo com Resck (1993), o plantio direto (PD) é o sistema que melhor protege a matéria orgânica do solo, pois funciona à semelhança de um ambiente não perturbado. Esse autor também verificou reduções acentuadas nos teores de matéria orgânica nas amostras de solo total e nos macroagregados de áreas sob plantio convencional com grade pesada e enxada rotativa.

Sendo assim, o presente trabalho teve por objetivo fazer um levantamento teórico e prático a respeito da ciclagem do carbono do solo, nos sistemas de plantio direto e convencional.

REVISÃO DE LITERATURA

IMPORTÂNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO MANEJO DO SOLO

A matéria orgânica ou adubo orgânico é todo produto proveniente de qualquer resíduo de origem vegetal, animal, urbano ou industrial, composto de carbono degradável, ou ainda, toda substância morta no solo proveniente de plantas, microrganismos, excreções animais, seja da meso ou micro fauna (PRIMAVESI, 1990). A conversão de áreas naturais em áreas de cultivo, com derrubada e queima da vegetação natural, pode reduzir os teores da matéria orgânica do solo (MOS), acarretar a perda de fertilidade e o aumento da erosão (BERNOUX et al., 2004).

Os sistemas de manejo do solo, associados a certas práticas agrícolas, como rotação de culturas e cultivos de cobertura, promovem alterações significativas

na dinâmica da MOS (MORETI et al., 2007; LOSS et al., 2009). Estudos recentes têm destacado o efeito benéfico de plantas de cobertura nas propriedades edáficas e no rendimento de culturas, decorrentes da ciclagem de nutrientes e da decomposição da palhada (TORRES; PEREIRA; FABIAN, 2008).

As perdas de MO em áreas cultivadas adquirem importância, em razão de dois aspectos principais: (a) anualmente, cerca de 1,2 Pg C (Pg, Petagrama = 1015 gramas) são lançados na atmosfera devido a alterações nos sistemas de uso e manejo dos solos agrícolas (SUAERBECK, 2001); e (b) o solo é um dos compartimentos que mais armazenam C na Terra, de modo que, em termos globais, o primeiro metro superior do solo armazena 2,5 vezes mais C que a vegetação terrestre e duas vezes mais C que o presente na atmosfera (LAL, 2002). O estoque de CO no primeiro metro de solo é estimado entre 1.462 e 1.548 Pg, enquanto na profundidade de até dois metros ele varia de 2.376 a 2.456 Pg (BATJES, 1999). Desse modo, em virtude das quantidades de C que armazena, o solo é um dos condicionantes de processos poluentes do ar, tendo em vista que a variação no estoque de C regula os teores desse elemento emitidos para a atmosfera (RANGEL; SILVA, 2007).

Os solos são constituídos de agregados, sendo estes, formados de partículas primárias (argila, silte e areia) e matéria orgânica que se aderem umas às outras (KEMPER; ROSENNEAU, 1986). A presença desses agregados estáveis potencializa a capacidade de armazenamento de água, diminui as perdas de partículas e nutrientes por processos erosivos e facilita a proteção física e o acúmulo da matéria orgânica no solo (MILLER; JASTROW, 1992; FOSTER, 1994). Além disso, os agregados constituem micro-habitats onde os microrganismos do solo encontram nutrientes e ficam protegidos contra a predação e dessecação (MENDES et al., 2003).

De acordo com Tisdall e Oades (1979), a formação e a estabilização de macro (> 0,25 mm) e microagregados (< 0,25 mm) dependem de fatores abióticos (presença de cátions cimentantes, processos físicos relacionados com umedecimento/secagem, congelamento/descongelamento e compactação) e bióticos (manejo de solo, participação mecânica das raízes de plantas e hifas fúngicas, presença de polissacarídeos, substâncias mucilaginosas e húmicas produzidas pelos organismos do solo). O preparo do solo de forma convencional (utilizando implementos agrícolas) provoca alterações na distribuição e na estabilidade dos agregados, diminuindo a percentagem de macroagregados e aumentando a dos microagregados (CASTRO FILHO et al., 2002), expondo assim a matéria orgânica armazenada no seu interior ao ataque dos microrganismos, promovendo sua perda (PEREIRA et al., 1996). Já para Mendes et al. (2003), o manejo sob plantio direto, além de favorecer esses fatores e apresentar maiores teores de matéria orgânica, principalmente na profundidade de 0 a 5 cm, tendem a aumentar a estabilidade dos macroagregados. Esses mesmos autores, estudando as propriedades biológicas em agregados de um latossolo vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no cerrado, verificaram que os teores de matéria orgânica na

soma de agregados e nos macroagregados da área sob PD foram superiores aos do PC.

A maior parte dos estudos relacionados com a agregação do solo concentra-se nas mudanças de estabilidade e de distribuição de tamanho de agregados que ocorrem após o estabelecimento de diferentes sistemas de manejo, os quais têm implicações na acumulação e, ou, na perda de matéria orgânica do solo (DORMAAR, 1983; SIX et al., 2000). A adoção de sistemas de manejo que propiciem um incremento no teor de MOS ou de suas frações pode promover a redução da adsorção de P, pela formação de complexos que bloqueiam os sítios de adsorção na superfície dos óxidos de ferro e de alumínio (TIRLONI et al., 2009). Assim, o uso de plantas de cobertura em SPD pode acarretar aumento dos teores de carbono orgânico total (COT) e MOL e, conseqüentemente, diminuir a adsorção de fosfatos e favorecer os teores de Prem (Fósforo removível) (PEREIRA et al., 2010).

QUANTIFICAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS)

O solo é o receptáculo final dos resíduos orgânicos de origem vegetal, animal e dos produtos das transformações destes. A vegetação é a principal responsável pela deposição de materiais orgânicos no solo, especialmente através da queda de material morto (necromassa) do dossel, de restos culturais formando a serrapilheira ou resteva e da rizodeposição no solo próximo às raízes. O tipo de vegetação e as condições ambientais são os fatores determinantes da quantidade e qualidade do material que cai no solo, determinando heterogeneidade e taxa de decomposição do material depositado na superfície (MOREIRA; SIQUEIRA, 2003).

O estágio de mineralização da matéria orgânica e a incorporação de N à estrutura húmica podem ser avaliados de acordo com a predominância de uma ou outra fração química (PIZAURO JUNIOR; MELO, 1995). Os diversos tipos de fracionamento utilizados em estudos de MOS procuram separar frações homogêneas quanto à natureza, dinâmica e função, mas, ao mesmo tempo, suficientemente diferentes uma das outras. O fracionamento físico-densimétrico da MOS é um ferramenta importante nos estudos que envolvem mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo (CHRISTENSEN, 2000), sendo um procedimento mais sensível, em relação ao fracionamento químico, em verificar alterações em frações da MOS decorrentes da adoção de diferentes sistemas de manejo do solo (ROSCOE; BUURMAN, 2003).

Outra característica importante dos métodos de fracionamento físico é sua natureza menos destrutiva e mais relacionada com a função e estrutura da MOS in situ (CHRISTENSEN, 2000; ROSCOE; MACHADO, 2002). O uso desse fracionamento nos estudos da MOS possibilita a separação de diferentes compartimentos orgânicos, cada qual respondendo, de forma distinta, às diferentes práticas de uso e manejo do solo (FREIXO et al., 2002). Em regiões temperadas, esse procedimento tem sido usado com maior frequência nos estudos que avaliam os compartimentos e a biodisponibilidade da MOS, sendo, desse modo, premente o uso dessa ferramenta nas

condições de solos brasileiros, já que a MO desempenha aqui papel mais importante do que o exercido em solos de regiões mais frias.

Os estoques de matéria orgânica do solo são determinados pela razão entre as quantidades de carbono C adicionadas (k_1A) e perdas (k_2C), sendo sua variação temporal (dC/dt) expressa pela equação $dC/dt = -k_2 C + Ak_1$. Nesta equação, A representa o C fotossintetizado adicionado anualmente ao solo na forma de resíduos vegetais, exsudatos radiculares e raízes ($Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) e C representa o estoque de carbono orgânico total (COT) no solo ($Mg\ ha^{-1}$). Os coeficientes k_1 e k_2 representam, em base anual, respectivamente, a fração do C adicionado (A), efetivamente retido no solo na forma de matéria orgânica, e a fração do COT do solo, que é perdido por decomposição microbiana, erosão e lixiviação (DALAL; MAYER, 1986).

O uso do solo para fins agrícolas interfere na adição de C (A) pela seleção de sistemas de culturas com capacidades variadas de adição de fitomassa ao longo do ano. Normalmente, sistemas com pousios, culturas de baixa produtividade, queima ou remoção de resíduos culturais apresentam baixo valor anual de A. Em situação oposta, encontram-se os sistemas intensivos, com presença de culturas altamente produtivas durante todo ano e retorno dos resíduos ao solo. O coeficiente k_1 normalmente é pouco afetado pelas práticas de manejo. No entanto, a forma de adição do C ao solo pode ter influência nos valores de k_1 , sendo os maiores valores observados para o C adicionado pelo sistema radicular (BOLINDER et al., 1999). Neste contexto, culturas com sistema radicular abundante e agressivo, como gramíneas forrageiras perenes, que alocam uma maior fração do C fotossintetizado para as raízes do que culturas anuais (SHAMOOT et al., 1968), serão mais eficientes em aumentar os estoques de COT do solo (LOVATO et al., 2004).

A taxa de perda da matéria orgânica (k_2) é bastante influenciada pelo revolvimento do solo, o qual estimula a ação dos microrganismos decompositores. Em um mesmo solo, o revolvimento pode duplicar o valor de k_2 em relação a um sistema de manejo sem revolvimento (BAYER et al., 2000c), sendo esse efeito menos pronunciado em solos de textura argilosa e com mineralogia oxidada. Em síntese, um sistema de manejo que objetiva recuperar estoques de COT do solo deve maximizar as entradas (k_1A) e minimizar as perdas (k_2C) anuais de C no solo. Sendo ambos componentes da matéria orgânica, a dinâmica do N no solo é intimamente associada à dinâmica do C, apenas alterando os mecanismos de adição e de perda dos elementos no sistema (BAYER et al., 2000a,b).

MICRORGANISMOS E SUA IMPORTÂNCIA PARA O EQUILÍBRIO DO SOLO

Os organismos, com destaque aos microrganismos heterotróficos, obtêm energia para o seu desenvolvimento pela decomposição de resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo, liberando CO_2 para atmosfera, nutrientes, e uma gama de compostos orgânicos secundários oriundos do metabolismo microbiano, os

quais passam a compor a matéria orgânica do solo (VEZZANI, 2001).

A matéria orgânica interage com minerais no solo formando complexos organominerais por meio de diversos mecanismos de interação, resultando em partículas secundárias de diversos tamanhos e formas (TISDALL; OADES, 1982). As plantas, pela ação do seu sistema radicular (SILVA; MIELNICZUK, 1997), e as hifas de fungos (MILLER; JASTROW, 1990) potencializam estas interações na formação de agregados estáveis, principalmente pela aproximação de partículas, exsudações bem distribuídas na matriz do solo e união física de agregados de diferentes tamanhos. As interações com os minerais e a formação de agregados diminuem a ação dos microrganismos decompositores, contribuindo para o acúmulo de compostos orgânicos no solo. Dentre os processos de proteção física da matéria orgânica, destaca-se o não revolvimento dos solos (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 1999).

Dependendo da magnitude do fluxo de carbono propiciado pelo subsistema vegetal, haverá maior ou menor atividade biológica, produção de compostos orgânicos secundários, agregação do solo e aparecimento de outras propriedades emergentes do sistema solo. De modo geral, as propriedades emergentes do ciclo do C no solo (teor de matéria orgânica, agregação, porosidade, infiltração de água, retenção de água, aeração, CTC, balanço de N, dentre outras) melhoram a qualidade do solo (VEZZANI, 2001).

O aumento da população e da diversidade de microrganismos no solo é considerado pela Agroecologia como uma estratégia importante na sanidade e estabilidade do agroecossistema. Uma grande diversidade de microrganismos no solo proporciona uma maior competição por fontes de nutrientes e nichos e altera a dinâmica predador/presa, ajudando a limitar as populações de bactérias, fungos e nematóides fitoparasitas (MAGDOFF, 2002).

Pelo que se observa, as diferentes condições de cultivo empregadas para quantificar o número de bactérias do solo devem-se ao fato de haver uma diversidade microbiana, sendo praticamente impossível permitir que todos os microrganismos cresçam em uma única situação de cultivo (KENNEDY. GEWIN, 1997). E, diferentes condições de crescimento permitem diferentes respostas de contagem (VIEIRA; NAHAS, 2000).

Os microrganismos exercem papel fundamental na formação de substâncias húmicas, seja pela síntese de produtos (TATE III, 1987), de enzimas que catalisam processos de polimerização, ou pela participação em etapas de processos que ocorrem em múltiplos estádios até a formação de ácido húmico e fúlvico (STEVENSON, 1985).

QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO

A quantificação do estoque de carbono no solo é feita em base volumétrica para uma determinada profundidade do solo e normalmente é expressa em $Mg\ C\ ha^{-1}$, sendo $1\ Mg = 1\ megagrama$ ou $1\ tonelada\ métrica$. O carbono orgânico do solo está presente na matéria orgânica viva, que corresponde a menos de 4% do

carbono orgânico total do solo e na matéria orgânica morta, que corresponde à maior parte do carbono orgânico total do solo (cerca de 98%). O carbono da matéria orgânica viva (CMOV) subdivide-se no carbono presente nos microrganismos (60-80% do CMOV), consistido principalmente de fungos e bactérias, nos macrorganismos (15-30% do CMOV) consistido, por exemplo, por minhocas, ácaros e térmitas terrestres e, finalmente, nas raízes (5-10% do CMOV). Quanto ao carbono da matéria orgânica morta (CMOM), o carbono se subdivide na matéria macrorrgânica, ou seja, resíduos vegetais recém adicionados ao solo e no húmus (80-90% do CMOM), que consiste de substâncias não húmicas (30% do carbono do húmus) representadas pelos ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ex. ácido cítrico, ácido ftálico, ácido malônico) e substâncias húmicas (70% do carbono do húmus) representadas pelos ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas. Quanto ao carbono inorgânico representado pelos carbonatos no solo, devido à grande maioria dos solos brasileiros apresentarem reação ácida ($\text{pH}_{\text{água}} < 6,0$) sua participação é insignificante, estando presente em ambientes restritos como os solos da região semiárida do Brasil. Apesar do CMOV estar presente em proporção bem menor que o CMOM as importâncias se igualam, pois os micro e macrorganismos, pelas suas atividades no solo, se constituem num dos principais fatores responsáveis pelas transformações do CMOM, resultando em acúmulo ou perdas (na forma de CO_2) de carbono orgânico do solo. O estoque de carbono de um solo sob vegetação natural representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização. As taxas de adição e a qualidade do carbono da vegetação dependem muito do clima (principalmente temperatura do ar e chuvas), do tipo de vegetação (gramíneas decompõem-se mais lentamente que plantas leguminosas) e da fertilidade do solo (solos férteis resultam em plantas maiores que contêm, por sua vez, mais carbono a ser depositado no solo). Os resíduos de plantas (ex. folhas, galhos, frutos) que caem sobre o solo são gradualmente alterados por meio da fragmentação física, interações entre a fauna do solo e microrganismos e formação de húmus. Os processos de decomposição e taxas de transformação (do inglês "turnover rate" = quantidade de carbono em determinado compartimento do solo dividido pela taxa de adição anual de carbono para este compartimento) são fortemente influenciados pelo clima, tipo e qualidade da matéria orgânica, associações químicas e físicoquímicas da matéria orgânica com os componentes minerais do solo e pela localização da matéria orgânica no solo. Sabe-se que os componentes de uma planta morta são sujeitos ao ataque de macrorganismos (ex. coró, térmitas do solo, minhocas) e, em seguida ou simultaneamente, sofrem decomposição microbiana no solo. Sabe-se também que diferentes componentes das plantas se decompõem a diferentes taxas. Por exemplo, açúcares simples e proteínas são decompostos rapidamente em questão de horas ou alguns dias. Por outro lado, ligninas e suberinas demandam muito mais tempo para serem decompostas. A taxa de mineralização da matéria orgânica em regiões temperadas (ex. Europa Central) é de aproximadamente 2% e nos trópicos úmidos (ex. Amazônia) é de 4 a 5%. Por outro lado, a produção de biomassa, ou seja, de vegetação, é

maior nos trópicos úmidos. Os três principais processos responsáveis pelo sequestro de carbono nos solos são a humificação, agregação e sedimentação. Ao mesmo tempo, os processos responsáveis pelas perdas de carbono no solo são a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação (SILVA; MENDONÇA, 2007) (FIGURA 1).

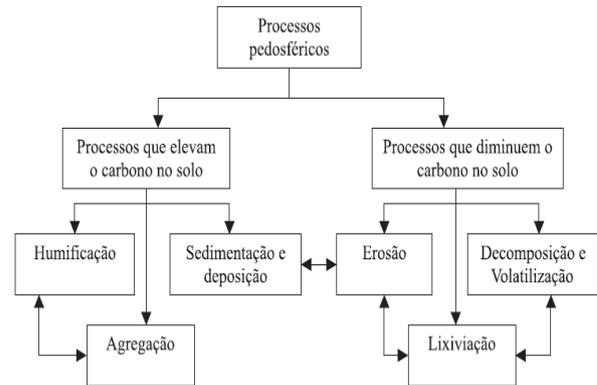


Figura 1. Principais processos no solo que influenciam o conteúdo de carbono no solo.

A agregação do solo (união de partículas de areia, silte e argila para formar pequenos torrões estáveis ao impacto da gota de chuva), realizada pela ação de hifas de fungos e substâncias orgânicas provenientes das raízes das plantas ou dos produtos da decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos, vem sendo enfatizada como um dos fatores mais importantes para o sequestro de carbono no solo. Em solos brasileiros também foi observado que a adoção do plantio direto favoreceu a agregação do solo, aumentando, conseqüentemente, o acúmulo de carbono (FIGURA 2).

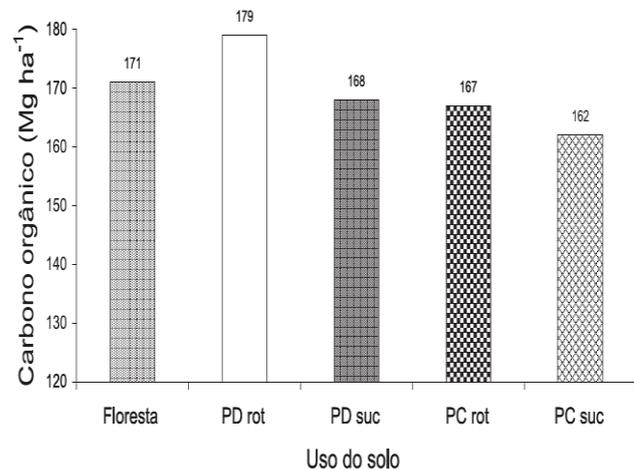


Figura 2. Estoque de carbono orgânico a 100 cm de profundidade de solo sob floresta e após 13 anos sob cultivo de grãos em sistema plantio direto (PD) e convencional com aração e gradagens (PC) em sucessão (suc; trigo-soja) e rotação (rot; trigo-soja-aveia soja-ervilhaca-milho).

Ainda para Machado (2005), a quantificação do estoque de carbono do solo consiste essencialmente em dois passos: 1. Amostragem de solo no campo para análise de carbono total e densidade do solo; 2. Determinação de carbono total em amostras e quantificação dos estoques

em Mg C ha^{-1} . A densidade do solo (ρ , g cm^{-3}), antigamente denominada de densidade aparente ou global do solo, corresponde à massa de solo seco por unidade de volume, ou seja, o volume do solo ao natural, incluindo os espaços porosos. A coleta de amostras de solos no campo e determinação da densidade do solo é essencial para se calcular a massa ou o estoque de carbono total do solo a partir da concentração de carbono total do solo (C; g C kg^{-1} solo). Na quantificação do estoque de carbono há necessidade de se estabelecer a profundidade do solo a que se refere o estoque. Assim, o cálculo do estoque de carbono (EC; Mg C ha^{-1}) para uma determinada profundidade (p, cm) dá-se da seguinte maneira:

$$EC = C \times p \times \rho / 10$$

CICLAGEM DO CARBONO NOS SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

Ciclo do carbono (C)

Os quatro principais compartimentos de carbono na Terra são: oceanos, atmosfera, formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral e ecossistemas terrestres (biota + solo). Na Figura 3, observa-se uma representação esquemática dos diferentes compartimentos, com seus estoques e respectivos fluxos. Constata-se que o maior compartimento de carbono na Terra é aquele presente no oceano (38000 Pg C), seguido do compartimento presente nas formações geológicas (5000 Pg C). O carbono das formações geológicas consiste de 4000 Pg C presentes no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural. O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C). O carbono orgânico representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para as águas profundas e, finalmente, para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido (0,4 Pg C) ou para a atmosfera via atividade microbiana como dióxido de carbono em solos aerados ou metano em solos saturados com água. Entretanto, pouco se sabe sobre valores precisos de perdas de carbono do solo para a atmosfera (MACHADO, 2005).

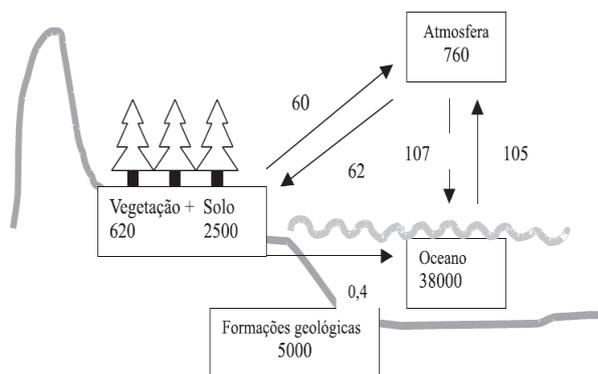


Figura 3. Ciclo global do carbono com estoques (em Pg C = 1015 g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano⁻¹).

O reservatório de carbono é a atmosfera, onde o nutriente das plantas encontra-se na forma de dióxido de carbono (CO_2), um gás que, nas condições naturais de temperatura e pressão é inodoro e incolor. O carbono é o principal constituinte da matéria orgânica (49% do peso seco). O ciclo do carbono é perfeito, pois o elemento é devolvido ao meio à mesma taxa a que é sintetizado pelos produtores. As plantas utilizam o CO_2 e o vapor de água da atmosfera para, na presença de luz solar, sintetizar compostos orgânicos de carbono, hidrogênio e oxigênio, tais como a glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). A fixação do carbono em sua forma orgânica indica que a fotossíntese é a base da vida na Terra; A energia solar é armazenada como energia química nas moléculas orgânicas da glicose; A energia armazenada nas moléculas orgânicas é liberada no processo inverso ao da fotossíntese: a respiração. Nesta, ocorre a quebra das moléculas com a consequente liberação de energia para a realização das atividades vitais dos organismos. Por meio da fotossíntese e da respiração, o carbono passa de sua fase inorgânica à fase orgânica e volta para a fase inorgânica, completando seu ciclo. Fotossíntese e respiração são processos de reciclagem do carbono e do oxigênio em várias formas químicas em todos os ecossistemas (GUEDES, 2009).

Os teores de C em formas orgânicas do solo estão diretamente ligados à sua interação com a biosfera. Por meio dos produtos da fotossíntese ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energia} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$), grande parte de C entra no solo. A fotossíntese, realizada pelos organismos autotróficos, é um processo muito importante para manter o equilíbrio de CO_2 na atmosfera e o ciclo do C na Terra. Estima-se que a produção primária total (PPT) global de C pelo processo de fotossíntese seja cerca de 120 Gt ano^{-1} de C ($1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ t}$). A entrada de C no solo está relacionada, principalmente com o aporte de resíduos da biomassa aérea e radicular das plantas, liberação de exsudados radiculares, lavagem de constituintes solúveis da planta pela água da chuva e transformação desses materiais carbonados pelos macro e microrganismos do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007).

O C é componente básico dos carboidratos, lipídeos, proteínas, DNA, e outros compostos orgânicos necessários para vida. O ciclo do carbono (Figuras 4 e 5) baseia-se no gás carbônico (CO_2), que compõe 0,038 % do volume da troposfera e também está dissolvido na água. O dióxido de carbono é um componente-chave do termostato da natureza. Se o ciclo do carbono remove muito CO_2 da atmosfera, ela esfria; se o ciclo gera um excesso de CO_2 , a atmosfera esquenta. Portanto, mesmo pequenas alterações nesse ciclo podem afetar o clima e, consequentemente, as formas de vida que existem na Terra. Os produtos terrestres removem o CO_2 da atmosfera; os aquáticos o removem da água; em seguida eles utilizam a fotossíntese para convertê-lo em carboidratos complexos, como a glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). As células nos produtores que consomem oxigênio, nos consumidores e decompositores, realizam, então, a respiração aeróbica. Tal processo quebra a glicose e outros compostos orgânicos complexos e converte o carbono novamente em CO_2 na atmosfera ou

físicos do solo e com o teor de MO, mostrando-se adequado como indicador da qualidade física do solo.

Plantio direto

Nos anos 70, devido aos sérios problemas de degradação das terras pela erosão, foi introduzido no Sul do Brasil o sistema plantio direto, que consistia em instalar lavouras de milho, trigo e soja sem necessidade de preparo do solo. Os agricultores, motivados pelos menores riscos envolvidos no plantio direto em relação à agricultura convencional, adotaram o novo manejo do solo que combate eficazmente a erosão. Em 2005, o Brasil ocupava 17 milhões de ha (40% da área sob agricultura de plantas anuais). O sistema plantio direto (SPD) é um exemplo de uso da terra para a agricultura nas regiões tropicais úmidas e sub-tropicais que propicia segurança alimentar com baixo impacto ambiental, principalmente quanto à erosão (perda de solo) e favorecendo o sequestro de carbono no solo. Sequestro de carbono no solo significa transformar o carbono presente na atmosfera (na forma de CO₂) em carbono estocado no solo, compondo a matéria orgânica do solo (MACHADO, 2005).

A adoção do plantio direto como sistema de uso e manejo de solos implica na manutenção dos restos vegetais na sua superfície, o que lhe proporciona cobertura suficiente para dissipação da energia cinética das gotas de chuva e barreiras para o escoamento superficial das águas, diminuindo a degradação das terras pela erosão. Já num sistema convencional de uso dos solos, com aração e gradagem antecedendo cada cultivo, há maior suscetibilidade ao escoamento superficial das águas, com arraste de partículas, provocando a degradação das terras, que será tão intensa quanto for à erosão (RHEINHEIMER et al., 1998).

Esse sistema de manejo da terra apresenta uma série de vantagens (TABELA 1), destacando-se: O aumento do acúmulo de nutrientes na superfície devido à localização dos fertilizantes e das menores perdas por erosão (MUZILLI, 1983), eleva ou ao menos mantém os teores de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, reduz as perdas de nutrientes via imobilização por microrganismos e libera gradualmente nutrientes (AMADO et al., 1999). Isto ocorre de acordo com o tipo e qualidade do material adicionado à superfície, com a sequência de culturas adotada (MENGEL, 1996) e com a forma de cultivar o solo e o tempo de adoção destas práticas. Os resíduos liberam carbono, nitrogênio e outros componentes simples durante o processo de decomposição, dos quais parte retorna à atmosfera na forma de gás (CO₂, NH₃, etc.), outra parte é imobilizada pelos microrganismos decompositores, pequena parte permanece na forma prontamente disponível para as plantas e o restante é perdido por lixiviação ou direcionado à produção de substâncias húmicas (STEVENSON, 1985).

Nesse sentido, mudanças no sistema de cultivo refletem na biomassa microbiana do solo, que corresponde por grande parte da dinâmica de decomposição do material orgânico.

Quando há pouca mobilização do solo, existe tendência de menor disponibilidade de nutrientes pela redução da mineralização dos resíduos vegetais e aumento da imobilização pela biomassa microbiana (VARGAS; SCHOLLES, 1998). Segundo Anderson e Domsch (1980), a quantidade de nutrientes de plantas retida nos tecidos microbianos é substancial, atingindo 2,5 % do carbono total e 5 % do nitrogênio total do solo. Para Mendes et al. (2003), o sistema de PD favorece um aumento da biomassa microbiana do solo, comparativamente a solos sob PC. Vários estudos demonstraram a eficácia do SPD no sequestro de carbono em solos agrícolas brasileiros, principalmente para as camadas superficiais do solo (0-20 cm), com incrementos de 5,2 a 8,5 Mg C ha⁻¹ superiores ao solo sob preparo convencional (MACHADO, 2005).

Os restos vegetais que permanecem no solo após a colheita têm menor taxa de mineralização no sistema plantio direto (SPD), a qual, associada a maiores adições de carbono e nitrogênio, eleva seus teores no solo (BAYER et al., 1995), comparativamente ao sistema convencional (SPC). Com isso, aumenta a atividade biológica, resultando no incremento de substâncias húmicas, especialmente ácidos húmicos e fúlvicos (CERETTA, 1995), podendo-se refletir sobre algumas propriedades físico-químicas, como a capacidade de troca de cátions e as formas de fósforo.

Todavia, nos primeiros anos após a adoção do sistema plantio direto sobre cultivo convencional anterior, pode ocorrer diminuição na disponibilidade de nitrogênio, aumentando a necessidade de adubação para as culturas. Mas, a partir de 4 a 5 anos, quando o sistema se estabiliza, há aportes de nitrogênio orgânico de até 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹, como observado por Bayer et al. (1995), e então, as respostas à adubação nitrogenada são menores nesse sistema do que no convencional. Por outro lado, a adição de fertilizantes nitrogenados amoniacais, associada à mineralização dos resíduos orgânicos na superfície do solo, provoca uma frente de acidificação com abaixamento do pH a partir da camada superficial, porém sem alterar a saturação por bases nem aumentar a toxidez de alumínio, possivelmente por causa da diminuição de sua atividade, pela maior presença de compostos orgânicos (SALET, 1994).

Rheinheimer et al. (1998), avaliando as modificações no ponto de efeito salino nulo (PESN), nas frações de substâncias húmicas, nas cargas negativas, na acidez e na disponibilidade de nutrientes do solo submetido ao SPD, comparativamente ao SPC, verificaram que o solo da camada de 0-5 cm sob SPD apresentou maiores teores de carbono em ácidos fúlvicos e húmicos, maiores quantidades de cargas negativas, acidez potencial e disponibilidade de P, K e N, comparativamente ao SPC.

Tabela 1. Benefícios potenciais das culturas de cobertura do solo.

	Interferências	Benefícios à comunidade de cultura
Impactos na estrutura do solo	Favorecimento da penetração das raízes; proteção da superfície do solo contra a luz do Sol, vento e o impacto físico das gotas de chuva; adição de matéria orgânica ao solo; favorecimento da atividade biológica na zona das raízes	- Melhora da infiltração de água - Redução na formação de crosta de solo - Redução do escoamento - Menor erosão do solo - Estabilidade maior dos agregados do solo - Aumento da percentagem de macroporos - Redução da compactação do solo - Redução da densidade bruta
Impactos na fertilidade do solo	Criação de <i>habitats</i> de superfície e de subsuperfície mais úmidos; fixação de nitrogênio pela bactéria <i>Rhizobium</i> ; fixação de carbono (biomassa maior); captação de nutrientes pelas raízes	- Aumento do conteúdo de matéria orgânica - Retenção de nutrientes no sistema - Prevenção de perda por lixiviação - Aumento do conteúdo de nitrogênio - Maior diversidade de biota benéfica no solo
Impactos sobre organismos-praga	Adição de compostos alelopáticos; remoção de recursos (luz e nutrientes) necessários às ervas adventícias; criação de <i>habitat</i> para predadores, parasitas e parasitóides benéficos; modificação do microclima	- Inibição de ervas adventícias por alelopatia - Supressão competitiva de ervas adventícias - Controle de patógenos do solo por aleloquímicos - Aumento da presença de organismos benéficos - Supressão de organismos-praga

Fonte: Altieri e Nicholls (2003).

CONCLUSÕES

1. O uso e o manejo do solo em sistemas agrícolas atuam modificando tanto a entrada como a saída de C do solo para a atmosfera;
2. A biomassa microbiana representa a parte viva da MOS e o C dela por ser o destino inicial do C em transformação no solo, apresenta rápida ciclagem;
3. O C é componente básico dos carboidratos, lipídeos, proteínas, DNA, e outros compostos orgânicos necessários para vida. O seu ciclo baseia-se no gás carbônico (CO₂), que compõe 0,038 % do volume da troposfera e também está dissolvido na água;
4. Se o ciclo do carbono remove muito CO₂ da atmosfera, ela esfria; se o ciclo gera um excesso de CO₂, a atmosfera esquentada.
5. O homem vem interferindo massivamente no fluxo global de carbono e a agricultura convencional, embasada no uso de arados e grades para o preparo do solo para a semeadura, contribui para as perdas de carbono do solo;
6. O plantio direto é um sistema de produção agrícola que reverte esta situação, combatendo eficazmente a erosão e contribuindo significativamente para o sequestro de carbono no solo;
7. Diferente das reservas de carbono fóssil, o carbono do solo não é permanente e pode, a curto ou longo prazo, se transferir para a atmosfera. Assim, não pode compensar na totalidade as emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis.
8. Pelo solo ser o maior compartimento de carbono nos ecossistemas terrestres e poder estocar carbono pela agricultura conservacionista (ex. sistema plantio direto), a humanidade pode, com o uso adequado do solo, retardar ou amenizar os impactos negativos das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M.; NICHOLLS, C. **O papel da biodiversidade no manejo de pragas**. São Paulo: Holos editora, 2003. 321p.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V.; BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade do milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.23, p.679-686, 1999.
- ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. **Soil Science**, v.130, p.211-216, 1980.
- ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v.21, p. 471-479, 1989.
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GIROUX, M.; LAVERDIÈRE, M.R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant Soil**, v.215, p.85- 91, 1999.
- BATJES, N. **Management Options for Reducing CO₂-Concentrations in the Atmosphere by Increasing Carbon Sequestration in the Soil**. International Soil Reference and Information Centre: Wageningen, 1999.
- BAYER, C.; AMADO, T.J.C.; FERNANDES, S.V.; MIELNICZUK, J. Teores de carbono e nitrogênio total em um solo Podzólico-Vermelho-Escuro submetido 9 anos a diferentes sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25. Viçosa, 1995. **Resumos...** Viçosa, SBCS, 1995. p.2036-2038.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.21, p.105-112, 1997.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil & Tillage Research**, v.3, p. 95-104, 2000a.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v, 24, p. 599-607, 2000c.
- 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 & Tillage Research**, v. 54, p. 101-109, 2000b.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. **Dinâmica e função da matéria orgânica**. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2 ed. METRÓPOLE: Porto Alegre, 2008. 636 p.
- BETTIOL, W. controle biológico de doenças do filoplano. In. BETTIOL, W. (Org.). **Controle biológico de doenças de plantas**. Jaguariúna: EMBRAPA CNPMA, 1991, cap. 4, p.33-52.
- BRAGA, B. et al. Introdução à engenharia ambiental. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005, 628p.
- CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a Red Latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 65, p. 45-51, 2002.
- CERETTA, C. A. **Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistema de culturas sob plantio direto**. 127f. 1995. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- CHRISTENSEN, B.T. **Organic matter in soil: Structure, function and turnover**. In: PLANT production. Tjele, p. 95, 2000.
- COLEMAN, D.C.; HENDRIX, P.F.; BEARE, M.H.; CROSSLEY, D.A.; HU, S.; VLIET, P.C.J.V. **The impacts of management and biota on nutrient dynamics and soil structure in sub tropical agroecosystems: Impacts on detritus food webs**. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R.; GRACE, P. R., eds. Soil biota management in sustainable farming systems. Austrália, CSIRO, 1994. p.133-143.
- CUNHA, E. Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. 1- Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 35, p. 589-602, 2011.
- DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Aust. J. Soil Res.**, v. 24, p. 281-292, 1986.
- DORMAAR, J. F. Chemical properties of soil and water-stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat. **Plant Soil**, v. 75, p. 51-61, 1983.
- FOSTER, R. C. **Microorganisms and soil aggregates**. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R.; GRACE, P. R., eds. Soil biota: management in

- sustainable farming systems. East Melbourne, CSIRO, 1994. p.144-155.
- FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; SILVA, C. A.; FADIGAS, F. S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 26, p. 425-434, 2002.
- GUEDES, I. M. R. **Mudanças climáticas globais e a produção de hortaliças**. 1. ed. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2009, 132p.
- 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 Science Society of America Journal**, v. 56, p. 1799-1806, 1992.
- KEMPER, W. D.; ROSENEAU, R. C. **Aggregate stability and size distribution**. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis, 1. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.425-442.
- KENNEDY, A. C.; GEWIN, V. L. Soil microbial diversity: present and future considerations. **Soil Science**, v.162, p. 607-617, 1997.
- LAL, R. The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. **Adv. Agron.**, v. 74, p. 155- 192, 2002.
- LAL, R.; BRUCE, J. P. The potential do world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. **Environ. Science Pollut.**, v. 2, p. 177-185, 1999.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.68-75, 2009.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 28, p. 175-187, 2004.
- MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V. S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um latossolo vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 27. p. 435-443, 2003.
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. **Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo**. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p. 209-248. 2003.
- MAGDOFF, F. Qualidade e manejo do solo. In: ALTIERI, M. **Agroecologia: bases para uma agricultura sustentável**. Guaíba: Agropecuária, 2002, p.520-542.
- MILLER, R. M.; JASTROW, J. D. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. **Soil Biol. Biochem.**, v. 22, p. 579-584, 1990.
- MILLER, R. M.; JASTROW, J. D. **The role of mycorrhizal fungi in soil conservation**. In: BETHLENFALVAY, G.J.; LINDERMAN, R. G., eds. *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, 1992. p.29-44.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo. 1 ed. UFLA: Lavras, 2003. p. 191.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 7, p. 95-102, 1983.
- MORETTI, D.; ALVES, M. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; CARVALHO, M. P. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, p.167-175, 2007.
- PEREIRA, I. S.; RESCK, D. V. S.; GUEDES, H. M.; SILVA, J. E.; CASTRO, L. H. R. Efeito de diferentes sistemas de manejo na distribuição de macro e microagregados e no teor de carbono orgânico em Latossolo Vermelho-Escuro na região dos Cerrados, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., Brasília, 1996. Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados. **Anais...** Planaltina, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1996. p.367 371.
- PEREIRA, M.: G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 508-514, 2010.
- PIZAURO JÚNIOR., J. M.; MELO, W. J. Influência da incorporação da parte aérea de sorgo ou lablabe nas frações da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 19, p. 95-103, 1995.
- POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in the total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology Biochemic**, v.19, p.159-164, 1987.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 9. ed. São Paulo: Nobel, 1990. p.549.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Minas Gerais, v.31. p.1609-1623. 2007.

RESCK, D.V.S. Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos nas propriedades do solo. In: ENCONTRO DE ROTAÇÃO DE CULTURAS, 2., Campo Mourão., 1993. Ata. Campo Mourão, 1993. p. 117-143.

RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, E.J.S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 713-721, 1998.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil Till. Res.**, v. 70, p. 107-119, 2003.

SALET, R.L. **Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto**. 110f. 1994. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SAUERBECK, D.R. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture: Perspectives and limitations. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, v. 60, p. 253-266, 2001.

SHAMOOT, S.; MacDONALDS, L.; BARTHOLOMEW, W. V. Rhizodeposition of organic matter debris in soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 32, p. 817-820, 1968.

SILVA, C.A.; MACHADO, P.L.O.A. **Sequestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: Estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2000. 23p. (Documentos, 19).

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 21, p. 113-117, 1997.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. **Matéria orgânica do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. 1 ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa, 2007. p. 276-374.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 63:1350-1358, 1999.

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOT, E.T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: distributon of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 64, p. 681-689, 2000.

SMITH, J.L.; PAUL, E.A. **The significance of microbial biomass estimations**. In: BOLLAG, J. M; STOZKY, G., eds. Soil biochemistry. New York, Marcel Decker, 1990. p. 357-396.

SOUZA, E.D. et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavourapeçuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, p. 1829-1836, 2009.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: John Wiley & Sons, 1985. p.167-78.

TATE III, R. L. **Humic and fulvic acids: formation and decomposition**. In: TATE III, R. L., ed. Soil organic matter: biological and ecological effects. New York: John Wiley & Sons, 1987. p.147-164.

TIRLONI, C.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J. O.; TIRLONI, D.; COIMBRA, D. S. Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 977-984, 2009.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal Soil Reserch**, v. 17, p. 429- 441, 1979.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and waterstable aggregates in soils. **Jounal Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 421-428, 2008.

VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo sob diferentes sistemas de manejo, estimado por métodos de fumigação. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 22, p. 411-7, 1998.

VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIEIRA, F.C.S.; NAHAS, E.; Quantificação de bactérias totais e esporuladas no solo. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 3, p. 539-545, 2000.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 84, p. 28-40, 2005.