

REVISÃO DE LITERATURA

POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO EM DIFERENTES BIOMAS DO BRASIL⁽¹⁾

João Luis Nunes Carvalho⁽³⁾, Junior Cesar Avanzi⁽²⁾, Marx Leandro
Naves Silva⁽⁴⁾, Carlos Rogério de Mello⁽⁵⁾ & Carlos Eduardo
Pellegrino Cerri⁽⁶⁾

RESUMO

O solo é um importante compartimento de C e exerce papel fundamental sobre a emissão de gases do efeito estufa e consequentes mudanças climáticas globais. Mudanças no uso e manejo do solo podem causar tanto efeito negativo como positivo no que se refere à emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Entretanto, atualmente tem sido constatada a intensificação do aquecimento global, causado pelo aumento das emissões dos gases responsáveis pelo efeito estufa, oriundos principalmente da queima de combustíveis fósseis, do desmatamento e do uso inadequado do solo para agricultura. O uso e manejo inadequado do solo, além de contribuir para o efeito estufa, ainda traz problemas relacionados à sua sustentabilidade devido à degradação da matéria orgânica do solo, o que atinge negativamente os seus atributos físicos e químicos, bem como sua biodiversidade. Por outro lado, práticas adequadas de manejo, que visam à manutenção ou mesmo o acúmulo de C no sistema solo-planta, podem atenuar os efeitos do aquecimento global. Essas práticas de manejo podem ser: implementação de sistemas de plantio direto, recuperação de pastagens degradadas, implantação de sistemas integrados de cultivo, reflorestamento de áreas marginais, uso de espécies que tenham alta produção de biomassa, eliminação de queimadas, entre outras. O objetivo desta revisão foi avaliar algumas das principais fontes de gases do efeito estufa relacionadas à agricultura e mudança do uso da terra e, ainda, apresentar estratégias para mitigar tais emissões e aumentar o sequestro de C no sistema solo-planta, em três dos principais biomas do Brasil.

Termos de indexação: uso da terra, emissão de gases do efeito estufa, estoque de carbono no solo, aquecimento global.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em maio de 2008 e aprovado em dezembro de 2009.

⁽²⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Caixa Postal 9, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: jlncarva@esalq.usp.br

⁽³⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 3037, CEP 37200.000 Lavras (MG). E-mail: javanzi@gmail.com

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. E-mail: marx@ufla.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Engenharia, UFLA. E-mail: crmello@ufla.br

⁽⁶⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. E-mail: cepcerri@esalq.usp.br

SUMMARY: POTENTIAL OF SOIL CARBON SEQUESTRATION IN DIFFERENT BIOMES OF BRAZIL

Soil is an important pool for C stocks and plays a fundamental role in greenhouse gas emissions and consequently in climatic changes. Land use change can cause either a negative or a positive effect in terms of greenhouse gas emissions to the atmosphere. However, the intensification of global warming has been confirmed, related mainly to the increase of greenhouse gas emissions from burning of fossil fuel, deforestation, and adoption of inadequate agricultural land management practices. An inadequate soil use does not only contribute to intensified greenhouse effects but also creates problems related to soil sustainability due to the degradation of soil organic matter, which negatively reflects on soil physical and chemical attributes, as well as on its biodiversity. On the other hand, best management practices that maintain or even increase soil organic matter contents can minimize the effects of global warming. Examples of such management practices are no-tillage, rehabilitation of degraded pasture, reforestation of marginal lands and elimination of the burning activity among others. The aim of this review was to evaluate some of the main greenhouse gas sources related to agriculture and land use change, to present strategies to mitigate these emissions and to increase C sequestration in the soil-plant system, in three of the main biomes of Brazil.

Index terms: land use change, greenhouse gas emissions, soil carbon stocks, global warming.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tem sido crescente a preocupação mundial em relação às mudanças do clima no planeta, decorrentes, principalmente, das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa (GEE), como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O).

O efeito estufa natural ocorre devido às concentrações de GEE na atmosfera antes do aparecimento do homem. A energia solar de comprimento de onda curto ultrapassa a atmosfera terrestre sem interação com os GEE presentes nessa camada. Ao atingir a superfície terrestre, a energia é refletida e volta para a atmosfera com um comprimento de onda mais longo (infravermelho), que interage parcialmente com os GEE nesta camada. Parte dessa irradiação é absorvida na atmosfera, aumentando consequentemente a temperatura média do ar. Essa interação permite que a temperatura média da atmosfera terrestre seja de 15 °C, promovendo o chamado “efeito estufa natural”, essencial para a existência da vida no planeta. Caso não houvesse esses gases na atmosfera, a temperatura média da Terra seria 33 °C menor, ou seja, -18 °C, o que inviabilizaria a vida atualmente existente.

Nas últimas décadas, as atividades antrópicas têm provocado uma série de alterações na paisagem terrestre e, mais recentemente, na atmosfera. O aumento da emissão de GEE e o consequente aquecimento global do planeta vêm acarretando a busca por estratégias que visem à redução das fontes desses gases. Sabe-se que alguns sistemas agrícolas

ou condições de manejos adotados podem potencializar ou mitigar a emissão de GEE para a atmosfera. Essas propostas, por sua vez, devem ser tratadas de maneira globalizada, já que todos os países contribuem para a emissão de GEE e todos deverão sofrer suas consequências. As principais estratégias para mitigar a emissão de GEE resultantes de atividades antrópicas consistem na menor utilização de combustíveis fósseis, redução das taxas de desmatamento e de queima de material vegetal, uso inadequado do solo e, por fim, estratégias de maximização do sequestro de C no solo e na vegetação.

Estimativas apontam que as conversões de ecossistemas nativos para agrossistemas, somadas à agricultura, contribuem atualmente com aproximadamente 24 % das emissões mundiais de CO₂, 55 % das emissões de CH₄ e 85 % do total das emissões de N₂O para a atmosfera (IPCC, 2007). No Brasil, as emissões de GEE oriundas da mudança de uso da terra e agricultura são bem mais acentuadas percentualmente, representando cerca de 75, 91 e 94 % do total de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, respectivamente (Cerri & Cerri, 2007). A análise da contribuição da agricultura e das mudanças no uso da terra, de um ecossistema nativo para um agrossistema, no aquecimento global são mais difíceis de ser quantificadas, pois os GEE são provenientes de fontes difusas e sistemas mais complexos. Desconsiderando essa mudança no uso da terra e o setor agrícola, o Brasil situa-se em 17º lugar na classificação mundial dos países maiores emissores de GEE; entretanto, se estes dois setores forem considerados, o País ocupará a incômoda quinta posição (Cerri et al., 2007a).

De todo o C orgânico no solo, uma parte considerável encontra-se na forma de matéria orgânica do solo (MOS). Entretanto, o material orgânico no solo é facilmente decomposto quando se realizam práticas de manejo não conservacionistas, causando agravamento no efeito estufa, devido à liberação de GEE, como CO₂, CH₄ e N₂O (Cerri et al., 2007a). Por outro lado, o aumento do estoque de MOS é um processo lento e necessita de um manejo adequado, notadamente em regiões de clima tropical, onde a taxa de decomposição é mais acentuada devido às altas temperaturas e umidade do solo (Six et al., 2002). Nesse sentido, estimativas indicam que para elevar o teor de MOS de 3 para 4 %, em um sistema que recebe 2 Mg ha⁻¹ de resíduo por ano, são necessários 100 anos aproximadamente (Moreira & Siqueira, 2006).

Nesse contexto, este trabalho visou levantar os principais aspectos, do ponto de vista agrícola, ligados diretamente ao efeito estufa, bem com analisar os diversos usos da terra e manejos de culturas em alguns biomas do Brasil, que podem constituir alternativas para minimizar o aquecimento global do planeta.

Emissões de gases de efeito estufa

O efeito estufa é causado, principalmente, pela emissão de CO₂, CH₄, N₂O, clorofluorcarbonos (CFCs) e vapor d'água. Entre eles, o CO₂ é o gás que mais contribui para o efeito estufa, devido à grande quantidade que é emitida – cerca de 55 % do total. Por sua vez, a quantidade de CH₄ emitida para atmosfera é bem menor, mas seu potencial de aquecimento é 23 vezes maior que o de CO₂. Embora as concentrações de N₂O e de CFCs na atmosfera sejam menores ainda, o poder de aquecimento global desses gases é muito superior, sendo, respectivamente, em torno de 298 e de 6.200 a 7.100 vezes maior que o de CO₂ (Cerri et al., 2007a).

A concentração de CO₂ e de outros GEE tem aumentado drasticamente desde a revolução industrial. Desde 1750, aproximadamente 35 % das emissões antrópicas de CO₂ estão diretamente relacionadas às mudanças do uso da terra (Foley et al., 2005). Ao longo de 250 anos, a concentração de CO₂ aumentou de 280 para 390 ppmv (partes por milhão em volume) no final da década passada e, atualmente, aumenta a uma taxa estimada de 2,2 ppmv ano⁻¹, equivalente a um incremento de 3,3 Pg ano⁻¹ de C (IPCC, 2007); alguns autores citam uma taxa de aumento de 3,5 Pg ano⁻¹ de C (Albrecht & Kandji, 2003). A concentração de CH₄ na atmosfera aumentou cerca de 150 %, variando de 700 para 1.745 ppbv (partes por bilhão em volume) nesse mesmo período, e vem aumentando a uma taxa de 7 ppbv ano⁻¹. A concentração de N₂O na atmosfera aumentou cerca de 16 % (de 270 para 320 ppbv) e sua taxa de aumento é de 0,8 ppbv ano⁻¹ (IPCC, 2007). Desse modo, fica evidente a elevação da concentração desses GEE na atmosfera e a necessidade de medidas para mitigar essas emissões.

O aumento da concentração de GEE na atmosfera devido às atividades antrópicas elevou a temperatura média do globo em 0,6 °C no século passado (Scarpinella, 2002) e, atualmente, exibe a taxa de aquecimento de 0,21 °C a cada década (IPCC, 2007). Entretanto, alguns cientistas preveem aumentos da ordem de 5,8 °C para os próximos 100 anos (IPCC, 2007). Aumentos dessa ordem na temperatura do planeta estão acima do nível crítico considerado por Lal (2004). Esse autor afirma que aumentos acima de 0,1 °C por década seriam críticos para os ecossistemas, ou seja, em incrementos de temperatura superiores a esse, os ecossistemas não seriam capazes de se reajustarem às novas condições.

Impactos do aquecimento global na agricultura

As mudanças climáticas devido ao aumento da emissão de gases pelo homem causam modificações no regime hídrico e na temperatura global, influenciando diretamente a produtividade das culturas. Simulações sugerem que nas regiões de clima tropical haverá reduções mais acentuadas na produção agrícola (IPCC, 2001, 2007).

No entanto, alguns estudos têm demonstrado que o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera não é totalmente nocivo para algumas plantas cultivadas (Siqueira et al., 2001; Streck, 2005). Segundo esses estudos, o aumento da diferença de CO₂ entre a planta e a atmosfera adjacente também aumentaria a taxa fotossintética e a produtividade de algumas plantas cultivadas. Streck (2005) compilou vários trabalhos que demonstraram que as plantas, de modo geral, aumentaram sua produção em 28 % em relação ao controle (concentrações atuais de CO₂ na atmosfera). Realizando uma estratificação do aumento na produção dessas plantas, os autores observaram incremento na ordem de 23, 32, 42, 52 e 54 % para frutíferas, cereais de ciclo fotossintético C3, folhosas, tubérculos e leguminosas, respectivamente.

Considerando o dobro da concentração de CO₂ na atmosfera (700 ppmv) e nenhuma mudança na temperatura do ar, incrementos na produção de plantas com ciclo fotossintético C3 podem chegar a até 30 %, e nas plantas de ciclo C4, na ordem de 10 %. Contudo, um pequeno aumento na temperatura (menos de 1 °C) poderá anular os benefícios resultantes do aumento da concentração de CO₂ sobre o rendimento das culturas (Streck, 2005). Simulações indicam que um aumento médio na temperatura de 3 a 5 °C e na precipitação pluvial de 11 % pode resultar em redução na ordem de 30 e 16 % sobre as produções de trigo e de milho, respectivamente. Por outro lado, quando se avaliou a cultura da soja, foi observado aumento de 21 % na produção (Siqueira et al., 2001). Estudo realizado em Santa Maria, RS, simulando aumentos na concentração de CO₂ para 700 ppmv e incrementos de temperatura (2, 3, 4, 5 e 6 °C), mostrou aumento na produtividade do trigo quando a temperatura foi

umentada em até 3 °C. Já para o milho, incremento de temperatura superior a 2 °C anulou o efeito do aumento da concentração de CO₂. A cultura da soja foi a que mais resistiu ao aumento de temperatura, observando-se redução no rendimento apenas com um aumento de temperatura de 6 °C (Streck & Alberto, 2006).

Desse modo, mesmo existindo alguns benefícios referentes à maior concentração de CO₂ na atmosfera, o aumento da temperatura resultante da maior concentração desse GEE pode resultar em inúmeras injúrias às plantas, impedindo um ganho efetivo de produtividade (Siqueira et al. 2001; Streck, 2005; Streck & Alberto, 2006).

Reservatórios de carbono na biosfera terrestre e sequestro de carbono no solo

O armazenamento de C no globo terrestre é dividido principalmente em cinco compartimentos: oceânico, geológico, pedológico (solo), biótico (biomassa vegetal e animal) e atmosférico. Todos esses compartimentos estão interconectados, e o C circula entre eles (Lal, 2004). O maior reservatório é o geológico (a crosta terrestre), com cerca de 90.000.000 Pg de C (Sundquist, 1993). Apesar dessa grande quantidade, a maior parte desse C geológico não participa da ciclagem, a não ser uma pequena fração, a qual constitui um reservatório de 5.000 Pg de C, compreendendo em carvão 4.000 Pg, óleo e gás, ambos com 500 Pg de C (Lal, 2004). Segundo esse autor, no compartimento oceânico há em torno de 38.000 Pg de C, principalmente na forma inorgânica. O reservatório pedológico contém 2.500 Pg de C, divididos em 1.550 Pg na forma de C orgânico e 950 Pg de C inorgânico (Lal, 2006). O reservatório biótico apresenta cerca de 560 Pg de C (Lal, 2004). Já o compartimento atmosférico está entre os que apresentam a menor quantidade de C armazenada: cerca de 760 Pg (Lal, 2004). Entretanto, isso não o torna de menor importância, devido ao seu efeito no tocante às mudanças climáticas.

Estima-se que a quantidade de C estocada no solo até um metro de profundidade esteja em torno de 1.576 Pg, distribuídos em 12,8 bilhões de hectares, nos continentes (Eswaran et al., 1993), o que equivale a cerca de três vezes a quantidade de C no reservatório biótico e duas vezes a quantidade contida na atmosfera terrestre. Quando se consideram apenas os 30 cm superficiais de solo, o estoque de C está em torno de 800 Pg (Cerri et al., 2006a), ou seja, quase a mesma quantidade armazenada no compartimento atmosférico. Estima-se que a metade do C estocado no solo – cerca de 787 Pg – seja referente aos solos sob florestas (Dixon et al., 1994), enquanto as áreas sob pastagens contêm cerca de 500 Pg (Scharpenseel, 1997), e as sob cultivo agrícola, 170 Pg de C (Paustian et al., 2000).

Em regiões de clima tropical, as condições climáticas favorecem a decomposição da MOS, armazenando menos C em relação a regiões de clima

temperado. Apesar dessa maior taxa de decomposição de MOS, os solos em regiões de clima tropical estocam 32 % do total de C orgânico contido nos solos do planeta (Eswaran et al., 1993).

Historicamente, a diminuição na quantidade de MOS tem contribuído com 78 Pg de C para a atmosfera na forma de CO₂, devido às mudanças no uso da terra e agricultura. Por outro lado, solos submetidos a manejos conservacionistas podem acumular valores na ordem de 30 a 60 Pg de C num período de 25 a 50 anos de cultivo (Lal, 2004), podendo assim recuperar praticamente todo o C perdido em curto período de tempo.

A emissão de CO₂ do solo para a atmosfera ocorre principalmente por dois processos biológicos: a decomposição de resíduos orgânicos e a respiração de organismos e sistema radicular das plantas. No solo, o CO₂ se movimenta por meio da difusão, de uma região de maior concentração para outra de menor concentração, e, por fluxo de massa, o CO₂ move-se junto com o ar ao qual está misturado (Ball & Smith, 1991). A concentração de CO₂ nos poros do solo é significativamente maior do que na atmosfera, na ordem de 10 a 100 vezes (Moreira & Siqueira, 2006). Esse fato está associado à atividade respiratória no solo, sendo a respiração radicular responsável por 20 % desse aumento na concentração de CO₂, e os 80 % restantes são oriundos da atividade biológica do solo (Melillo et al., 2002). A diferença de potencial entre o solo e a atmosfera cria um fluxo ascendente de CO₂ (Ball & Smith, 1991).

As variáveis climáticas influenciam diretamente o fluxo de CO₂ para a atmosfera, e seus principais condicionantes são a temperatura (solo e atmosfera) e a umidade do solo (Duiker & Lal, 2000). A temperatura merece destaque especial no fluxo de CO₂, uma vez que acréscimos podem elevar exponencialmente a taxa de respiração do solo (Fang & Moncrieff, 2001). Em razão de as massas de ar que circulam no planeta possuírem diferentes temperaturas, o fluxo de CO₂ no globo terrestre também é diferenciado; em regiões mais quentes as emissões serão superiores.

POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO EM DIFERENTES BIOMAS DO BRASIL

Estimativas realizadas para todo o território do Brasil (8,5 milhões de km²) mostraram estoques de C na ordem de 39, 52, 72 e 105 Pg, respectivamente para as camadas de 0–30, 0–50, 0–100 e 0–200 cm de solo, o que corresponde aproximadamente a 40 % de todo o C armazenado nos solos da América Latina (Bernoux & Volkoff, 2006).

Entretanto, alguns sistemas de uso e manejo da terra em diferentes biomas do Brasil, como o sistema de plantio direto (SPD), o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) sob plantio direto, a adoção de

reflorestamentos, o manejo das pastagens, a colheita de cana-de-açúcar, entre outros, podem alterar consideravelmente os estoques de C e a emissão de GEE do solo para a atmosfera e, conseqüentemente, ser importante no que se refere à mitigação do aquecimento global do planeta. A seguir serão apresentadas algumas fontes de GEE relacionadas à agricultura e mudança do uso da terra e as estratégias para mitigar essas emissões e aumentar o sequestro de C no sistema solo-planta, em três dos principais biomas do Brasil.

Bioma Amazônia

Estimativas indicam que a taxa de desmatamento na Amazônia brasileira é de 1,1 a 2,9 Mha ano⁻¹ (Cerri et al., 2007b). Apesar dessa elevada taxa de desmatamento, a Amazônia, no Brasil, possui ainda aproximadamente 40 % da área remanescente de floresta tropical no mundo (Laurance et al., 2001).

Atualmente, as queimadas na região amazônica são apontadas como a maior responsável pela emissão de GEE no Brasil. Por sua vez, Cerri et al. (2006b) compilaram vários estudos disponíveis na literatura, mostrando alguns sistemas de uso e manejo da terra na Amazônia que podem atuar no sequestro de C na vegetação e no solo.

De acordo com Fearnside & Barbosa (1998), 45 % das áreas desmatadas na Amazônia estão sob pastagens, correspondendo a uma área de 24,7 Mha. Esses autores relatam que essas áreas podem sequestrar C no solo (pastagem bem manejada) ou emitir (pastagem degradada) para a atmosfera, dependendo do manejo adotado. Pesquisas avaliando a conversão de vegetação nativa em pastagens bem manejadas têm demonstrado aumento no estoque de C no solo em função do tempo de implantação das forrageiras na região amazônica. Acúmulos de C no solo na ordem de 2,7 a 6,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ têm sido relatados em pastagens bem manejadas (Moraes et al., 1996; Neill et al., 1997; Bernoux et al., 1998; Cerri et al., 1999, 2003). Em ecossistemas de vegetação rasteira, como as pastagens, a morte das raízes representa a principal fonte de C para o solo (Moreira & Siqueira, 2006). O uso de gramíneas forrageiras possui alta capacidade de aumentar o estoque e distribuir o C na subsuperfície do solo (Paustian et al., 2000). A elevada entrada de biomassa e a ausência de revolvimento do solo são as principais razões para essa maior quantidade de C acumulada no solo.

Cerri et al. (2006b), analisando diversos estudos da literatura, mostraram que aproximadamente dois terços das pastagens analisadas na Amazônia exibiram incremento no estoque de C em solo em relação à vegetação nativa. Assim, considerando que aproximadamente 20 % das pastagens nessa região são bem manejadas (5 Mha), o aumento do estoque de C nessa situação é de 1,35 Tg ano⁻¹ de C. Se toda essa área fosse convertida para uma pastagem bem manejada, com uma taxa de acúmulo de 0,27 Mg ha⁻¹

ano⁻¹ de C na camada de 0 a 30 cm, segundo Cerri et al. (2006b), a Amazônia brasileira poderia acumular aproximadamente 3,5 Tg C ano⁻¹. Contudo, apesar da conversão de floresta para pastagem bem manejada resultar em aumentos do estoque de C do solo, é importante ressaltar a importância da vegetação nativa no que se refere ao sequestro de C no sistema solo-planta-atmosfera. Estimativa realizada por Dias Filho et al. (2001) demonstra que a conversão de floresta amazônica em pastagens pode emitir para atmosfera cerca de 100 a 200 Mg ha⁻¹ de C, em função do processo de desmatamento e queima da biomassa aérea.

Segundo estimativas de Cerri et al. (2006b), a floresta amazônica no Brasil teria um potencial de sequestrar C da ordem de 421 a 470 Tg ano⁻¹; desse total, cerca de 30 % (126 a 141 Tg ano⁻¹ de C) seria acumulado pelo solo, e os 70 % restantes (295 a 329 Tg ano⁻¹ de C), devido à biomassa aérea. Essa estimativa, somada a diversas outras disponíveis na literatura, deixa clara a grande importância de se evitar o desmatamento e, conseqüentemente, mitigar as emissões de GEE para a atmosfera. Fearnside (2001) já ressaltava que uma grande contribuição do setor florestal brasileiro na mitigação do efeito estufa não está somente no sequestro de C, mas também na manutenção dos estoques atuais de C, ou seja, evitar a emissão de CO₂ por meio da degradação acelerada ou queima do material orgânico.

Bioma Cerrado

O Cerrado consiste em uma área sob plena expansão da fronteira agrícola no Brasil, cobrindo aproximadamente 200 Mha (Bustamante et al., 2006), cerca de 23 % do território nacional. Estimativas indicam uma taxa de conversão de vegetação nativa do Cerrado de 1,1 % ao ano, o que equivale a 2,2 Mha ano⁻¹ (Machado et al., 2004). Segundo esses autores, apenas 34 % da região encontra-se em estado natural, e estimativas indicam que até 2030 esta área será de apenas 2,0 Mha. Estudos indicam que a derrubada e queima da vegetação nativa, seguida de cultivo do solo no processo de conversão do Cerrado em agrossistema, resulta em redução dos estoques de C do solo e aumento da emissão de GEE para a atmosfera (Franchini et al., 2007; Smith et al., 2008).

Atualmente, o bioma Cerrado apresenta mais de 12 Mha cultivados com lavouras anuais (Bayer et al., 2004); destes, mais de 7 Mha são cultivados no sistema de plantio direto (SPD) (APDC, 2007). No Cerrado, o incremento ou a manutenção da MOS é dificultada devido às condições climáticas e às irregularidades na distribuição de precipitação pluviométrica (Machado & Silva, 2001). A manutenção da palha na superfície do solo, somada à ausência de revolvimento do solo, princípios básicos da adoção do SPD, além de reduzir a emissão de CO₂ para a atmosfera, atua no aumento do estoque de C no solo, trazendo ainda outros benefícios às culturas, como: aumento da diversidade

microbiana, melhoria da fertilidade e dos atributos físicos do solo (Six et al., 2002; Foley et al., 2005) e, ainda, uma expressiva redução na erosão hídrica (Mello et al., 2003). Além desses benefícios nas características físico-químicas do solo, o SPD diminui o risco e o custo da produção agrícola, pelo menor uso de fertilizantes, de pesticidas e de combustível (Machado & Silva, 2001), o que também resulta em menor emissão de GEE para a atmosfera.

A rotação de culturas, outro princípio básico do SPD, aumenta a biodiversidade do solo, devido à adição de diversos materiais orgânicos, permitindo maior diversidade de espécies da biota do solo. Essa maior biodiversidade também é capaz de absorver e acumular mais C em relação a ambientes de menor biodiversidade (Lal, 2004).

Em estudo realizado na região do Cerrado por Corazza et al. (1999), verificou-se que a adoção do SPD e as implantações de florestas plantadas e de pastagem aumentaram o estoque de C em relação ao Cerrado original (Quadro 1). Os aumentos foram devido à maior taxa de adição de C ao solo, sendo resultante do aumento de produtividade primária do ecossistema causado pelo menor revolvimento do solo. No mesmo estudo, quando foi avaliado o sistema de cultivo convencional, utilizando grade pesada durante 12 anos, verificou-se perda de 8,3 Mg ha⁻¹ de C, em relação ao Cerrado nativo. Por outro lado, o SPD com 15 anos de implantação acumulou 21,4 Mg ha⁻¹ de C.

Em estudo similar, realizado por Silva (2001), foi verificado que após cinco anos de implantação do SPD, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, o estoque de C aumentou a uma taxa de 1,44 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Em uma recente revisão de literatura, avaliando as alterações dos estoques de C entre SPD e cultivo convencional, Bernoux et al. (2006) observaram taxas de acúmulo de C variando de 0,4 a 1,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a região do Cerrado, quando avaliaram a camada de 40 cm de solo. A ausência de operações de cultivo no SPD resulta em menor taxa de decomposição, favorecendo a manutenção e acúmulo da MOS no solo

sob Cerrado (Bayer & Mielniczuk, 1999; Resck et al., 2000; Green et al., 2007) e garantindo, assim, o fluxo contínuo de substrato e energia para os organismos do solo (Roscoe, 2005), tendendo para o aumento dos estoques de C no solo (Carvalho et al., 2009).

Bayer et al. (2006), avaliando a taxa de acúmulo de C em áreas sob SPD no Cerrado, com a sucessão de cultivos soja/milho, reportaram taxas anuais de acúmulo de C de 0,30 e 0,60 Mg ha⁻¹ em solos sob Cerrado com textura média e argilosa, respectivamente. Carvalho et al. (2009), em um recente estudo, observaram acúmulo de C de 0,38 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na sucessão de cultivos soja/milho. Por outro lado, Roscoe & Buurman (2003) não observaram acúmulo de C no SPD quando comparado com o cultivo convencional em um Latossolo muito argiloso no Cerrado brasileiro. O acúmulo de C pode variar regionalmente devido às condições climáticas, ao tipo de solo (Bayer & Mielniczuk, 1999), ao manejo aplicado e, principalmente, em função do tempo de implantação do SPD (Carvalho et al., 2009).

Em áreas onde o Cerrado foi convertido recentemente para uso agrícola, a taxa anual de acúmulo de C pode ser resultante de uma série de fontes, como: (a) C derivado do material orgânico remanescente da vegetação nativa; (b) C derivado da decomposição do sistema radicular do Cerrado; (c) uma terceira fonte de C para solo é aplicação de calcário no solo; (d) por fim, a última fonte para o solo corresponde ao C introduzido pelos resíduos culturais das plantas cultivadas (Carvalho et al., 2009).

Estimativas com modelo de simulações realizadas por Bustamante et al. (2006) mostraram que o máximo de incremento que o SPD pode acumular nos estoques de C no solo é de 1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, o que representaria um potencial de acúmulo de C na ordem de 6,5 Tg ano⁻¹ de C.

Apesar de a implantação do SPD em substituição ao cultivo convencional no Cerrado ser um importante mecanismo que pode atuar como fonte e dreno de GEE da atmosfera, existem outras importantes mudanças

Quadro 1. Estoques de C, taxas de acúmulo e perdas na camada de 1 m de profundidade no solo sob Cerrado e sob outros usos e manejo da terra (modificado de Corazza et al., 1999)

Sistema de uso	Estoque de C no solo	Variação em relação ao Cerrado nativo		
		Estoque de C no solo	Tempo	Taxa de acúmulo ou perda
	Mg ha ⁻¹		Ano	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Cerrado	133	-		
Eucalipto	148	+ 15	12	+ 1,25
Pastagem cultivada	150	+ 17	18	+ 0,94
Grade pesada	125	- 8	12	- 0,67
Arado de disco	128	- 5	15	- 0,33
Plantio direto	155	+ 22	15	+ 1,47

de uso da terra que podem alterar significativamente as variações nos estoques de C do solo (Quadro 1) e a emissão de GEE para atmosfera.

A conversão de um solo sob Cerrado em pastagens pode resultar em aumentos ou reduções no estoque de C do solo, dependendo do manejo aplicado a essa forrageira. Em uma compilação de estudos da literatura, Bustamante et al. (2006) observaram que a conversão de Cerrado para pastagem, em média, acumula $1,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C, com amplitude de $-0,9$ a $3,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C, e associaram discrepância nos resultados ao manejo adotado. Esse manejo de pastagem engloba tanto o manejo adequado do solo como o manejo da forrageira. De acordo com esses autores, se toda a área degradada de pastagens no Cerrado (24 Mha) fosse recuperada com melhoria de manejo, tanto do solo como da forrageira, resultaria numa taxa estimada de acúmulo de C no solo de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o que resultaria em acúmulo de 36 Tg ano^{-1} de C.

Atualmente, no bioma Cerrado vem aumentando significativamente a adoção de sistemas integrados de cultivo, como a ILP, os quais vêm exibindo considerável potencial de acúmulo de C no solo. No Brasil, a ILP sempre foi utilizada, o que é uma técnica nova é a introdução desse sistema no âmbito do SPD (Paulino et al., 2006).

Esses sistemas de ILP podem ser adotados com finalidades distintas, variando desde o ponto de vista da produção agrícola como da pecuária. A ILP, quando realizada em sistemas de produção de grãos e fibras, tem como principais objetivos a formação e manutenção de palhada para sustentabilidade ao SPD. De acordo com Kluthcouski et al. (2006), a utilização de gramíneas perenes em ILP, como as braquiárias, seja em consorciação, sucessão ou rotação com culturas anuais, pode minimizar a degradação do solo em razão do efeito benéfico dessas gramíneas nos atributos físicos deste e, ainda, resultar em aumento do estoque de C do solo e consequente redução das emissões de GEE para a atmosfera.

Estudos realizados na região do Cerrado têm demonstrado incremento nos estoques de C do solo em sistemas de ILP sob plantio direto, quando comparados aos de áreas sob SPD sem a presença de forrageira na rotação ou sucessão de cultivos. Salton (2005), avaliando as taxas de acúmulo de C em diferentes sistemas de uso e manejo da terra no Cerrado, observou que os maiores estoques de C estão relacionados com a presença de forrageiras, resultando na seguinte ordem decrescente de estoques de C no solo: pastagem permanente > ILP sob plantio direto > lavoura em SPD > lavoura em cultivo convencional. Esse autor observou que as taxas de acúmulo de C no solo nas áreas de ILP sob plantio direto, em relação a lavouras sob SPD, foram de $0,60$ e $0,43 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente para estudos na região de Dourados e Maracaju. Resultados preliminares de Carvalho et al. (2009) na região do Cerrado indicam que a taxa de

acúmulo de C na conversão do sistema de SPD para ILP sob plantio direto pode ser muito maior, variando de $0,8$ a $2,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Entretanto, esses estudos ainda não estão totalmente concluídos e necessitam de mais pesquisas de longa duração para melhor entendimento da dinâmica de C nesses sistemas integrados de produção.

Bioma Mata Atlântica

O bioma Mata Atlântica ocupa uma extensa área no território nacional, estando presente em 15 Estados da federação. Essa área, ao longo do desenvolvimento do País, passou por fortes ondas de desmatamento para implantação da agricultura, pecuária e industrialização. Atualmente, esse bioma apresenta vários usos da terra, como: floresta remanescente, floresta plantada (principalmente pinus e eucalipto), pastagens, culturas permanentes (destacando o cultivo de café, citros, cacau e banana) e culturas anuais (Boddey et al., 2006).

Estudos realizados no Estado do Paraná, em Latossolo Vermelho, mostraram que após 20 anos de cultivo (10 anos sob cultivo convencional e 10 anos sob SPD) houve uma perda de C no solo de $1,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Sá et al., 2001a). Análises realizadas após 22 anos de cultivo nessa mesma área mostraram uma adição de C de $16,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ para SPD e um decréscimo de $1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ para o cultivo convencional, em relação à vegetação nativa. Nos primeiros 10 anos de SPD esse aumento foi mais significativo nos primeiros 5 cm de solo; contudo, com o passar do tempo (22 anos), esse aumento tornou-se notável em camadas mais profundas (Sá et al., 2001b). Esses estudos indicaram que uma nova condição de equilíbrio deverá ser alcançada após 40 anos de adoção do SPD. Nessa nova condição, com grande entrada de resíduos, estimativa aponta para um estoque de C na camada de 0 a 20 cm de profundidade de 88 a 90 Mg ha^{-1} , o que representa acréscimo de $47,1$ a $50,5 \%$ em relação ao conteúdo de C contido na vegetação nativa (Sá et al., 2001a).

O sequestro de C por meio do reflorestamento é outra opção para mitigar as emissões de GEE no bioma Mata Atlântica. Segundo Ciesla et al. (1995), a proporção de C imobilizado pelas florestas está relacionada ao seu crescimento e sua idade. As florestas removem C, na forma de CO_2 , em maiores proporções quando jovens e em fase de crescimento. À medida que atingem a maturidade e o crescimento se estabiliza, a absorção de CO_2 é reduzida e a vegetação entra em estágio de equilíbrio dinâmico.

Diferentes tipos de florestas plantadas acumulam quantidades distintas de C na biomassa aérea e radicular (Quadro 2) e exibem grande variabilidade espacial na quantidade de C estocada em um mesmo tipo de vegetação em locais distintos.

O cultivo da seringueira (heveicultura) é uma atividade que traz benefícios para o sistema climático global, por se tratar de uma espécie florestal que

Quadro 2. Acúmulo de C em áreas de florestas plantadas no bioma Mata Atlântica (Jacovine et al., 2006)

Floresta plantada	Acúmulo de C
	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Seringueira para borracha	3,09
Eucalipto	12,38
Pínus	4,08

armazena C pelo processo da fotossíntese; seu produto final, a borracha, também é um grande armazenador de C e, ainda, substitui a utilização de derivados de petróleo (Jacovine et al., 2006).

Estudo realizado em um povoamento de eucalipto indicou incremento médio de C na ordem de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, sendo a parte aérea responsável por 67 % desse estoque, as raízes por mais 21 % e os 12 % restantes estão relacionados com a MOS humificada (Paixão et al., 2006). Essa percentagem de estoque de C derivado da parte aérea foi similar à verificada por Cerri et al. (2006b) para floresta amazônica. Desse modo, fica evidente a contribuição das práticas de reflorestamento e, ou, manutenção das florestas remanescentes no tocante à mitigação da emissão de GEE e sequestro de C no sistema solo-plantas-atmosfera.

Atividades silviculturais, além de sequestrarem C da atmosfera, ainda reduzem a erosão do solo e a perda do C do sistema, o qual seria carregado no escoamento superficial da água no solo. Albrecht & Kandji (2003) relatam que sistemas agrícolas nos quais são reintroduzidas espécies arbóreas manejadas juntas com outras culturas e, ou, animais possuem alto potencial de absorver CO₂; globalmente, esses ecossistemas terrestres têm capacidade de armazenar 1,1 a 2,2 Pg de C anualmente, por mais de 50 anos.

A produção de cana-de-açúcar é um dos principais usos da terra no bioma Mata Atlântica. No que se refere à emissão de GEE e ao sequestro de C no solo, o agrossistema cana-de-açúcar pode contribuir sob principalmente três aspectos (Cerri et al., 2007a). O primeiro ponto diz respeito à substituição da gasolina pelo etanol combustível. Considerando que 1 m³ de gasolina pode ser substituído por 1,04 m³ de álcool anidro (usado como combustível adicionado à gasolina numa proporção que varia entre 20 e 26 %) e 0,8 m³ de álcool hidratado e que a gasolina contém, em média, 86,5 % de C fóssil, estimativas apontam que, no período de 1975-2000, 172 Tg de C foram compensadas e, conseqüentemente, não foram emitidas para a atmosfera, dando uma média anual de 6,9 Tg de C (Cerri et al., 2007a). Considerando os novos incentivos do governo na produção de etanol, essa taxa deve estar próxima a 10 Tg ano⁻¹ de C.

A segunda prática mitigadora das emissões de GEE associada à cultura da cana-de-açúcar está relacionada com a utilização do bagaço da planta como combustível nas caldeiras, gerando energia elétrica. Por exemplo, em 1998, aproximadamente 45 Mt de matéria seca de resíduos de cana-de-açúcar foram produzidos no Brasil. Assumindo que 2,4 t de resíduos substituem 1 t de combustível fóssil (Macedo, 1998), Cerri et al. (2007a) estimaram que 8 Mt de C deixam de ser emitidos devido a essa substituição de combustível fóssil por um biocombustível (bagaço).

A terceira ação mitigadora das emissões de GEE e sequestro de C no solo sob cana-de-açúcar no bioma Mata Atlântica está relacionada com a conversão da cana queimada para a colheita mecanizada. O uso do fogo na colheita da cana-de-açúcar causa elevada emissão de GEE para a atmosfera e reduz os estoques de C no solo, além de causar problemas respiratórios e poluição da atmosfera (Cerri et al., 2004). Com a ausência da queimada no processo de colheita, os resíduos vegetais são depositados na superfície do solo. Em seguida, parte desses resíduos é decomposta e parte é incorporada à MOS, aumentando o estoque de C e reduzindo a emissão de GEE para atmosfera.

Em estudo realizado na região Sul do Brasil, Feller (2001) reportou acúmulo de C no solo de 0,32 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ quando introduziu a colheita mecanizada em uma área de cana queimada. Luca (2002) observou aumento no estoque de C no solo da ordem de 0,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o sistema de colheita mecanizada, quando comparado com o uso de fogo.

Cerri et al. (2007a), utilizando as estimativas realizadas por Feller (2001) e considerando a área de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada no Brasil, estimaram que 0,48 Mt de C é sequestrado por ano. Além disso, quando o canavial é queimado, outros GEE, como CH₄ e N₂O, são emitidos para a atmosfera. Macedo (1998) mostrou que 6,5 kg ha⁻¹ de CH₄ são lançados pela queimada da cana-de-açúcar. Considerando a área sob corte mecanizado (1,5 Mha) e que o CH₄ tem potencial de aquecimento global 23 vezes superior ao do CO₂, chega-se a um valor de 0,06 Tg C que deixa de ser emitido anualmente (Cerri et al., 2007a).

Pelo exposto, verifica-se que a mecanização do corte da cana-de-açúcar resulta em sequestro de C no solo na ordem de 0,48 Tg ano⁻¹, e mais 0,05 Tg ano⁻¹ de C deixa de ser emitido na forma de CH₄, e evita a emissão de mais 10 Tg ano⁻¹ de C em decorrência da substituição do combustível fóssil pelo álcool e, ainda, mais 8 Tg ano⁻¹ de C devido à utilização de bagaço em substituição ao combustível fóssil nas caldeiras, totalizando 18,5 Tg ano⁻¹ de C removidos da atmosfera.

Estimativa realizada por Mello et al. (2006), avaliando o potencial de sequestro de C na região da Mata Atlântica na camada de 0 a 20 cm de solo (Quadro 3), resultou em aumento de 144 a 154 Tg ano⁻¹ de C, chegando a um potencial de sequestro de C de 3 Pg C, após 20 anos. Esses valores demonstram a

fundamental importância de melhorar as práticas de manejo atuais nesse bioma, principalmente por meio da implantação de práticas de reflorestamento, recuperação de pastagens degradadas e eliminação do fogo em cultivos de cana-de-açúcar.

Dois cenários foram propostos por Boddey et al. (2006) para avaliar as alterações nos estoques de C no bioma Mata Atlântica, em função de mudanças no uso e manejo da terra, considerando o período de 2005 a 2025 (Quadros 4 e 5). O primeiro baseia-se na opinião

Quadro 3. Potencial de sequestro de carbono na camada de 0 a 20 cm, na região da Mata Atlântica (Dados compilados por Mello et al., 2006)

Mudanças de uso da terra	Área total	Taxa de sequestro de C	Potencial de sequestro de C
	M ha	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	Tg ano ⁻¹
Colheita com queima para colheita mecanizada da cana-de-açúcar	3,30	1,62	5,35
Pastagem degradada para cana sem queima	1,93	0,1 a 0,8	0,19 a 1,54
Cana existente sem queima	1,03	1,62	1,67
Cultivo convencional para SPD	6,85	0,2 a 0,8	1,37 a 5,58
Pastagem degradada para SPD	3,80	0 a 0,71	0 a 2,70
SPD	8,02	0,2 a 0,8	1,60 a 6,41
Pastagem degradada para bem manejada	19,65	2,71	53,25
Pastagem bem manejada	28,00	2,71	73,88
Cana-de-açúcar com queima para reflorestamento	1,93	0,66	1,27
Pastagem degradada para reflorestamento	0,78	0 a 1,63	0,08 a 1,27
Reflorestamento	3,10	2,42	7,50
Total			144 a 154

Quadro 4. Possíveis mudanças no uso da terra e suas consequências nos estoques de C do solo no bioma Mata Atlântica, com base em predições dos autores sobre o futuro político, econômico e climático do Brasil (Boddey et al., 2006)

Uso da terra	Área total ⁽¹⁾	Mudança no manejo	Área sob mudança	Alteração no estoque de C 2005 a 2025	Varição dos estoques de C no solo
	Mha		Mha	Mg ha ⁻¹ de C	Tg
Pastagem natural	20,50	Recuperar 10 % da área usando leguminosas	2,0	+ 25,0	+ 50
Pastagem plantada	20,89	Recuperar 40 % da área com o uso de fertilizantes	8,4	+ 15,0	+ 126
Rotação de culturas anuais	13,80	a) Aumentar a área sobre as pastagens degradadas	2,0	0,0	0
		b) Introduzir leguminosas como adubo verde no SPD	7,9	+20,0	+158
Cana-de-açúcar	4,80	a) Aumentar a área sobre as pastagens degradadas	4,0	0,0	0
		b) Aumentar de 20 para 60 % as áreas onde se conservam os resíduos	5,3	+5,0	+26,4
Floresta plantada	3,20	Aumentar a área sobre as pastagens degradadas	3,0	0,0	0
Café	1,96	Destinar 20 % para produção orgânica	0,4	+ 10,0	+ 4,0
Cacau	0,58	Diminuir a área em 20 %	0,12	- 10,0	- 1,2
Total					+ 363

⁽¹⁾ Área atual ocupada por este uso da terra no bioma Mata Atlântica.

Quadro 5. Potencial de mudanças do uso da terra e suas consequências no estoque de C do solo, com base em soluções tecnicamente viáveis e ignorando o futuro político, econômico e climático do Brasil (Boddey et al., 2006)

Uso da terra	Área total ⁽¹⁾	Mudança no manejo	Área sob mudança	Variação no estoque de C 2005 a 2025	Aumento dos estoques de C no solo
	Mha		Mha	Mg ha ⁻¹ de C	Tg
Pastagem nativa	20,50	Recuperar 50 % da área usando leguminosas	10,25	+ 25,0	+ 256
Pastagem plantada	20,89	Recuperar 40 % das áreas com o uso de fertilizantes	8,4	+ 15,0	+ 126
Rotação de culturas anuais	13,80	a) Aumentar a área sobre pastagens degradadas	4,0	0,0	0
		b) Introduzir leguminosas como adubo verde no SPD (90 % da área)	16,0	+ 20,0	+ 320
Cana-de-açúcar	4,80	a) Aumentar a área sobre as pastagens degradadas	5,0	0,0	0
		b) Aumentar de 20 para 90 % as áreas mal conservadas	7,8	+ 10,0	+ 78
Floresta plantada	3,20	Aumentar a área sobre as pastagens degradadas	3,0	0,0	0
Café	1,96	Destinar 50 % para produção orgânica	1,0	+ 10,0	+ 10
Cacau	0,58	Sem mudanças	0	- 10,0	0
Total					+ 790

⁽¹⁾ Área atual ocupada por este uso da terra no bioma Mata Atlântica.

dos autores sobre as possíveis mudanças no uso da terra e suas consequências nos estoques de C do solo, com base em predições, considerando o futuro político, econômico e climático do Brasil. O segundo é uma estimativa otimista, porém realista, da quantidade de área disponível para mudanças de uso da terra que poderão favorecer o acúmulo de C no solo, baseando-se nos aspectos tecnicamente viáveis e ignorando o futuro político, econômico e climático do Brasil.

Analisando esses quadros, pode-se verificar o elevado potencial de estocar C que o bioma Mata Atlântica apresenta para os próximos 20 anos, mesmo considerando que a maior parte desse bioma já se encontra sob intervenção antrópica, sob uso agrícola e sem a vegetação nativa original.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. O aumento da concentração de GEE na atmosfera pode influenciar a produção agrícola

mundial. No Brasil, as principais fontes de GEE para a atmosfera são mudanças no uso da terra, agricultura e pecuária. A agricultura e a pecuária correspondem a quase 30 % do produto interno bruto (PIB) no Brasil e são atividades altamente dependentes de variáveis climáticas, podendo ser diretamente influenciadas pelo aquecimento global e por possíveis mudanças climáticas.

2. Entretanto, no setor agropecuário, o uso e manejo adequado do solo podem resultar em aumento nos estoques de C no solo, na vegetação, bem como atuar na redução da emissão de GEE para a atmosfera e, consequentemente, resultar na atenuação do aquecimento global.

3. O manejo adequado do solo e da vegetação deve ter como premissa básica a utilização de métodos com o mínimo revolvimento do solo, assim como os sistemas de rotação/sucessão de culturas que incluam plantas com alta produção de resíduos vegetais e, ainda, plantas capazes de acumular nutrientes no solo, como a implantação de leguminosas nos sistemas de produção.

4. Nas áreas sob pastagem, deve-se realizar manejo adequado do solo e da forrageira, com intuito de sequestrar C no solo e, por conseguinte, reduzir as emissões de GEE para a atmosfera. Já nas áreas sob cultivo de cana-de-açúcar deve-se realizar a colheita mecanizada, evitando os efeitos indesejáveis da queimada.

5. Devem-se ainda preservar as vegetações nativas remanescentes, bem como realizar plantios de reflorestamento em larga escala, pois nesses ambientes estão as maiores quantidades de C sequestradas no sistema solo-planta.

LITERATURA CITADA

- ALBRECHT, A. & KANDJI, S.T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 99:15-27, 2003.
- ASSOCIAÇÃO DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO – APDC. Plantio direto tropical. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.apdc.com.br>>. Acesso em: 04 jun. de 2007.
- BALL, B.C. & SMITH, K.A. Gas movement. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E., eds. *Soil analysis: Physical methods*. New York, Marcel Dekker, 1991. p.511-549.
- BAYER, C. & MEILNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo, ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.1-26.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Tillage Res.*, 86:237-245, 2006.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:677-683, 2004.
- BERNOUX, M. & VOLKOFF, B. Soil carbon stock in soil ecoregions of Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth, 2006. p.65-75.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C.; GRAÇA, P.M.A.; VOLKOFF, B. & TRICHET, J. Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). *Études Gestion Sols*, 5:31-42, 1998.
- BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; MACEDO, M.O.; OLIVEIRA, O.C.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R. & URQUIAGA, S. Potential of carbon sequestration in soils of the Atlantic Region of Brazil. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth, 2006. p.305-347.
- BUSTAMANTE, M.M.C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E. & ROSCOE, R. Soil carbon and sequestration potential in the Cerrado Region of Brazil. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth, 2006. p.285-304.
- CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PICCOLLO, M.C.; GODINHO, V.P. & CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. *Soil Tillage Res.*, 103:342-349, 2009.
- CERRI, C.C. & CERRI, C.E.P. Agricultura e aquecimento global. *B. Inf. SBCS*, 23:40–44, 2007.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; FEIGL, B.J. & PICCOLO, M.C. Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLET, R. & STEWART, B.A. *Global climate change and tropical ecosystems*. Boca Raton, CRC Press, 1999. p.33-50.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P. & LAL, R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth, 2006a. p.41-47.
- CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & RONDÓN, M.A. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth, 2006b. p.245-266.
- CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; POWLSON, D.S.; BATJES, N.H.; MILNE, E. & CERRI, C.C. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 122:58-72, 2007b.
- CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M. & CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. *Sci. Agric.*, 64:83-99, 2007a.
- CERRI, C.E.P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D.S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L. & CERRI, C.C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1879-1887, 2003.
- CERRI, C.C.; NEILL, C.; PICCOLO, M.C.; MELILLO, J.M. & STEUDLER, P.A. Nitrogen dynamics in Amazon forest and pasture soils measured by ¹⁵N pool dilution. *Soil Biol. Biochem.*, 31:567-572, 1999.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P. & FELLER, C. Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. *Soil Use Manag.*, 20:248-254, 2004.
- CIESLA, W.M.; MBUGUA, D.K. & WARD, J.D. Ensuring forest health and productivity: A perspective from Kenya. *J. For.*, 93:36-39, 1995.

- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.D.; RESCK, D.V.S. & GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:425-432, 1999.
- DIAS-FILHO, M.B.; DAVIDSON, E.A. & CARVALHO, C.J.R. Linking biogeochemical cycles to cattle pasture management and sustainability in the Amazon Basin. In: MCCLAIN, M.E.; VICTORIA, R.L. & RICHEY, J.E., eds. *The biogeochemistry of the Amazon Basin*. New York, Oxford University Press, 2001. p.84-105.
- DIXON, R.K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; SOLOMON, A.M.; TREXLER, M.C. & WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263:185-190, 1994.
- DUIKER, S.W. & LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil Tillage Res.*, 54:21-30, 2000.
- ESWARAN, H.; van den BERG, E. & REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:192-194, 1993.
- FANG, C. & MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.*, 33:155-165, 2001.
- FEARNSIDE, P.M. The potential of Brazil's forest sector for mitigating global warming under the Kyoto Protocol. *Mitig. Adapt. Strat. Global Change*, 3:355-372, 2001.
- FEARNSIDE, P.M. & BARBOSA, R.I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *For. Ecol. Manag.*, 108:147-166, 1998.
- FELLER, C.F. Efeitos da colheita sem queima da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono e as propriedades do solo. Piracicaba, FAPESP, 2001. 150p. (Relatório Técnico)
- FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, G.C.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E.A.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N. & SNYDER, P.K. Global consequences of land use. *Science*, 309:570-574, 2005.
- FRANCHINI, J.C.; CRISPINO, C.C.; SOUZA, R.A.; TORRES, E. & HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 92:18-29, 2007.
- GREEN, V.S.; STOTT, D.E.; CRUZ, J.C. & CURI, N. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. *Soil Tillage Res.*, 92:114-121, 2007.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge, Cambridge University, 2001. 881p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate change 2007. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University, 2007. 939p.
- JACOVINE, L.A.G.; NISHI, M.H.; SILVA, M.L.; VALVERDE, S.R. & ALVARENGA, A.P. A seringueira no contexto das negociações sobre mudanças climáticas globais. In: ALVARENGA, A.P. & CARMO, C.A.F.S. *Sequestro de carbono: Quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural*. Viçosa, MG, EPAMIG, 2006. p.1-41.
- KLUTHCOWSKI, J.; STONE, L.F. & AIDAR, H. Cobertura do solo na integração lavoura pecuária. In: SIMPÓSIO DE GADO DE CORTE, 5., Viçosa, MG, 2006. Anais... Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. p.81-156.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304:1623-1627, 2004.
- LAL, R. Soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth Press, 2006. p.49-64.
- LAURANCE, W.F.; COCHRANE, M.A.; BERGEN, S.; FEARNESIDE, P.M.; DELAMÓNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S. & FERNANDES, T. The future of Brazilian Amazon. *Science*, 291:438-439, 2001.
- LUCA, E.F. *Matéria orgânica e atributos de solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar*. Piracicaba, Universidade de São Paulo – Centro de Energia na Agricultura, 2002. 101p. (Tese de Doutorado)
- MACEDO, I.C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996). *Biomass & Bioenergy*, 14:77-81, 1998.
- MACHADO, P.O.L.A. & SILVA, C.A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 61:119-130, 2001.
- MACHADO, R.B.; RAMOS NETO, M.B.; PEREIRA, P.G.P.; CALDAS, E.F.; GONÇALVES, D.A.; SANTOS, N.S.; TABOR, K. & STEININGER, M. Estimativa de perda de área no Cerrado brasileiro. Relatório técnico não publicado. Brasília, Conservação Internacional, 2004.
- MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; ABER, J.D.; NEWKIRK, K.; LUX, H.; BOWLES, F.P.; CATRICALA, C.; MAGILL, A.; AHRENS, T. & MORRISSEAU, S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 298:2173-2176, 2002.
- MELLO, F.F.C.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. Potential of soil carbon sequestration for the Brazilian Atlantic Region. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworth, 2006. p.349-368.
- MORAES, J.F.L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. & BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70:63-81, 1996.
- MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2006. 729p.
- NEILL, C.; CERRI, C.C.; MELILLO, J.M.; FEIGL, B.J.; STEUDLER, P.A.; MORAES, J.F.L. & PICCOLO, M.C. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondonia. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A., eds. *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton, CRC Press, 1997. p.9-28.

- PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G. & SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. *R. Árvore*, 30:411-420, 2006.
- PAULINO, P.V.R.; PORTO, M.O.; OLIVEIRA, A.S.; SALES, M.F.L. & MORAES, K.A.K. Integração lavoura pecuária: Utilização do pasto e subprodutos. In: SIMPÓSIO DE GADO DE CORTE, 5., Viçosa, MG, 2006. Anais. Viçosa, MG, 2006. p.159-220.
- PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E.T. & HUNT, H.W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48:147-163, 2000.
- RESCK, D.V.S.; VASCONCELLOS, C.A.; VILELA, L. & MACEDO, M.C.M. Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pasture land on soil carbon pool and dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M. & STEWART, B.A. Global climate change and tropical ecosystems. Boca Raton, CRC Press, 2000. p.169-196.
- ROSCOE, R. Dinâmica da matéria orgânica em solos de Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, SERIA 30., Recife, 2005. Anais. Recife, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. CD ROM.
- ROSCOE, R. & BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil Tillage Res.*, 70:107-119, 2003.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C. & FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1486-1499, 2001a.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C. & FEIGL, B.E. Carbon sequestration in a plowed and no-tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. In: STOTT, D.E.; MOHTAR, R. & STEINHARDT, G. eds. 10th International Soil Conservation Organization Meeting. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, Purdue University, p.466-471, 2001b.
- SALTON, J.C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005a. 158p. (Tese de Doutorado)
- SCARPINELLA, G.A. Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Kyoto. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2002. 182p. (Dissertação de Mestrado)
- SCHARPENSEEL, H.W. Preface to workshop 'Management of carbon in tropical soils under global change: Science, practice and policy'. *Geoderma*, 79:1-8, 1997.
- SILVA, R.R. Qualidade do solo em função de diferentes sistemas de manejo na região Campos das Vertentes, Bacia Alto Rio Grande-MG. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 97p. (Tese de Mestrado)
- SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S. & SALLES, L.A.B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R. & MIGUEZ, J.D.G. Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 2001. p.33-64.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; MORAES, J.C. & ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22:755-775, 2002.
- SMITH, P.; JANZEN, H.; MARTINO, D.; ZUCONG, Z.; KUMAR, P.; MCCARL, B.A.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIROTENKO, O.; HOWDEN, M.; MCALLISTER, T.; GENXING, P.; ROMANEKOV, V.; SCHNEIDER, U.A.; TOWPRAYOON, S.; WATTENBACH, M. & SMITH, J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. Royal Soc.*, 363:789-813, 2008.
- STRECK, N.A. & ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Ci. Rural*, 41:1351-1359, 2006.
- STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: The effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. *Ci. Rural*, 35:730-740, 2005.
- SUNDQUIST, E.T. The global carbon dioxide budget. *Science*, 259:934-941, 1993.

