



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Estoque e Mecanismo de Proteção Física do Carbono no Solo em Manejos Agrícolas

Lana Cristina Baumgärtner¹, Renato Campello Cordeiro², Renato de Aragão Ribeiro Rodrigues³, Ciro Augusto de Souza Magalhães⁴, Eduardo da Silva Matos⁵

¹ Doutoranda em Geociências. Departamento de Geoquímica. Universidade Federal Fluminense. Niterói. Rio de Janeiro. Brasil. E-mail: lana_baumgartner@hotmail.com

² Professor Associado III. Departamento de Geoquímica. Universidade Federal Fluminense. Niterói. Rio de Janeiro. Brasil. E-mail: rcampello@yahoo.com

³ Pesquisador. Embrapa Solos. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. E-mail: renato.rodrigues@embrapa.br

⁴ Pesquisador. Embrapa Agrossilvipastoril. Sinop. Mato Grosso. Brasil. E-mail: ciro.magalhaes@embrapa.br

⁵ Pesquisador. Embrapa Sede. Brasília. Distrito Federal. Brasil. E-mail: renato.rodrigues@embrapa.br

Artigo recebido em 16/11/2020 e aceito em 27/07/2021

RESUMO

O compartimento terrestre é o maior reservatório de carbono no solo e armazena cerca de três vezes mais que o compartimento atmosférico. Porém, a atmosfera tem aumentado suas concentrações, devido as elevadas emissões de gases de efeito estufa, decorrente principalmente do consumo de combustíveis fósseis e queimadas das florestas. O Brasil é um dos maiores emissores, especialmente de dióxido de carbono, pelo qual o setor de mudanças do uso da terra e florestas são responsáveis majoritariamente pelas emissões. O solo em condições naturais tem um equilíbrio entre a entrada e saída de carbono, no entanto quando o solo é cultivado, principalmente com sistemas convencionais, há uma perda significativa dos estoques de carbono do solo. No entanto, quando é adotado manejos conservacionistas ocorre o mecanismo de proteção física do carbono através da formação e estabilização dos agregados, que dificulta o acesso dos microrganismos a decomposição e mantém estocado no solo, o que mitiga a emissão para atmosfera. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo mostrar como os manejos influenciam no estoque de carbono no solo, e como é atuação do mecanismo de proteção física de agregados em sistemas conservacionistas, demonstrando como foram os avanços na pesquisa da interação da matéria orgânica com a formação e estabilização de agregados.

Palavras-chave: agregados, dióxido de carbono, efeito estufa, integração lavoura-pecuária-floresta, matéria orgânica

Stock and Mechanism of Physical Protection of Soil Carbon in Agricultural Managements

ABSTRACT

The terrestrial compartment is the largest carbon reservoir in the soil and stores about three times as much as the atmospheric compartment. However, the atmosphere has increased its concentrations, due to the high emissions of greenhouse gases, mainly due to the consumption of fossil fuels and forest fires. Brazil is one of the largest emitters, especially of carbon dioxide, for which the sector of land use change and forests are responsible for the majority of emissions. Soil under natural conditions has a balance between carbon input and output, however when the soil is cultivated, mainly with conventional systems, there is a significant loss of soil carbon stocks. However, when conservation management is adopted, there is a mechanism for the physical protection of carbon through the formation and stabilization of aggregates, which hinders the access of microorganisms to decomposition and keeps them stored in the soil, which mitigates the emission into the atmosphere. In view of the above, this study aimed to show how the management influences the carbon stock in the soil, and how the mechanism of physical protection of aggregates in conservationist systems works,

demonstrating how advances were made in researching the interaction of organic matter with formation and stabilization of aggregates.

Key words: aggregates, carbon dioxide, greenhouse effect, crop-livestock-forest integration, organic matter

Introdução

Importância do solo como reservatório de carbono e efeito estufa

O solo é o maior compartimento terrestre de carbono (Kern e Johnson, 1993), e armazena cerca de 2500 Pg C, sendo 1500 Pg C no primeiro metro de profundidade, três vezes mais do que é armazenado na atmosfera (Eswaran et al., 1993; Lal, 2004; Machado, 2005; Cias et al., 2013). Entretanto, o compartimento atmosférico tem aumentado, decorrente de ações antrópicas, principalmente pelo elevado consumo de combustíveis fósseis e da queima de florestas (Cerri et al., 2004), o que intensifica o efeito estufa, e consequentemente, o aumento da temperatura do planeta. Em 2019, o Brasil emitiu ~2,0 Gt CO₂eq, sendo o setor de mudança do uso da terra e florestas responsável por 44% das emissões, devido principalmente ao desmatamento e as queimadas realizadas no Bioma Amazônia (SEEG, 2019).

Há estimativas que o território brasileiro com seus 850 milhões de ha, estoque em torno de $36,4 \pm 3,4$ Pg na camada de 0-30 cm de solo (Bernoux et al., 2002), isso representa aproximadamente 40% do carbono (C) armazenado nos solos da América Latina (Bernoux e Volkoff, 2006). Porém se for levado em consideração a camada de 0-100 cm, os estoques estariam entre 65,9 e 67,5 Pg C, sendo que 65% deste estoque se concentrariam na região amazônica (Batjes, 2005).

O solo quando em condições naturais apresenta um equilíbrio entre a entrada e saída de C no sistema solo-atmosfera (Bayer e Mielniczuk, 1999). Em contrapartida, quando ocorre transformações por ações antropogênicas principalmente, há alterações nos fluxos de CO₂ (Paiva et al., 2011) e geralmente resulta na redução de 20 a 50% dos teores de C orgânico total (Lal, 2005). Isernhagen et al., (2017), mostraram que houve a redução de 20% ($17,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) do estoque de C na camada de 0-30 cm, em um período de 30 anos, na conversão da vegetação nativa para o uso agrícola e florestal. Já, Rosa et al. (2003) encontraram um declínio no conteúdo de C do solo em torno de 20 a 50 %, variando com a profundidade, quando os ecossistemas naturais foram substituídos por sistemas de cultivos. De maneira geral, os sistemas convencionais de cultivo são mais instáveis e provocam reduções nos

estoques de C no solo (Dias et al., 2007; Freitas et al., 2018), e consequentemente, maior transferência para o compartimento atmosférico, o que provoca um desbalanço entre a entrada e saída de C no sistema, ou seja, o *output* é superior ao *input*.

As trocas de C entre o solo e a atmosfera ocorrem através do processo de fotossíntese, Lal (2008) estima que ocorre um acúmulo de 120 Pg C ano⁻¹, através do depósito de resto vegetais sob (raízes) e sobre os solos (folhas, galhos, etc). Contudo, o C retorna para a atmosfera através da respiração (60 Pg C) e outra metade por meio da decomposição da matéria orgânica do solo pelos microrganismos (60 Pg C) (Schlesinger, 1997). Porém, a dinâmica de acúmulo e permanência de C no solo pode ser alterada de acordo com o manejo adotado, tornando-se fonte ou dreno de CO₂ atmosférico (Aquino et al., 2017; Costa et al., 2006). Deste modo, os teores de C são sensíveis às mudanças no uso e ocupação do solo (Siqueira et al., 2008), e o sequestro de C passa a ser muito importante em razão da necessidade de recuperar solos degradados, aumentar a biodiversidade e a produtividade para obter condições aptas de segurança alimentar (Lal, 2006), além da adequação ambiental. Lal (2004) aponta que com adoção de boas práticas, o solo tem potencial global de sequestro de $0,9 \pm 0,3$ Pg C ano⁻¹, o que poderia compensar até um terço das emissões globais estimadas em $3,3$ Pg C ano⁻¹.

Em manejos com adoção de práticas conservacionistas ocorre um dos principais mecanismos de proteção do C, a formação e estabilização de agregados, pelo qual ocorre a proteção física do carbono, uma vez que o solo não é mobilizado e mantém sua estrutura agregada na qual dificulta o acesso aos microrganismos decompositores, portanto, estoca o C no solo e mitiga a emissão de CO₂ para atmosfera (Lal, 2009), o gás do efeito estufa mais emitido (~1,3 Gt CO₂ no Brasil (SEEG, 2018)).

Desenvolvimento

Influência do manejo nos estoques de carbono no solo

As práticas de manejos adotados nos solos influenciam a sustentabilidade e a produtividade dos ecossistemas agrícolas. Manejos que reduzem e/ou controlam a degradação das propriedades do solo são determinantes para o bom

desenvolvimento das culturas, com reflexos na produção e impactos no meio ambiente, necessários para manter a sustentabilidade agrônômica e econômica dos solos (Pagliai et al., 2004). O solo quando degradado (por ações antropogênicas) tem conseqüente redução de quantidade e qualidade de biomassa, assim como aumento nos custos de produção (Lal, 1997). O solo degradado é caracterizado pela desagregação de sua estrutura, intensificação de processos erosivos, redução da MOS e da atividade biológica. No entanto, pode ser recuperado com a adoção de manejos que tragam aporte de material orgânico, através das espécies vegetais implantadas, fator principal para a melhoria das características químicas, físicas e biológicas nos solos tropicais (Dias et al., 2007).

A degradação física é um dos componentes do processo de degradação do solo, geralmente associado às perdas de matéria orgânica e da integridade estrutural dos solos. A MOS não é exatamente uma propriedade física do solo, mas influencia direta e indiretamente a maioria delas (densidade, porosidade, estabilidade de agregados, resistência do solo a penetração de raízes, taxa de infiltração de água, etc), de modo que a sua redução está relacionada com a degradação física (Cardoso et al., 1992; Stefanoski et al., 2013), e sua perda, na conversão de ambientes naturais em sistemas cultivados, correspondem a uma das principais causas da degradação do solo (Lal, 2006). Apesar de ser encontrada em pequenas quantidades nos solos agrícolas, de 1 a 5%, a matéria orgânica tem função importante em processos fundamentais como a ciclagem e disponibilidade de nutrientes, a infiltração e armazenamento de água, solubilização de fertilizantes, complexação de metais tóxicos, poder tampão, fluxos de gases para atmosfera, a resistência a erosão, agregação do solo, capacidade de troca de cátions (CTC) entre outros atributos (Stevenson, 1994; Mielniczuk, 2008).

Dessa forma, manejos aliados a práticas conservacionistas do solo, tem maior acúmulo de MOS, reduzem a susceptibilidade a erosão e favorece a atividade biológica (Prosdocimi et al., 2016). Para isso muitos estudos têm avaliado formas de manejos que possam incrementar C no solo (Lal, 2008), pois além da capacidade de evitar a perda para a atmosfera, na forma de CO₂, a MOS é o principal componente para o bom funcionamento e proteção do sistema edáfico (Siqueira, et al., 2008). Dentre as práticas conservacionistas, o sistema plantio direto, sistemas integrados de produção, cultivo mínimo, pastagens bem manejadas, reflorestamento ou qualquer uso sustentável do solo que possibilite a

entrada de MOS mostraram-se como medidas indispensáveis para a mitigação de gases do efeito estufa (GEE) e incremento de carbono no solo (Carvalho, et al., 2010; Besen, et al., 2018).

O sistema plantio direto (SPD), há décadas, tem apresentado potencial de acumular C no solo, com resultados positivos comparado com o sistema convencional de cultivo (Bayer et al., 2004; Hickmann e Costa, 2012; Carvalho et al., 2014; Joris et al., 2016). Isso ocorre pois, no SPD há mobilização mínima do solo, permanência de cobertura constante e rotação de culturas, que propicia condições favoráveis a conservação e/ou aumento dos estoques de C (Prosdocimi et al., 2016). Já no sistema de manejo convencional é observado menor estoque de C, que está relacionado ao revolvimento, com arações e gradagens, que provocam perturbações físicas e pulverizam o solo (Donagemma et al, 2007), e causam rupturas nos agregados e maior aeração, o que intensifica os processos de decomposição e conseqüentemente aumentos das emissões de CO₂ para atmosfera e suscetibilidade a erosão do solo (Costa et al., 2008).

Bayer et al., (2003), avaliaram um Latossolo Vermelho distroférrico, em Chapecó-SC, e constataram que houver perda de 52% do estoque de C original, no solo cultivado durante 23 anos sob sistema convencional com arações e gradagens. Em contraste, Amado et al. (2001), demonstram que a partir do quarto ano com adoção de SPD com diferentes plantas de cobertura, proporcionou recuperação de parte do C perdido e no oitavo ano os estoques de C no solo se assemelharam ou excederam aos encontrados no campo natural (23,2 Mg ha⁻¹). E ainda, o sistema tradicional de cultivo de milho sem cultivo com plantas de cobertura (pousio/milho) resultou, em oito anos, numa liberação líquida de 4,32 Mg ha⁻¹ de CO₂, enquanto o manejo com cobertura (milho + mucuna) promoveu um balanço positivo e sequestro de 15,5 Mg ha⁻¹ de CO₂ tendo como referência os valores do campo natural. Isso demonstra que, com a utilização de práticas conservacionistas, é possível a recuperação dos teores de MOS que foram perdidos com preparos convencionais e mostra potencial para fixação de CO₂ atmosférico, mesmo quando comparada a sistemas naturais não perturbados, como o campo natural

Hickmann e Costa (2012), evidenciaram que o plantio direto foi o único sistema que aumentou o estoque de C no solo, após 23 anos de cultivo, comparado a diferentes sistemas de manejos convencionais em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico em Minas Gerais. Os

resultados obtidos mostraram que o sistema plantio direto estocou $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono orgânico total na camada superficial, já nos manejos convencionais (arado de disco; arado de disco e grade pesada; e grade pesada) o balanço foi negativo, e ocorreram perdas de C que variaram de $0,5$ a $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ do estoque inicial da área.

Nota-se que o aumento do estoque de C, especialmente em regiões tropicais, é lento e necessita de um manejo adequado, já que a taxa de decomposição é acelerada devido as altas temperaturas e umidade do solo (Six et al., 2002). Para isso, práticas conservacionistas também contribuem para o controle da temperatura do solo, isso porque, por manter o solo coberto por plantas ou resíduos de cobertura, propicia um isolamento térmico e reduz a temperatura do solo em relação ao sistema convencional (Torres et al., 2006; Iamaguti et al., 2015), o que pode atenuar a emissão de CO_2 .

Outra maneira de uso sustentável do solo que atualmente tem mostrado evidências positivas em relação ao sequestro de C e mitigação de emissões de GEE são os sistemas integrados de produção. Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) são sistemas que combinam atividades agrícolas, pecuárias e florestais na mesma área, com efeitos sinérgicos entre os componentes para alcançar a sustentabilidade da unidade de produção, contemplando sua adequação ambiental e a valorização do capital natural (Balbino et al., 2011). Os sistemas integrados podem combinar de quatro diferentes maneiras entre si: Silviagrícola (floresta + lavoura; ILF), Agropastoril (lavoura + pecuária; ILP), Silvopastoril (floresta + pecuária; IPF) e Agrossilvipastoril (lavoura + floresta + pecuária; ILPF) (Balbino et al., 2011).

Conceição et al., (2017), salientou que o sistema ILPF tem potencial de alcançar valores de estoque similares a mata nativa, em curto período de tempo. Os autores avaliaram os estoques de C (camada de 0-30 cm) na implantação do experimento (2011) e três anos após a implantação (2014), e demonstraram que os estoques de C do solo promovidos pelo sistema ILPF (70 Mg C ha^{-1}) obtidos em 2014 estão próximos aos valores encontrados na mata nativa (75 Mg C ha^{-1}), e ainda verificou que foi o manejo pelo qual apresentou maior eficiência em incremento de C ($5,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$) em curto período de cultivo, comparados com uma pastagem bem manejada, um sistema plantio direto e uma floresta plantada de eucalipto.

Oliveira et al. (2017) encontraram estoques de $123,58$ e $128,34 \text{ Mg C ha}^{-1}$, no primeiro metro de profundidade, para um sistema de ILPF com

uma e três linhas de eucalipto, respectivamente, sendo superiores aos estoques de uma área de pastagem degradada ($110,63 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Os autores destacam que em média 49% do C do solo foi estocado nos primeiros $0,3 \text{ m}$ e o restante nos demais $0,7 \text{ m}$ de profundidade. E ainda, considerando a camada de 1 m de solo, no ILPF com três linhas de eucalipto, o componente florestal foi importante na contribuição para o acúmulo de C no solo, pois nas linhas das árvores o estoque de C foi maior que na área com uso agrícola/pecuária, e demonstra a importância da introdução do componente arbóreo no sistema para o incremento de C no solo (Oliveira, 2015).

Por fim, estima-se que com adoções de boas práticas agrícolas há o potencial global de sequestro de $0,6$ a $1,12 \text{ Pg C ano}^{-1}$ e pode representar valores cumulativos na ordem de 30 a 60 Pg de C num período de 25 a 50 anos de cultivo e assim recuperar praticamente todo o carbono que foi perdido em curto período de tempo (Lal, 2004).

Mecanismo de proteção física do carbono no solo desempenhado pelo agregado

A MOS é constituída majoritariamente por moléculas de carbono (52-58%), e menores quantidades de oxigênio (34-39%), hidrogênio (3,3-4,8%) e nitrogênio (3,7-4,15%) (Silva et al., 2004) e desempenha papel fundamental na manutenção da qualidade do solo, e seu acúmulo melhora suas propriedades e como consequência, o sequestro de C (Mielniczuk et al., 2003). Para que ocorra o incremento de matéria orgânica no solo é preciso aumentar o aporte de resíduos orgânicos e diminuir as taxas de saída (decomposição, lixiviação e erosão) (Davidson e Janssens, 2006; Paustian et al., 1997). E para que a matéria orgânica permaneça no solo há necessidade de sua estabilização, ou seja, atenuar o potencial de sua perda.

Sollins et al. (1996) definem estabilização como o decréscimo do potencial de perda da MOS por erosão, respiração microbiana ou lixiviação. Os três principais mecanismos de estabilização da matéria orgânica no solo são: estabilização química; estabilização bioquímica; proteção física em agregados (Stevenson, 1994; Sollins et al., 1996; Christensen, 2001). Todavia, esta separação é simplesmente didática, pois os mecanismos de estabilização atuam ao mesmo tempo em todos os estágios de decomposição (Cornejo e Hermosín, 1996; Christensen, 1996).

A estabilidade química ocorre devido a ligação química e físico-química entre substâncias orgânicas e inorgânicas do solo formando

complexos organominerais, que fazem com que ocorra a diminuição da taxa de degradação das moléculas orgânicas devido a complexação com minerais do solo (Sollins et al., 1996; Kaiser e Guggenberger, 2003). Essas reações ocorrem na superfície das frações minerais do solo, portanto, a área de contato superficial faz-se muito importante. Quando se considera as frações granulométricas do solo (areia, silte e argila), a fração argila possui área superficial 50 a 100 vezes maior do que a soma equivalente em massa de areia e silte (Stotzky, 1986). Em função disso, os argilominerais e os óxidos são os principais minerais responsáveis pela interação com a MOS (Sollins et al., 1996).

A estabilização bioquímica (também denominada recalitrância química) da MOS é decorrente da própria composição química mais recalitrante das moléculas dos compostos orgânico (Sollins et al., 1996; Dieckow et al., 2009), como ligninas e polifenóis, os quais são preservados pela decomposição seletiva dos microrganismos (Stevenon, 1994; Sollins et al., 1996). Os microrganismos degradam seletivamente compostos menos recalitrantes (como carboidratos, aminoácidos e proteínas, por exemplo) aumentando a recalitrância média do resíduo remanescente (Pillon, Mielniczuk e Martin Neto, 2002).

A proteção física da matéria orgânica (também denominada inacessibilidade) ocorre pela influência da agregação do solo, porque há formação de uma barreira entre ela e os microrganismos decompositores. Essa barreira dificulta o acesso da MOS no interior do agregado pois, grande parte do espaço poroso do solo possui diâmetros tão pequenos que impedem a movimentação dos organismos decompositores, o que evita sua perda para atmosfera (Sollins et al., 1996; Six et al., 2000; Razafimbelo et al., 2008). A MOS pode ser protegida pela sua incorporação no interior de microagregados (Edwards e Bremner, 1967), em microporos inacessíveis (Ladd et al., 1993) ou dentro de macroagregados estáveis (Elliott, 1986). O aumento da mineralização da MOS após a quebra de agregados é atribuído à exposição de MOS anteriormente inacessível aos microrganismos (Beare et al., 1994).

Os agregados são unidades básicas de construção da estrutura do solo, formados a partir da união de unidades primárias (areia, silte e argila), fragmentos de plantas e microrganismos, interação entre minerais, exsudados de plantas, e agentes cimentantes, entre os principais: matéria orgânica e óxidos de Fe e Al (Tisdall e Oades, 1982; Dexter, 1988; Oades e Waters, 1991).

Para haver formação de agregados no solo, é preciso que ocorra duas etapas fundamentais: a primeira, que exista a aproximação das partículas do solo. Essa aproximação geralmente vem de uma força mecânica qualquer, e pode ser causado pela: expansão e contração do solo (favorecida por ciclos de umedecimento e secagem); crescimento das raízes e hifas de fungos; floculação (atração eletrostática); movimentação da microfauna no solo (Bochner et al., 2008); a segunda, que haja uma condição de que, após o contato das partículas, exista um agente cimentante (polímeros orgânicos da matéria orgânica do solo e dos exsudados orgânicos liberados pelas raízes de plantas, em função das ligações com a superfície das partículas minerais do solo por meio de cátions polivalentes) para consolidar essa união, gerando o agregado (Castro Filho et al., 1998; Mielniczuk, 1999).

No início dos anos 1900, estudos haviam identificados os fatores que influenciavam a agregação do solo. Era amplo o conhecimento da participação da fauna do solo (minhocas, cupins); microrganismos (micorrizas, fungos saprófitos e bactérias); raízes (efeito físico e exsudados); agentes de ligação inorgânicos (Ca e os óxidos); e variáveis ambientais (ciclos de umedecimentos e secagem do solo) (Six et al., 2004; Braida et al., 2011). No entanto, foi apenas a partir da segunda metade dos anos 1900, que houve a organização de modelos teóricos de agregação, como também a interação da MOS com os demais fatores de agregação (Six et al., 2004; Braida et al., 2011).

O estudo pioneiro de formação e estabilização de agregados relacionados com a matéria orgânica do solo foi realizado em 1959, e a partir deste vieram outros estudos que trouxeram maiores entendimentos. Os estudos mais relevantes foram descritos por Six et al. (2004) e são demonstrados na Figura 1:

A teoria pioneira de Emerson (1959), sugere que os agregados eram formados a partir da união de lâminas de argila orientada denominado 'domínio argiloso', e partículas de quartzo com a presença de uma monocamada de matéria orgânica de origens diversas.

Já Edwards e Bremner (1967), explicaram que os microagregados eram formados pela união de complexos organominerais compostos por: matéria orgânica, cátions polivalentes (Fe, Al e Ca) e partículas de argila. Os autores rejeitaram a participação da areia em formação de complexos estáveis, proposto por Emerson (1959), e propõem que microagregados (<250 µm) estáveis tem tamanho de areia e silte. E ainda, a matéria orgânica quando complexada em microagregados ficaria

protegida fisicamente e inacessível aos microrganismos.

O grande avanço no entendimento das interações entre agregados e matéria orgânica foi descoberto por Tisdall e Oades (1982), através da teoria de hierarquia de agregação. Os autores descrevem que os agregados são formados em ordem de hierarquia de tamanhos por diferentes agentes ligantes, sendo eles orgânicos e/ou inorgânicos, transitórios, temporários e persistentes. As partículas primárias se aproximam

e unem-se formando complexos organominerais (<20 µm), que por sua vez são unidos em microagregados (20 -250 µm) por matéria orgânica humificada e cátions polivalentes (ligantes persistentes). A seguir, os microagregados são unidos entre si formando os macroagregados (>250 µm), através de polissacarídeos derivados de plantas e microrganismos (ligantes transitórios) e hifas, raízes e fungos (ligantes temporários), conforme esquematizado na Figura 2.

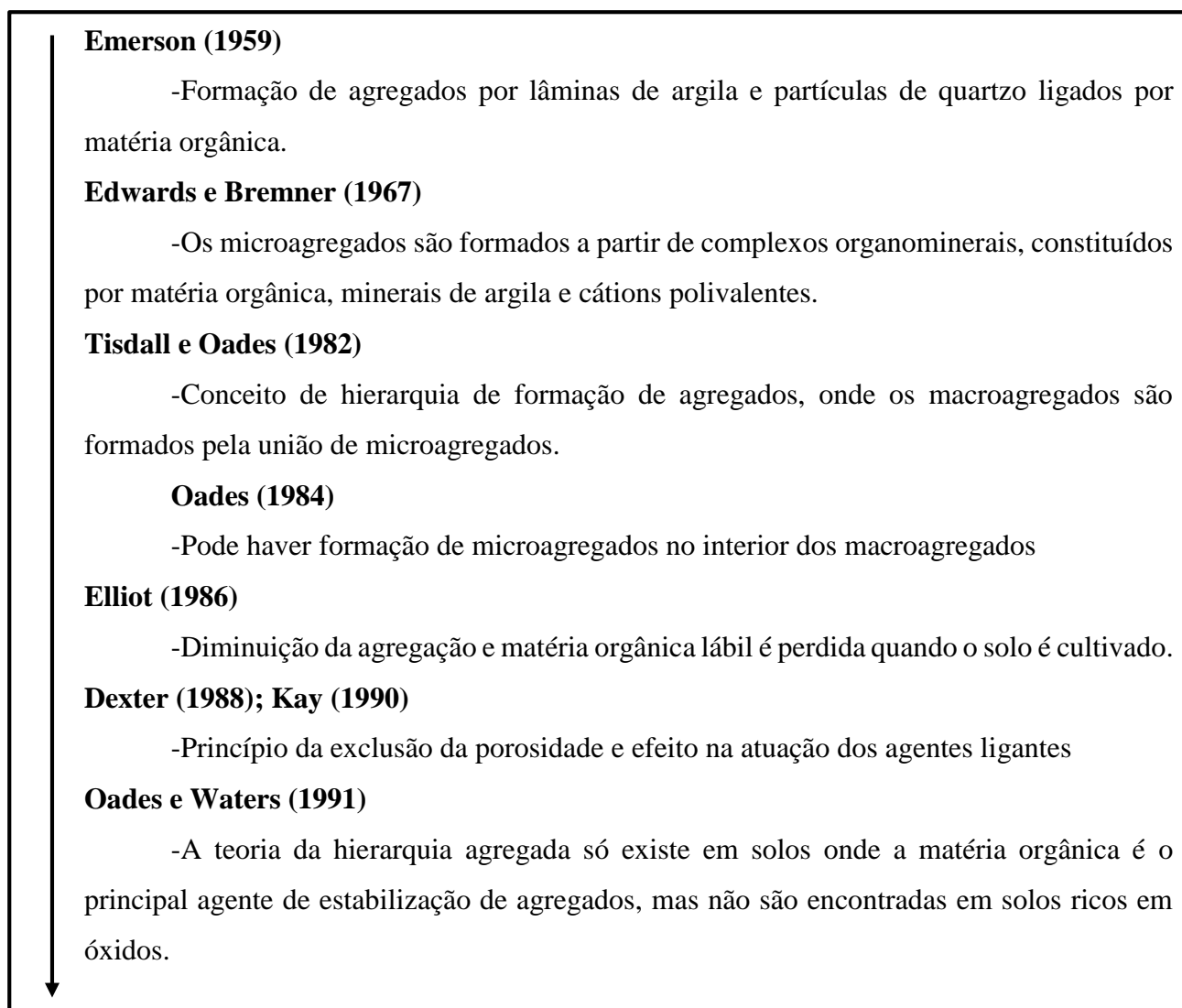


Figura 1. Principais estudos, ao longo do tempo, dos avanços no entendimento da formação e estabilização de agregados do solo relacionados a matéria orgânica do solo. Fonte: Adaptado de Six et al. (2004)

Os autores ainda explicam que devido a essa ordem de formação e aos agentes ligantes envolvidos, os microagregados apresentam maior estabilidade em relação aos macroagregados e são menos afetados pelo manejo agrícola (Six et al., 2004; Braida et al., 2011).

Pouco tempo depois da teoria de hierarquia de agregação, Oades (1984), mostrou uma pequena

modificação na formação dos microagregados. Em seu estudo, explicitou que os microagregados não são formados exclusivamente como na sequência da teoria proposta por Tisdall e Oades (1982). Os microagregados podem também se formar no interior do macroagregados, pois as raízes e hifas que mantém os macroagregados unidos temporariamente, se decompõem em fragmentos.

Esses fragmentos revestidos com mucilagens se unem a argilas e resulta em um microagregado dentro do macroagregado.

Elliott (1986), em seu experimento, corroborou com a teoria da hierarquia de agregação e mostrou que os macroagregados contêm matéria orgânica mais lábil e pode ser facilmente perdida quando o solo é cultivado, em relação aos microagregados. Este foi o estudo que, pela primeira vez, mostrou uma relação entre a perda de

agregação e carbono lábil em consequência do manejo agrícola adotado no solo. Sendo assim, dois fatores podem ser identificados se há hierarquia na formação de agregado no solo: o teor de C aumenta à medida que se aumenta a classe do agregado; o C lábil e mais recente é encontrado em maiores quantidades nos macroagregados do que em microagregados.

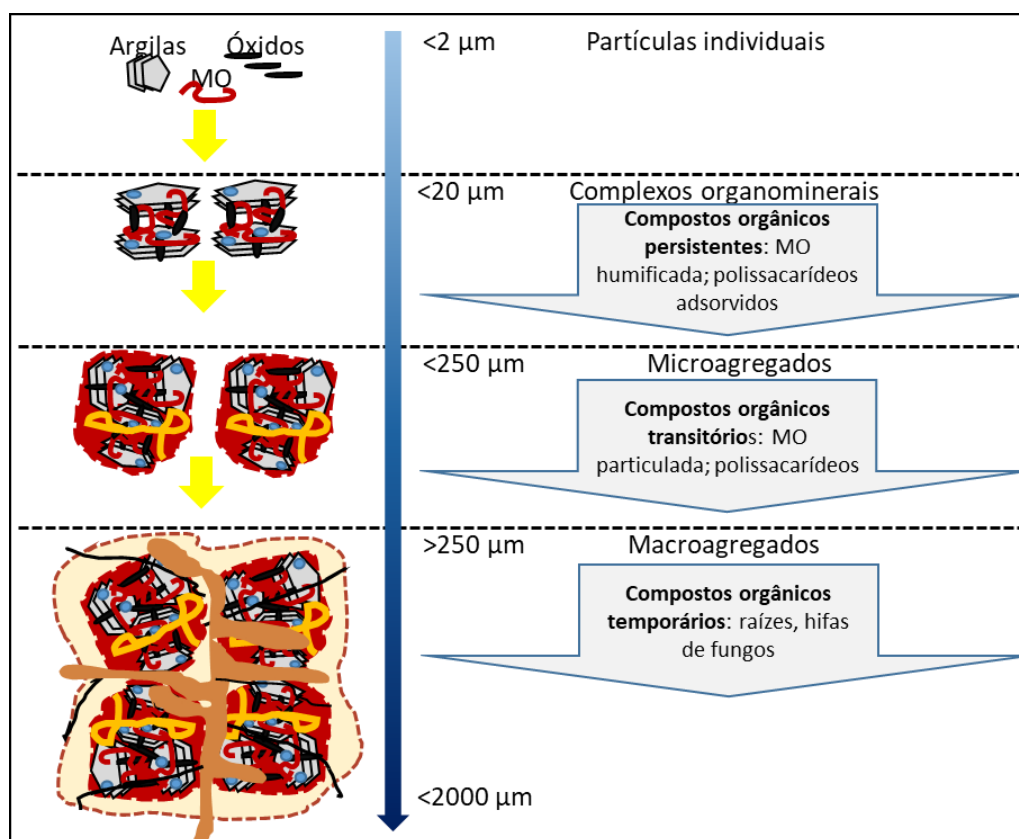


Figura 2. Teoria da hierarquia de agregação e seus principais compostos orgânicos responsáveis pela estabilidade dos agregados. Fonte: Adaptado de Tisdall e Oades (1982).

Dexter (1988), mostrou o princípio de exclusão de porosidade, pelo qual um agregado de hierarquia inferior preenche poros de um agregado de nível hierárquico superior. Portanto, a porosidade excluída em agregados de ordem inferior causa maior densidade e resistência interna em comparação aos agregados em ordem superior. Kay (1990), mostrou que a eficiência dos diferentes agentes ligantes depende da dimensão dos poros pelos quais precisam ser interligados com as partículas. Logo, os compostos inorgânicos e orgânicos com suas pequenas dimensões são capazes de estabilizar microagregados, já as raízes e as hifas terão que atuar como agentes de ligação entre partículas separadas por poros maiores.

Em seguida, Oades e Waters (1991), testaram a teoria de hierarquia agregada para três

diferentes solos: Alfisol, Mollisol e Oxisol, (Argissolo, Chernossolo e Latossolo, respectivamente na classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2018)) e quatro níveis de energia de dispersão: umedecimento lento, umedecimento rápido, agitação durante 16 h e dispersão por ultrassom. Os autores concluíram que para o Argissolo e o Chernossolo, confirmou-se a hierarquia de agregação, ou seja, os macroagregados se dissiparam em microagregados e em seguida houve a dispersão em partículas primárias, o que não ocorreu para o Latossolo. Oades e Waters (1991), constataram, portanto, que a hierarquia de formação e estabilização só é válida em solos em que a MOS é a principal agente cimentante. Em solos ricos em óxidos, como no caso do Latossolo, não se aplica totalmente a teoria

de hierarquia, já que os óxidos (juntamente com a matéria orgânica), também desempenham papel de agente agregante. A alta estabilidade de agregados em Latossolos é frequentemente atribuída a presença de óxidos, porém ainda não existe consenso de como são os mecanismos formadores e reguladores envolvidos na estabilização (Ferreira et al., 1999; Azevedo e Bonumá, 2004), contudo, sabe-se que a goethita e a hematita são os principais óxidos de Fe e a gibbsita o óxido de Al presentes desses solos (Fontes e Weed, 1991; Kämpf e Curi, 2003).

Beare et al., (1994), explicam que em solos com grandes quantidades de óxidos de ferro pode haver formação de macroagregados independente dos microagregados. Dessa forma, há primeiramente a formação de macroagregados em torno da MOS e logo após ocorre a formação de microagregados dentro dos macroagregados. Quando essa matéria orgânica é decomposta ocorre a desestabilização dos macroagregados o que libera os microagregados que formaram-se no seu interior.

A proteção física da matéria orgânica é considerada um importante mecanismo de estabilização e acúmulo de C em sistemas conservacionistas em solos de regiões subtropicais e tropicais (Conceição et al., 2008). O estudo de Conceição et al., (2008), mostrou que a proteção física foi responsável por acumular 54% do C total em um Argissolo e 23% em um Latossolo Vermelho, e demonstra que este mecanismo é importante para o acúmulo da matéria orgânica em solos sob sistema plantio direto e pastagem em comparação a sistemas convencionais. Esses resultados também corroboram com a teoria de Oades e Waters (1991), pelo qual demonstrou que 65% do C no Latossolo se encontra na fração associada aos mineiras, possivelmente pela forte interação química dos óxidos com a fração orgânica, sendo este mecanismo o principal responsável pela estabilização da MOS, para este solo.

Barreto et al., (2009), revelaram que quando os macroagregados foram destruídos, as emissões de CO₂ se intensificaram de 4 a 6 vezes mais em relação aos macroagregados que ficaram intactos, e evidencia assim que a proteção física, exercido pelos agregados, desempenha um papel importante na estabilização da MOS, inibindo a rápida perda de C para atmosfera.

Hickmann e Costa (2012), demonstram que manejos convencionais diminuíram a proporção de agregados das classes maiores (2,00-4,00 mm) e representou cerca de 55% do total de agregados, enquanto no manejo sob SPD foi observado maior

abundância da mesma classe (72%), sendo os valores mais próximos ao encontrado na floresta nativa (86%). E ainda, revelaram que são os macroagregados que apresentaram os maiores teores de C comparados com os microagregados, sendo responsáveis por 82% do teor de carbono total encontrado no solo na camada de 0-10 cm.

Loss et al. (2011), encontraram os maiores valores de diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico de agregados na área sob integração lavoura-pecuária (ILP). Esses resultados apontam que o sistema integrado tem potencial de melhorar a qualidade estrutural do solo, e concluíram que o uso da braquiária, por meio do sistema radicular, favoreceu o aumento de diâmetro dos agregados do solo, culminando em maiores índices de agregação quando comparados a área de sistema de semeadura direta, sem o uso de braquiária.

Logo, Rozane et al. (2010), constataram correlação positiva e significativa entre os diâmetros de agregados e o estoque de carbono em sistema de plantio direto, pastagem e mata, indicando a importância do conteúdo de carbono orgânico no aumento de diâmetros dos agregados do solo. Wendling et al. (2005), também verificaram boa correlação avaliando diferentes índices de estabilidade de agregados e o teor de carbono orgânico do solo.

Deste modo, constata-se uma estreita relação entre o C e o estado de agregação do solo, visto que quando a prática de cultivo tem maior aporte de material orgânico, conseqüentemente aumentará os estoques do solo, pelo qual promoverá condições propícias a formação de agregados. No entanto, além da adição de material orgânico, é crucial a adoção de manejos conservacionistas, pelo qual não ocorrerá a ruptura dos agregados, e assim, o C ficará protegido em seu interior (evitando sua rápida decomposição) o que mitiga a transferência para o compartimento atmosférico e perdas dos estoques de C do solo.

Considerações finais

No contexto de mudança climáticas e ao mesmo tempo de responsabilidade com a segurança alimentar global, manejos sustentáveis que abrangem além de altas produtividades, e levam em consideração a conservação ambiental são alternativas promissoras diante do cenário atual e longilíneo.

Vale ressaltar que o sistema ILPF merece destaque como sistema de produção sustentável (Bonaudo et al., 2014), por evitar o desmatamento, respeitar os preceitos de segurança alimentar e da

agricultura sustentável, e leva em consideração um cenário de crescente demanda por alimentos e energia, frente a uma disponibilidade cada vez menor de recursos naturais (Smith, 2015).

No entanto, considerando que esse o sistema de ILPF é relativamente recente, o estudo das interações entre o estado de agregação do solo e o sequestro de carbono especialmente pela proteção física do agregado é relevante, visto que a combinação dos componentes (lavoura, pecuária, floresta) dentro do sistema podem trazer características diferentes e contribuir de maneira distinta com a mitigação de GEE, o aumento de teores de carbono, melhor agregação do solo e proteção de carbono lábil, e assim contribuir para o desenvolvimento das atividades agropecuárias que englobem o tripé da sustentabilidade, ou seja, economicamente viável, socialmente aceitável e ambientalmente correto.

Referências

- Amado, T.J.C.; Bayer, C.; Eltz, F.L.F.; Brum, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.25, p. 189-197, 2001. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100020>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Aquino, D.N., Andrade, E.M., Almeida Castanho, A.D.A., Pereira Júnior, L.R., Palácio, H.A.Q. Belowground carbon and nitrogen on a thinned and un-thinned seasonally dry tropical forest. *American Journal of Plant Sciences*. v. 8, p.2083-2100, 2017. Disponível: <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89140>. Acesso: 05 out. 2020.
- Azevedo, A. C.; Bonumá, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Ciência Rural*, v.34, p.609-617, 2004. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200046>. Acesso: 13 nov. 2020
- Balbino, L. C.; Barcellos, A. de O.; Stone, L. F. Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta ILPF. Brasília: Embrapa, 2011. 130p.
- Barreto, R. C.; Madari, B. E.; Maddock, J. E. L.; Machado, P. L. O. A.; Torres, E.; Franchini, J.; Costa, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, v.132, p.243-251, 2009. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.008>. Acesso: 22 out. 2020.
- Batjes, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use and Management*, Oxford, v. 21, p. 22-24, 2005. Disponível: DOI: 10.1079/SUM2005286. Acesso: 04 jul. 2020.
- 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. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.677-683, 2004. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700009>. Acesso: 05 nov. 2020.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G. de A.; Camargo, F. A. de O. (Eds.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, cap.2, p.9-26, 1999.
- Bayer, C.; Spagnollo, E.; Wildner, L. D. P.; Ernani, P. R.; Albuquerque, J. A. Incremento de carbono e nitrogênio num Latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. *Ciência Rural*, v.33, n.3, p.469-475, 2003. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000300012>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Beare, M. H.; Cabrera, M. L.; Hendrix, P. F.; Coleman, D. C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.58, p.787-795, 1994. Disponível: DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800030021x. Acesso: 11 nov. 2020.
- Bernoux, M. And 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, p. 65-75, 2006.
- Bernoux, M.; Carvalho, M. C. S.; Volkoff, B.; Cerri, C. C. Brazil's soil carbono stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v.66, p.888-896, 2002. Disponível: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.8880>. Acesso: 20 mar. 2020
- Besen, M. R.; Ribeiro, R. H.; Monteiro, A. N. T. R.; Iwasaki, G. S.; Piva, J. T. Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. *Scientia Agropecuaria*. v.9 n.3, p.429-439, 2018. Disponível: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.15>. Acesso: 24 abr. 2020.
- Bochner, J. K.; Fernandes, M. M.; Pereira, M. G.; Balieiro, F. De C.; Santana, I. K. Da S. Matéria orgânica e agregação de um planossolo sob diferentes coberturas florestais. *Cerne*, v.14, n.1, p.46-53, 2008. Disponível:

- Bonaudo, T.; Bendahan, A.B.; Sabatier, R.; Ryschawy, J.; Bellon, S.; Leger, F.; Magda, D.; Tichit, M. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy*, v.57, p.43-51, 2014. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Braida J.A.; Bayer C.; Albuquerque A.; Reichert J.M. Matéria Orgânica e Seu Efeito na Física do Solo. In: Klauber Filho, O. et al. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 7. p. 221-278, 2011.
- Cardoso, A.; Potter, R.; Dedecek, R.A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no Noroeste do estado do Paraná. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 27, p.349-353, 1992.
- Carvalho, A. M. D.; Marchão, R. L.; Bustamante, M. M. D. C.; Souza, K. W. Fertilidade do solo, estoques de carbono e nitrogênio sob plantas de cobertura e sistemas de manejo. *Revista Ciência Agronômica*. v.45, n.5 p.914-921, 2014. Disponível: <https://doi.org/10.5902/1980509825310>. Acesso: 10 nov. 2020.
- Carvalho, J. L. N.; Avanzi, J. C.; Silva, M. L. N.; Mello, C. R.; Cerri, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.277-289, 2010.
- Castro Filho, C.; Muzilli, O.; Podanoschi, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, n.3, p.527- 538, 1998. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>. Acesso: 16 nov. 2020.
- Cerri, C.C.; Cerri, C.E.P.; Davidson, E.A.; Bernoux, M.; Feller, C. A ciência do solo e o sequestro de carbono. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Boletim Informativo*, v.29, n.3, p.29-34, 2004.
- Christensen, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, v.52, p.345-353, 2001. Disponível: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>. Acesso: 24 mai. 2020.
- Christensen, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (Ed.) *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.97-165
- Ciais; P.; C. Sabine; G. Bala; L. Bopp; V. Brovkin; J. Canadell; A. Chhabra; R. Defries; J. Galloway; M. Heimann; C.Jones; C. Le Quéré; R.B. Myneni; S. Piao; P. Thornton. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex; P.M. Midgley (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- Conceição, M. C. G. Da; Matos, E. Da S.; Bidone, E. D.; Rodrigues, R. De A. R.; Cordeiro, R. C. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. *Agricultural Sciences*, v.8, p.904-913, 2017. Disponível: DOI: 10.4236/as.2017.89066. Acesso 11 fev. 2020.
- Conceição, P.C.; Boeni, M.; Dieckow, J.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.541-549, 2008. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200009>. Acesso: 05 nov. 2020.
- Cornejo, j.; hermosín, M. C. Interaction of Humic Substances and Soil Clays. In: PICCOLO, A. (Ed.) *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.595-624.
- Costa, F. S.; Gomes, J.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 693-700, 2006. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000200056>. Acesso: 20 ago. 2020.
- Costa, F. S.; Zanatta, J. A.; Bayer, C. Emissão de gases efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SILVA, L. D.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. D. O. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*, v. 2, p. 495-524, 2008
- Davidson, E. A.; Janssens, I. A. Temperature Sensitivity of Soil Carbon Decomposition and Feedbacks to Climate Change. *Nature*, v.440, p.165-173, 2006. Disponível: DOI: 10.1038/nature04514. Acesso: 08 nov. 2020

- Dexter, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, v.11, p.199-238, 1988. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5). Acesso: 13 nov. 2020.
- Dias, B. de O.; Silva, C. A.; Soares, E. M. B.; Bettiol, W. Estoque de carbono e quantificação de substâncias húmicas em Latossolo submetido à aplicação contínua de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.4, p.701-711, 2007. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400011>. Acesso: 24 jan. 2020.
- Dias, L. E; Franco, A. A.; Campello, E. F. C. Fertilidade do solo e seu manejo em áreas degradadas. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R.L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Eds.) *Fertilidade do solo*. p.956-982. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- Dieckow, J.; Bayer, C.; Conceicao, P.C.; Zanatta, J.A.; Martin-Neto, L.; Milori, D.B.M.; Salton, J.C.; Macedo, M.M.; Mielniczuk, J. & Hernani, L.C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. *European Journal of Soil Science*, v.60, p.240-249, 2009. Disponível: DOI: 10.1111/j.1365-2389.2008.01101.x. Acesso: 10 nov. 2020.
- Donagemma, G. K.; Viana, J. H. V.; Andrade, A. G. de. *Propriedades físicas do solo influenciadas por sistemas de preparo e manejo: uma revisão*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 69 p. (Documentos 100).
- Edwards, A.P.; Bremner, J.M. Microaggregates in soils. *European Journal of Soil Science*, v. 18, p.64-73, 1967. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1967.tb01488.x>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Elliott, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society America Journal*. v.50, p. 627-633, 1986. Disponível: <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>. Acesso 12 nov. 2020.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 5. Ed. Brasília: DF, 2018, 356 p.
- Emerson, W. W. Stability of soil crumbs. *Nature*, v.183, p.538-538, 1959. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1954.tb02190.x>. Acesso: 11 nov. 2020.
- Eswaran, H; Van Den Berg, E.; Reich, P. Organic carbono in soils of the worl. *Soil Science Society of America Journal*. v.57, p.192-194, 1993. Disponível: <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010034x>. Acesso: 11 nov. 2020.
- Ferreira, M.M.; Fernandes, B.; Curi, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.515-524, 1999. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300004>. Acesso: 20 out. 2020.
- Fontes, M.P.F.; Weed, S.B. Iron oxides in selected brazilian Oxisols: I. Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, v.55, p.1143-1149, 1991. Disponível: <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500040040x>. Acesso: 01 jul. 2020
- Freitas, L. De; Oliveira, I. A. De; Casagrande, J. C.; Silva, L. S.; Campos, M. C.C. Estoque de carbono de Latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. *Ciência Florestal*, v.28. n.1, p.228-239, 2018. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831575>. Acesso: 07 jun. 2020.
- Hickmann, C.; Costa, L. D. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.10, p. 1055-1061, 2012. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000004>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Iamaguti, J. L.; Moitinho, M. R.; Teixeira, D. D.; Bicalho, E. D. S.; Panosso, A. R.; La Scala, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, n.5, p.497-504, 2015. Disponível: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504>. Acesso: 12 nov. 2020
- Isernhagen, E. C. C.; Rodrigues, R. De, A. R.; Diel, D.; Matos, E. Da, S.; Conceição, M. C. G. da. Estoques de carbono lábil e total em solo sob integração lavoura-pecuária-floresta na região de Transição Cerrado/Amazônia. *Nativa*, v.5, p.515-521, 2017. Disponível: DOI: 10.5935/2318-7670.v05nespa09. Acesso: 05 nov. 2020.
- Joris, H. A. W.; Caires, E. F.; Scharr, D. A.; Bini, Â. R.; Haliski, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.162, p.68-77, 2016. Disponível: DOI: 10.1016 / j.still.2016.04.009. Acesso: 09 nov. 2020

- Kaiser, K.; Guggenberger, G. Mineral surfaces and soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, v.54, p.219-236, 2003. Disponível: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00544.x>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Kämpf, N.; Curi, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: Curi, N.; Marques, J.J.; Guilherme, L.R.G.; Lima, J.M. De; Lopes, A.S.; Alvarez V., V.H. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-54, 2003.
- Kay, B.D. Rates of change of soil structure under diferente cropping systems. *Advances in Soil Science*. 12, p. 1-52, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3316-9_1. Acesso: 16 nov. 2020.
- Kern, J.S; Johnson, M.G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbono levels. *Soil Science Society of America Journal*, v. 57, p. 200-210, 1993. Disponível: DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700010036x. Acesso: 15 nov. 2020.
- Ladd, J. N.; Foster, R. C.; Skjemstad, J. O. Soil structure: carbon and nitrogen metabolism. *Geoderma*, Amsterdam, v.56, p.401-434, 1993. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90124-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90124-4). Acesso: 14 nov. 2020.
- Lal, R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, v.363, n.1492, p.815-830, 2008. Disponível: August 2007 <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>. Acesso: 11 nov. 2020.
- Lal, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, v.60, p.158-169, 2009. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>. Acesso: 07 nov. 2020.
- Lal, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development*, v.17, n.2, p.197-209, 2006. Disponível: DOI: 10.1002/ldr.696. Acesso: ago. 2020.
- Lal, R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, v.220, n.1-3, p.242-258, 2005. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>. Acesso: 25 mai. 2020.
- Lal, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v.304, p.1623-1627, 2004. Disponível: DOI: 10.1126/science.1097396. Acesso: 12 out. 2020.
- Lal, R. Soil carbon sequestration in Latin América. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J.; Cerri, C. E. P. (Ed.). *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York: Howarth, p.49-64, 2006.
- Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, Amsterdam, v.123, p.1-22, 2004. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>. Acesso: 24 ago. 2020.
- Lal, R. Soil quality and sustainability, In: LAL, R. et al., eds. *Methods of assessment of soil degradation*. Boca Raton, CRC Press, 1997. p.17-30.
- Loss, A.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C.; Giacomo, S. G.; Perin, A. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.46, p.568-76, 2011. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022>. Acesso: 23 out. 2020.
- Machado, P.L.O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, v.28, n.2, p.328-334, 2005. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Mielniczuk, J. Importância do estudo de raízes no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. In: *Workshop sobre sistema radicular: metodologias e estudo de caso*, 1999, Aracaju, SE. Anais... Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 1999. p.13-17.
- Mielniczuk, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: *Fundamentos da matéria orgânica do solo em ecossistemas tropicais e subtropicais*. *Metrópole* 2.ed. Porto Alegre, p.1-4, 2008
- 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*, eds. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.209-248.
- Oades, J.M.; Waters, A.G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, v.29, p.815-828, 1991. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600009>. Acesso: 13 nov. 2020.
- Oades, J.M., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76,

- 319–337. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02205590>. Acesso: 16 nov. 2020.
- Oliveira J. De M.; Madari, B.E.; Carvalho, M. T. De M.; Assis, P. C. R.; Silveira, A. L. R.; Lima, M. De L.; Wruck, F. J.; Medeiros, J. C.; Machado, P. L. O. de A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change*. 2017. Disponível: DOI 10.1007/s10113-017-1146-0. Acesso: 14 nov. 2020.
- Oliveira, J. de M. Carbono no solo em sistema integrados de produção agropecuária no cerrado e na transição Cerrado-Amazônia. 2015. 92 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- Pagliai, M.; Vignozzi, N.; Pellegrini, S. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, v. 79, p.131-143, 2004. Disponível: Doi10.1016/j.still.2004.07.002. Acesso: 14 nov. 2020
- Paiva, A. O.; Rezende, A. V.; Pereira, R. S. Estoque de carbono em cerrado sensu stricto do Distrito Federal. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 527-538, 2011. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000300015>. Acesso: 12 out. 2020.
- Paustian, K.; Andrés, O.; Janzen, H.H.; Lal, R.; Smith, P.; Tian, G.; Tiessen, H.; Van Noordwijk, M.; Wooster, P. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use Manag.*, v.13, p.230-244, 1997. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>. Acesso: 10 out. 2020.
- Pillon, C. N. Mielniczuk, J. Martin Neto. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002, 41p. (Documentos, 105).
- Prosdocimi, M.; Cerdà, A.; Tarolli, P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*, v. 141, p. 1-21, 2016. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.010>. Acesso: 09 out. 2020.
- Razafimbelo, T. M., Albrecht, A., Oliver, R., Chapuis-Lardy, L., Feller, C.: Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil Tillage Research*, v.98, p.140–149, 2008. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.012>. Acesso: 15 abr. 2020.
- Rosa, M. E. C.; Olszewski, N.; Mendonça, E. S.; Costa, L. M.; Correia, J. R. Formas de carbono em Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 911-923, 2003. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500016>. Acesso: 14 nov. 2020
- Rozane, D. E.; Centurion, J. F.; Romualdo, L. M.; Taniguchi, C. A. K.; Trabuco, M.; Alves, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. *Bioscience Journal*, v.26, p.24-32, 2010.
- Schlesinger, W. H. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. 2nd. ed. Academic Press, 588 p., 1997.
- SEEG. Sistema de emissões de gases de efeito estufa do observatório do clima, 2018. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#> Acesso em: 05 de novembro de 2019.
- SEEG. Sistema de emissões de gases de efeito estufa do observatório do clima, 2019. Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf> Acesso em: 10 de novembro 2020
- Silva, L.S.; Camargo, F.A.O.; Ceretta, C.A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E.J. Fundamentos de química do solo. Porto Alegre, 2004. p.73-99
- Siqueira, j. o.; soares, c. r. f. s.; silva, C. A Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. In: SILVA, L. D., CANELLAS, L. P.; Camargo, F. D. O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais, v.2, p.495-524, 2008.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K.: Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, p.681–689, 2000. Disponível: DOI: 10.2136/sssaj2000.642681x. Acesso: 01 out. 2020.
- Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S.; Deneff, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Research*. v.79, p.7-31, 2004. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>. Acesso: 09 set. 2020.
- 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*, v.22, p.755-775, 2002. Disponível:

- DOI:10.1051/AGRO:2002043. Acesso: 28 abr. 2020.
- Smith, P. Malthus is still wrong: we can feed a world of 9-10 billion, but only by reducing food demand. *Proceedings of the Nutrition Society*, v.74, p.187-190, 2015. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1017/S0029665114001517>. Acesso: 22 out. 2020.
- Sollins, P.; Homann, P. Caldwell, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, v.74, p.65-105, 1996. Disponível: DOI: 10.1016/S0016-7061(96)00036-5. Acesso: 23 jul. 2020.
- Stefanoski, D. C.; Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Petter, F. A.; Pacheco, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 12, p. 1301- 1309, 2013. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>. Acesso: 04 out. 2020.
- Stevenson, F.J.; *Humus Chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc.; New York, 1994.
- Stotzky, G. Influence of soil mineral colloids on metabolic process, growth, adhesion, and ecology of microbes and viruses. In: HUANG, P.M.; SCHNITZER, M. *Interactions of soils minerals with natural organics and microbes*. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p.305-428. (Special Publication, 17)
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*, v.33, p.141-163, 1982. Disponível: DOI: 10.1111 / j.1365-2389.1982.tb01755.x. Acesso: 28 mai. 2020.
- Torres, J.L.Z.; Fabian, A.J.; Pereira, M.G.; Andrioli, I. Influência de plantas de cobertura na temperatura e umidade do solo na rotação milho-soja em plantio direto. *Revista Brasileira de Agrociência* v. 12, p.107-113, 2006. Disponível: <HTTPS://DOI.ORG/10.18539/CAST.V12I1.4498>. Acesso: 24 out. 2020.
- Wendling, B.; Juckson, I.; Mendonça, E. S.; Neves, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>. Acesso: 02 set. 2020.