

# Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta

*Alberto C. de Campos Bernardi*

*Amanda M. Tadini*

*Wanderlei Bieluczyk*

*José Ricardo Macedo Pezzopane*

*Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado*

*Beata Eموke Madari*

*Ladislau Martin Neto*

## Introdução

Agricultura conservacionista é um sistema de produção embasado no mínimo revolvimento do solo (como por exemplo, o sistema plantio direto), na manutenção da cobertura vegetal permanente do solo (como por exemplo, a palhada sobre o solo) e na diversificação de plantas (como por exemplo, a rotação de culturas gramíneas e leguminosas), contribuindo para a sustentabilidade da produção, melhoria da biodiversidade e dos processos biológicos naturais, além de aumentar o uso eficiente da água e de nutrientes (FAO, 2022). Assim, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e suas variações, como o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ou o sistema de integração pecuária-floresta (IPF), apresentam estreita relação com a agricultura conservacionista, pois (1) melhoram as condições físicas, químicas e biológicas, por preconizarem o mínimo revolvimento do solo; (2) aumentam a ciclagem e a eficiência de utilização dos nutrientes pelas plantas, devido à rotação ou consórcio de gramíneas com leguminosas e espécies florestais; (3) elevam a competitividade do empreendimento rural, pela oferta regular de forragens, grãos e madeiras; e (4) diversificam e estabilizam a renda na propriedade rural, além de viabilizarem a recuperação de áreas com pastagens degradadas (Wilkins, 2008; Balbinot Jr. et al., 2009; Macedo, 2009; Salton et al., 2014; Cordeiro et al., 2015). Além disso, sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta se caracterizam pela intensificação sustentável, ou seja, ao

mesmo tempo que possibilitam altas produtividades das culturas e melhoram a qualidade da forragem ofertada a animais, promovem a melhoria dos serviços do ecossistema (como por exemplo, sequestro de carbono, recarga de aquíferos) e melhoram a qualidade do solo (Buckwell et al., 2014). A produtividade de grãos é geralmente maior na rotação de culturas produtoras de grãos com pastagens do que de lavouras de grãos em monocultivo (Moraes et al., 2014).

O solo é um componente da superfície da Terra que se formou a partir de materiais geológicos e da biomassa em decomposição. As partes sólidas, líquidas e gasosas constituem um sistema tridimensional e dinâmico, podendo ser vegetado naturalmente ou ter sido modificado pelo homem para cultivo agrícola, extração de materiais (como por exemplo, argila, areia, cascalho e turfa), fixação de edificações e diversas construções ou instalações civis (Blum et al., 2018; Souza et al., 2018). A matéria orgânica do solo (MOS), definida no Capítulo 1, é um dos quatro componentes básicos do solo, contém grandes quantidades de carbono e nitrogênio e é indicadora-chave da qualidade e saúde do solo. A MOS influencia o conteúdo de água e ar do solo, sua temperatura, sendo também muito importante nas reações de trocas iônicas que condicionam o grau de fertilidade do solo (Blum et al., 2018). Pelo fato de o solo possuir a função ecológica de produzir biomassa, é este o principal meio de crescimento de plantas para o fornecimento de alimentos para o homem e para os animais, além de gerar matéria-prima e energia renováveis.

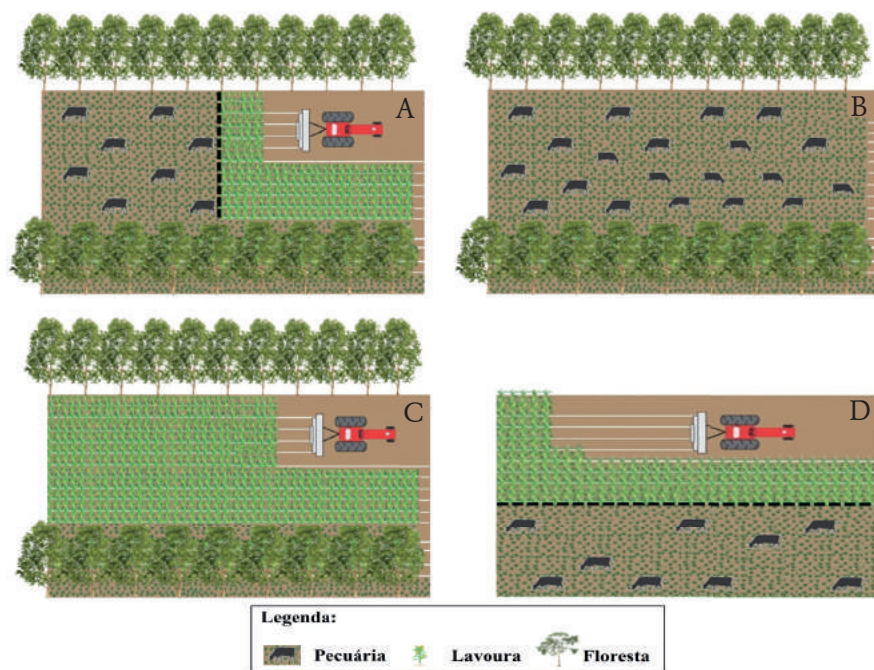
Pelo fato de conter quantidade de carbono quase quatro vezes maior do que a encontrada na vegetação ou na atmosfera terrestre, o solo tem alta relevância no equilíbrio climático (Houghton et al., 2009). A capacidade do solo para a produção de alimentos, aliado ao potencial de mitigação das mudanças climáticas (Capítulo 7), tem despertado atenção especial no contexto dos problemas ambientais atuais (Vermeulen et al., 2019). O desafio atual é manter e avançar na capacidade produtiva dos solos dos sistemas de produção agropecuários com simultâneo combate à degradação ambiental, de modo a promover a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e a adaptação às mudanças climáticas (Rockström et al., 2016). Além disso, o crescimento global da população até 2050, quando deve superar 9 bilhões de habitantes, trará consigo o crescimento da prosperidade, mudanças de padrões alimentares nas economias emergentes e aumento da demanda por dietas mais variadas e, conseqüentemente, exigirá recursos adicionais para a produção, aumentando a pressão sobre os sistemas de produção de grãos, forragens, fibras e energia renovável (Serraj et al., 2018; Ramankutty et al., 2018, Rockström et al., 2016). Não se trata, portanto, unicamente, da necessidade de aumento na produção global de alimentos (FAO, 2017). Nesse contexto,

surge a demanda de uma economia mais descarbonizada, na qual os sistemas de integração podem levar a maior produtividade da agricultura e maior diversidade de produtos, aliadas ao menor impacto ambiental (Lemaire et al., 2014; Alves et al., 2017; Sá et al., 2017).

Os sistemas ILPF representam uma oportunidade no conjunto de estratégias para a intensificação agropecuária mais sustentável do Brasil, pois têm o potencial de recuperar vastas áreas de pastagens degradadas, incorporar os princípios da agricultura conservacionista e, ao mesmo tempo, diminuir a intensidade das emissões de gases de efeito estufa (Cortner et al., 2019; Sá et al., 2017). O uso mais eficiente do solo conjugado com a adoção de boas práticas de manejo das pastagens e dos animais pode aumentar a produção de produtos pecuários por unidade de pasto em até 2,5 vezes, em relação aos sistemas convencionais de pastagem com baixa capacidade de suporte e pastejo contínuo (Martha Jr., 2012). Além disso, o manejo adequado possibilita que o solo forneça os serviços ecossistêmicos, que incluem a produção de alimentos, fibras e energia, regulação do clima, redução de inundações, controle da erosão, melhoria da qualidade do ar e da água e reservatório para a biodiversidade, bem como aumentar a resiliência do ecossistema diante das mudanças climáticas (Bouma, 2014; Lal, 2016).

### **Integração lavoura-pecuária-floresta**

A integração lavoura-pecuária-floresta é definida como uma “estratégia de produção sustentável que integra atividades de cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado, buscando-se efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, adequação ambiental, valorização do homem, maior viabilidade econômica e aumento da sustentabilidade dos sistemas de produção de alimentos” (Balbino et al., 2011). Os sistemas integrados incluem os componentes em diferentes combinações (Figura 1): sistema lavoura-pecuária-floresta (ILPF), sistema pecuária-floresta (IPF), sistema lavoura-floresta (ILF) e sistema lavoura-pecuária (ILP). Skorupa e Manzatto (2019) mostraram que os principais sistemas integrados em uso no Brasil são os sistemas ILP, ILPF e o IPF, que representam 83%, 9% e 7% dos sistemas integrados adotados, respectivamente. A adoção desses diferentes sistemas integrados varia de acordo com a região, pois há diferentes incentivos agrícolas e econômicos de um local para o outro (Martha Jr. et al., 2011). O componente florestal é ainda o menos adotado entre os agricultores brasileiros, principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul do Brasil (Skorupa; Manzatto, 2019). Polidoro et al. (2021) estimaram que as quatro modalidades de estratégias do ILPF, nos cinco biomas do Brasil, englobavam, em 2020, a área total de 17,4 milhões de hectares.



**Figura 1:** Ilustração de diferentes sistemas integrados de cultivo: (A) sistema lavoura-pecuária-floresta (ILPF), (B) sistema pecuária-floresta (IPF), (C) sistema lavoura-floresta (ILF) e (D) sistema lavoura-pecuária (ILP).

Fonte: Adaptado de Balbino et al. (2011), Bieluczyk et al. (2020) e Tadini et al. (2021b).

As vantagens das modalidades de ILPF estão bem definidas, como seus efeitos sinérgicos positivos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo que atenuam a degradação em comparação com a agricultura tradicional (Laroca et al., 2018; Borges et al., 2019; Damian et al., 2021; Valani et al., 2022; Silva et al., 2022). Essa melhoria das propriedades edáficas é uma proteção contra a erosão, além de promover maior ciclagem de nutrientes (Xavier et al., 2014) e proporcionar retorno financeiro (Martha Jr. et al., 2011; Reis et al., 2019; Tupy et al., 2019; Vinholis et al., 2021). No Brasil, de acordo com Skorupa e Manzatto (2019), as principais motivações para os agricultores adotarem sistemas integrados são: mitigar os impactos ambientais inerentes à atividade agropecuária; aumentar a produtividade das culturas e recuperar pastagens degradadas.

No Brasil, os cultivos consorciados ou sistemas de integração não são práticas recentes. No início do século XX, já se praticava a agricultura com criação animal de forma integrada, ou seja, por exemplo, nas terras baixas do Rio Grande do Sul, após a colheita do arroz, bovinos pastejavam na resteva do

arroz. O consórcio de arroz de sequeiro com forrageiras já era praticado em solos mais férteis no início da agropecuária no Brasil Central. O consórcio de arroz-pastagem, denominado Sistema Barreirão (Kluthcouski et al., 1991), foi o sistema pioneiro desenvolvido na década de 1980 pela Embrapa Arroz e Feijão, com objetivo de recuperar ou reformar áreas com pastagens degradadas no Brasil Central. Tem como características o condicionamento físico e químico do solo, utilizando a aração profunda com arado (preferencialmente de aiveca), para romper as camadas compactadas ou adensadas, incorporar corretivo da acidez no subsolo e controlar o banco de sementes de plantas daninhas. Ainda hoje, ele é utilizado com essas finalidades e como estratégia de manejo do solo para a implantação das outras modalidades de sistemas integrados.

A partir da década de 1990, o Sistema Santa Fé foi consolidado, tendo como objetivo a produção consorciada de culturas de grãos (especialmente milho, sorgo, milheto e arroz) com forrageiras tropicais, principalmente as do gênero *Brachiaria* (syn. *Urochloa*), em áreas de lavoura ou pastagens com solo parcial ou totalmente corrigido com calcário (Kluthcouski; Aidar, 2003). Nesse sistema a cultura anual apresenta grande desenvolvimento inicial e inibe o crescimento das forrageiras, evitando a interferência de plantas espontâneas na produtividade da cultura principal. O Sistema Santa Fé é uma opção para produção de palhada em quantidade e qualidade para o plantio direto e produção de forragem no período da entressafra.

O Sistema Santa Brígida (Oliveira et al., 2010) representou uma evolução dos sistemas de integração ao utilizar o sistema plantio direto (SPD) com a inserção de adubos verdes (como o guandu-anão, *Cajanus cajan*) no sistema de produção e plantio simultâneo de milho e cultivo de pasto. Sob essas condições, há fixação biológica do  $N_2$  atmosférico pela leguminosa e produção de grãos e forragens de melhor qualidade no período seco do ano.

Outra modalidade mais recente é o Sistema São Mateus (Salton et al., 2013), que é um sistema ILP indicado para regiões de solos arenosos, com baixa capacidade de armazenamento de água das chuvas e distribuição irregular das chuvas ao longo do ano. Geralmente, é implantado em áreas onde há ocorrência de veranicos no período chuvoso. O sistema São Mateus propõe a antecipação da correção química e física do solo, via a recuperação ou renovação da pastagem, e o cultivo de soja em plantio direto na safra seguinte.

O desenvolvimento desses sistemas (Barreirão, Santa Fé, Santa Brígida e São Mateus) impulsionaram outras diferentes combinações de sistemas de integração, como o Sistema Santa Ana, em 2015, o Sistema São Francisco, em 2017, e o Sistema Gravataí, em 2018. Além disso, em sequência à implantação, houve a inserção do componente arbóreo, principalmente eucalipto melhorado,

nos sistemas de lavouras e pastagens, o que representou um avanço dos sistemas ILP (Cordeiro et al., 2015). Um amplo histórico do sistema ILPF nas diferentes regiões do Brasil, incluindo uma avaliação da adoção e dos impactos, pode ser encontrado em Vilela et al. (2019).

### ***ILPF: apoio de política pública para ampliar a adoção***

Em 2009, durante a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 15) da UNFCCC, realizada em Copenhague, Dinamarca, de maneira voluntária, o Governo do Brasil submeteu o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), como parte da Ação de Mitigação Nacionalmente Apropriada (NAMA) que tinha como meta a redução da emissão de 166 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq entre 2010 e 2020 (Brasil, 2012). Ainda em 2009, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima por meio da Lei nº 12.187. Em 9 de dezembro de 2010, foi publicado o Decreto nº 7.390 estabelecendo o Plano ABC e, vinculado a ele, foram criadas linhas de crédito (Programa ABC). O Programa ABC disponibilizou cerca de R\$2,0 bilhões para financiamento das práticas conservacionistas de manejo do solo e sistemas de cultivo no âmbito do Plano ABC com juros mais atrativos, ao mesmo tempo que incorporou linhas de crédito do Programa de Incentivo à Produção Sustentável do Agronegócio (PRODUSA), com cerca de R\$1,0 bilhão, e do Programa de Plantio Comercial e Recuperação de Florestas (PROPFLORA) destinados às finalidades semelhantes e ao mesmo público (Brasil, 2012). O Plano ABC estabeleceu como meta a ampliação da adoção das seguintes práticas ou ações de mitigação e adaptação às mudanças do clima: (1) recuperação de pastagens degradadas (RPD): recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas; (2) ILPF: implantação de 4 milhões de hectares de sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e de suas variações, como a ILP ou IPF e dos sistemas agroflorestais (AF); (3) SPD: adoção do sistema de plantio direto em 8 milhões de hectares; (4) fixação biológica de nitrogênio (FBN): ampliação em 5,5 milhões de hectares com aplicação da tecnologia fixação biológica de nitrogênio; (5) floresta plantada (FP): aumento da área de reflorestamento em 3,0 milhões de hectares; e (6) tratamento de dejetos de animais (TDA): tratamento de 4,4 milhões de toneladas de dejetos de animais. Com a implementação dessas ações, buscava-se a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) da ordem de 133,9 a 162,9 milhões de toneladas CO<sub>2</sub>eq até 2020.

Em avaliação recente sobre o alcance das práticas selecionadas pelo Plano ABC, observou-se que houve uma ampliação da ordem de 91 a 114 milhões

de hectares, correspondendo entre 93% e 115% da meta compromisso de 33,5 milhões de hectares. No período considerado, houve uma expansão de 66%, 86% e 45% para RPD, ILP e SPD, respectivamente, com mitigação das emissões variando de cerca de 106% a 170% da meta estabelecida (Manzatto et al., 2020). Para TDA, a mitigação das emissões apresentou ampla variação, atingindo faixa na redução de 39% a 103% da meta prevista. No caso da ILPF, a expansão da adoção do sistema se deu em 5,83 milhões de hectares, ou seja, área 146% maior do que a previamente estabelecida como meta. Apesar das dificuldades enfrentadas para monitorar a efetiva adoção das práticas do Plano ABC (Carauta et al., 2021), o Programa ABC gerou estímulos para a maior adoção de sistemas de integração por produtores mais inovadores e, além disso, pequenos ajustes nos esquemas de financiamento podem contribuir para ampliar o uso de práticas mais sustentáveis (Carauta et al., 2017; Cortner et al., 2019). Como consequência, o Plano ABC resultou em motivação para o estabelecimento do Plano ABC+, para o período de 2020 a 2030, como parte da contribuição nacionalmente determinada (NDC) do Brasil, dentro do Acordo firmado na COP 21 de Paris, em 2015 (Brasil, 2021). O Plano ABC é um exemplo internacional de política pública para a implementação de ações de adaptação e mitigação de emissões de GEE em larga escala na agricultura, similar às existentes na Austrália, Quênia, Níger ou Índia, mas bem mais abrangente quanto às práticas selecionadas (Cooper et al., 2013).

Ao examinarem as políticas de incentivo à intensificação da pecuária no Brasil, Cohn et al. (2014) concluíram que o sistema ILPF é uma alternativa viável para reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa ao poupar terras do desmatamento. Além disso, os sistemas ILPF podem também ser consideradas tecnologias viáveis de combate à degradação do solo, por isso, estão em consonância com iniciativas internacionais como a *Global Soil Partnership* (GSP) e *4 por mille Initiative - Soils for Food Security and Climate*. A FAO estabeleceu, em 2012, a GSP para desenvolver sinergias entre organizações nacionais e internacionais numa ação global para estimular o uso sustentável dos recursos do solo (Montanarella, 2015). Outra iniciativa, a *4 por mille - Soils for Food Security and Climate*, lançada em Paris, França, na COP21, tem o objetivo de aumentar os estoques globais de matéria orgânica do solo em 4 por 1000 (ou 0,4%) por ano, na camada de solo de 0 - 30 cm, para a compensação das emissões globais de gases de efeito estufa gerados por fontes antropogênicas (Minasny et al., 2017). Rumpel et al. (2020) apresentaram os desafios para a implementação da iniciativa 4 por 1000, e identificaram barreiras, riscos e *trade-offs* para estimular a inovação e iniciar a transição dos sistemas agrícolas para sistemas de cultivo mais conservacionistas e menos emissores de gases-estufa.

O Brasil também está alinhado com a agenda internacional que busca o uso sustentável dos recursos naturais, incluindo o recurso solo, e com as premissas do acordo que definiu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (*Sustainable Development Goals*) (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento e, neste contexto, a matéria orgânica dos solos é fator-chave para se alcançar os ODS (Madari et al., 2020).

### **Compartimentos de MOS em sistemas de cultivo integrado**

A MOS tem papel fundamental na sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuário devido a sua influência nas propriedades físicas, biológicas e químicas do solo. O C é um fator que controla processos-chaves no solo, notadamente, ciclagem de nutrientes, dinâmica da água, atividade de microrganismos e fluxos de gases de efeito estufa (Schmidt et al., 2011; Paul, 2016; Santoiemma, 2018; Wiesmeier et al., 2019; Neal et al., 2020). A adaptação, mitigação e garantia da segurança alimentar no contexto das mudanças climáticas podem ser asseguradas aumentando o sequestro de carbono orgânico do solo por meio da adoção de práticas adequadas de manejo do solo e sistemas de produção (Rumpel et al., 2020).

A importância da MOS em regiões de clima tropical e subtropical com solos altamente intemperizados é ainda maior que a dos climas temperados. Os solos de regiões de clima tropical naturalmente apresentam baixas concentrações de nutrientes, notadamente baixa disponibilidade de P e N, e maiores taxas de decomposição de matéria orgânica do que solos de clima mais frio e menos úmido. Devido à composição mineralógica dos solos tropicais, onde predominam os argilominerais 1:1, como a caulinita, e óxidos e hidróxidos de Fe e Al (hematita, magnetita goethita), a MOS é a principal fonte natural e matriz de retenção de nutrientes para as plantas (Lal, 2004; Bayer et al., 2011; Lal, 2019).

As taxas de acúmulo de MOS frequentemente são expressas em carbono (C), assumindo que em torno de 58% da MOS é composta de C e que o tempo para atingir um novo equilíbrio de C, bem como a capacidade do solo de manter os níveis de C, dependem do aporte de material orgânico, da sua taxa de mineralização, da textura do solo e do clima, entre outros fatores (Houghton et al., 2009; Lal, 2016). Solos argilosos, potencialmente, contribuem para o maior armazenamento de C e, sob condições de vegetação nativa, possuem estoques maiores (Zinn et al., 2007). O impacto da mudança nos estoques de C, no entanto, pode ser mais pronunciado e materializado no desempenho agrônomico em solos de textura leve. O conteúdo original de C e a qualidade do solo (Cardinael et al., 2017) são outros fatores importantes.



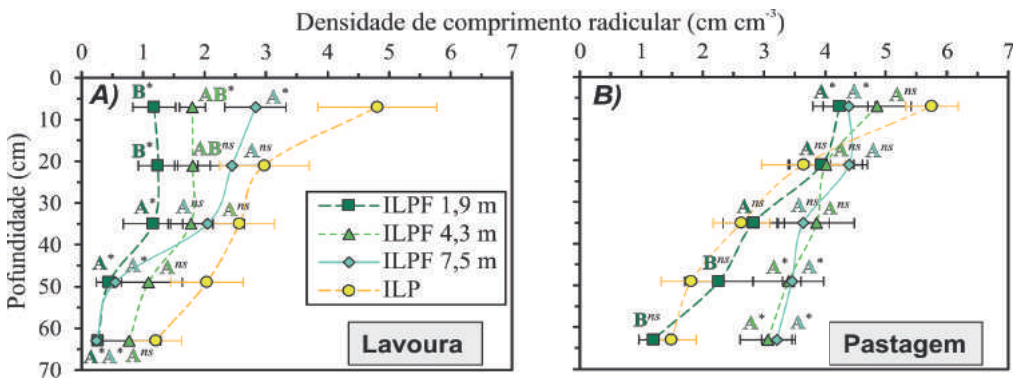
O sucesso dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta na promoção do maior acúmulo e na manutenção do C no solo dependerá em grande parte do sucesso do uso de boas práticas de manejo dentro do sistema ILPF ao longo do tempo. Algumas delas são associadas ao menor revolvimento do solo por meio da ação de máquinas, promoção e manutenção da estrutura e qualidade física do solo (agregação do solo, infiltração e retenção de água), por isso, é necessário que haja aportes contínuos de biomassa para assegurar maior armazenamento e acúmulo do C, cobertura constante do solo para redução da erosão e adoção de práticas de manejo e cultivo do solo que assegurem aporte contínuo de resíduos orgânicos e palhadas (restos de cultura) para repor os nutrientes exportados na colheita e fornecer substrato para os microrganismos e nutrientes para as plantas (Oliveira et al., 2018).

### ***Produção de biomassa***

A diversificação de espécies vegetais deve ocorrer na adoção de estratégias intensificadas que promovam, conjuntamente, benefícios ambientais, sociais e econômicos (Magalhães et al., 2019). Os sistemas de produção da pecuária baseados na integração lavoura-pecuária e na integração lavoura-pecuária-floresta proporcionam um aumento da produção da biomassa de forragem quando comparados com os sistemas extensivos e manejo não conservacionista de áreas de pastagens.

Avaliando a produção anual de forragem em diversos sistemas de produção pecuária, Pezzopane et al. (2020b) constataram que, na média de dois anos de avaliação, o sistema extensivo produziu 4,85 Mg de matéria seca de forragem por hectare por ano ( $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), contra 13,48  $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na ILP baseada no processo de renovação da pastagem com a cultura do milho, e 9,67  $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na ILPF com o eucalipto como sistema arbóreo. No sistema ILPF, a redução da produção de forragem, em comparação ao sistema ILP, foi associada ao elevado sombreamento proporcionado pelas árvores, o que pode ser minimizado com o manejo do componente arbóreo (Pezzopane et al., 2020b). A presença do componente arbóreo amplia a capacidade de produção de biomassa nos sistemas, em função do potencial de produção das árvores. Em um experimento de ILPF com eucaliptos (*Eucalyptus urograndis* Clone GG100), numa avaliação da biomassa total das árvores (parte aérea e raiz), aos oito anos de idade das árvores, Pezzopane et al. (2021) quantificaram que as árvores aportaram aos solos taxas anuais de 18,58  $\text{Mg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em um sistema de ILPF e 17,63  $\text{Mg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em um sistema de IPF (Silvipastoril).

O sucesso dos sistemas ILPF em acumular MOS é atribuído ao C incorporado pelas raízes das gramíneas forrageiras utilizadas como cobertura e/ou pastagem (Salton et al., 2011; Loss et al., 2012b; Baptistella et al., 2020). Nesse contexto, foi realizado estudo na área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos (SP), onde se avaliou a dinâmica de raízes finas durante um período de dois anos (Bieluczyk et al., 2021). Com esse propósito, foi utilizada a técnica do *minirhizotron* (Johnson et al., 2001) em ambas as áreas de ILP e ILPF, sendo as avaliações realizadas em duas épocas: (i) lavoura, com avaliações quinzenais, entre novembro de 2014 e março de 2015; e (ii) pastagem, com avaliações mensais, entre abril de 2015 e agosto de 2016. Os principais destaques nos resultados dessas avaliações foram as diferenças no padrão da densidade acumulada de comprimento radicular entre os ciclos de lavoura e de pastagem (Figura 2AB).



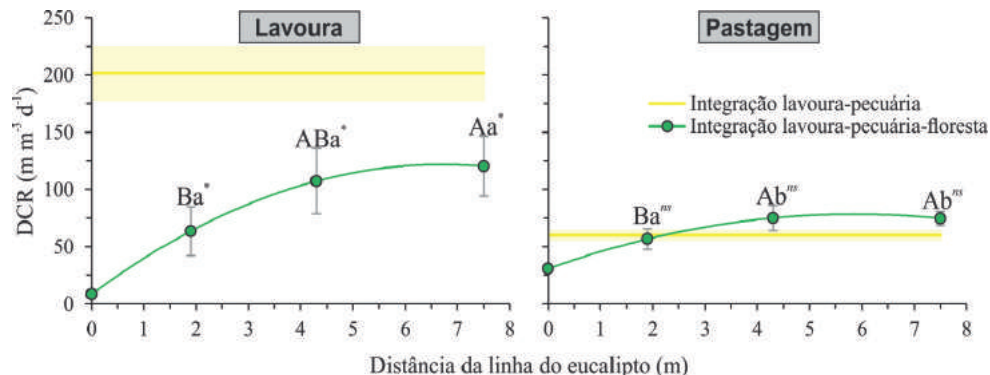
**Figura 2.** Densidade de comprimento radicular ao longo do perfil do solo (0 - 70 cm) nos espaçamentos de 1,9, 4,3 e 7,5 m na entrelinha do eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e na área de referência de integração lavoura-pecuária (ILP) em períodos de lavoura (A) e pastagem (B). Letras maiúsculas comparam posições na ILPF pelo teste t de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). \*, ns significativo e não significativo pelo teste de Dunnet ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Adaptado de Bieluczyk et al. (2021).

Nesse estudo foi observado que as árvores de eucalipto com mais de 20 metros de altura impactaram na produtividade do sistema radicular no período da lavoura, tanto mais intensamente quanto mais próximo das árvores, principalmente nas posições de 1,9 e 4,3 metros (Figura 2A). A distância de 1,9 m foi a mais limitada, provavelmente pelo sombreamento entre 40% e 60% da lavoura durante esse período (Bosi et al., 2020), que também reduziu

a produção de milho e braquiária (Pezzopane et al., 2019). Em razão desses resultados, Bieluczyk et al. (2021) desenvolveram uma discussão destacando que: (i) diversos estudos da literatura demonstraram que o milho detém alta eficiência fotossintética, mas é suscetível à restrição de luz aos níveis que foi imposta pelo arranjo das árvores de eucalipto, conseqüentemente reduzindo a sua produção de biomassa aérea e radicular; (ii) a competição interespecífica por luz, água e nutrientes se intensificou na ILPF, principalmente entre os estágios de sete folhas formadas e do pendoamento do milho, impactando o desenvolvimento da braquiária, que estava posicionada abaixo de ambos os dosséis de milho e eucalipto; e (iii) a lavoura de milho consorciada com braquiária não deveria ser introduzida em manejos futuros do sistema ILPF, ao menos que parte das árvores fosse colhida para reduzir a competição por luz. Além disso, houve um perfeito alinhamento com o estudo sobre a MOS desenvolvido no mesmo experimento e período de avaliação (Bieluczyk et al., 2020). Considerando que as frações lábeis da MOS se associam positivamente ao aporte de biomassa radicular em sistemas integrados de produção (Loss et al., 2012a), as reduções na densidade de comprimento radicular certamente contribuíram para diminuir os teores de C matéria orgânica particulada no período de lavoura.

Se no período da lavoura o consórcio de espécies apresentou restrições na ILPF, no período de pastagem o cenário mudou significativamente (Figura 2B). A produção radicular na distância de 1,9 m foi bastante similar à da ILP ao longo do perfil do solo, enquanto as posições de 4,3 e 7,5 m da ILPF apresentaram densidades de comprimento radicular maiores se comparadas ao sistema ILP nas camadas de 42-56 e 56-70 cm. Portanto, o período de lavoura foi o que mais aumentou o comprimento de raiz (Figura 3), durante a fase da pastagem, no entanto, a média de produção diária foi maior nas posições intermediárias da entrelinha da ILPF quando contrastadas à ILP. Diante desses resultados pode-se concluir que: (i) o período de lavoura deteve maior produção radicular nos sistemas integrados, portanto, é ferramenta estratégica para potencializar o aporte de biomassa de raízes, fato que também foi evidenciado pelos maiores teores de C particulado (Bieluczyk et al., 2020); e (ii) durante a fase pastagem a braquiária solteira mostrou sinergia com os eucaliptos em posições intermediárias da entrelinha dos renques, aumentando a produção radicular, principalmente em camadas mais profundas do solo (Figura 2B).



**Figura 3.** Média diária da densidade de comprimento radicular (DCR) em períodos de lavoura e pastagem em diferentes distâncias das árvores em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e integração lavoura-pecuária (ILP). Letras maiúsculas comparam distâncias na ILPF e letras minúsculas comparam períodos de avaliação pelo teste t de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). \*, <sup>ns</sup> significativo e não significativo pelo teste de Dunnet ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Adaptado de Bieluczky et al. (2021).

### ***Estoque carbono em solos sob sistemas ILPF***

Os sistemas integrados, devido ao alto potencial atribuído a esses sistemas de produção no que se refere ao sequestro de C, se destacam entre as tecnologias de baixa emissão de carbono e carbono neutro na política pública do Brasil no setor agropecuário (Carvalho et al., 2014; Conceição et al., 2017; Sá et al., 2017; Vigan et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Bieluczki et al., 2020; Damian et al., 2021; Tadini et al., 2021a; Oliveira et al., 2022). Estima-se que 60% a 70% das pastagens brasileiras apresentam sinais de degradação (Soares et al., 2020; LAPIG, 2021). E os sistemas integrados são fundamentais na recuperação dessas áreas, uma vez que frequentemente estão sendo implementados como alternativa economicamente viável para recuperar pastagens degradadas (Cortner et al., 2019; Reis et al., 2019).

Nair et al. (2010) relataram estimativas de estoques de C do solo variando entre 30 e 300 Mg C ha<sup>-1</sup> na profundidade de solo de 0 a 1 m, e as variações foram devido às diferenças entre sistemas, regiões ecológicas e tipos de solo. Porém, também relataram uma tendência geral de aumento do carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais em comparação com outras práticas de uso da terra em uma classificação considerando o conteúdo de carbono orgânico do solo, na seguinte ordem crescente: florestas > agroflorestas > plantações de árvores > culturas anuais. Batjes (2005) avaliou os estoques de C em diferentes classes de solos do Brasil e encontrou variações de 42 Mg C ha<sup>-1</sup> em Neossolos

Quartzarênicos a  $137 \text{ Mg C ha}^{-1}$  em Gleissolos; e nas classes de solos de maior representatividade do país, os Latossolos e os Argissolos, os estoques foram, respectivamente, de  $96$  e  $79 \text{ Mg C ha}^{-1}$  até a profundidade de  $1 \text{ m}$ .

Em ILP, taxas de acumulação de C positivas são frequentemente observadas. Implementadas em áreas de monocultivo de culturas anuais onde não houve uso de práticas de conservação do solo ou em áreas de pastagens degradadas, o aumento nos estoques de C pode ser atribuído à adoção de boas práticas de manejo e à fase de pastagem adequadamente manejada. O manejo conservacionista do solo geralmente favorece o acúmulo de C a longo prazo nos ecossistemas do Cerrado e da Amazônia (Carvalho et al., 2010). Um acréscimo no acúmulo de C entre  $1,61$  e  $1,48 \text{ Mg ha}^{-1}$  foi observado no sistema plantio direto no Cerrado, em um período de 8 anos, em comparação ao C armazenado em solo de lavoura convencional (Corbeels et al., 2016). Pastagens também têm grande potencial para aumentar o acúmulo de C no solo. O pastejo contínuo influencia a proporção entre folhas e raízes das gramíneas (Bayer et al., 2011) e induz mudanças na alocação de C em profundidades maiores que  $30 \text{ cm}$ , exercendo, portanto, efeitos positivos para sua acumulação no solo (Mcsherry; Ritchie, 2013). Além disso, gramíneas tropicais podem produzir cerca de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomassa seca de raízes, contribuindo, significativamente, para aumentar o carbono orgânico do solo (Pezzopane et al., 2020a). As raízes têm maior coeficiente de humificação do que os restos culturais da parte aérea. De acordo com Bayer et al. (2011), cerca de  $21\%$  e  $12\%$  do C da biomassa das raízes e de folhas, respectivamente, são convertidos em C na forma de húmus no solo.

Na região do Cerrado e da Amazônia, após a conversão do uso do solo de sistemas de cultivos anuais em ILP, as taxas de acúmulo de C, em três fazendas diferentes, variaram entre  $0,82$  e  $2,58 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na camada superficial de  $30 \text{ cm}$  do solo, no intervalo de 1 a 8 anos de cultivo (Carvalho et al., 2010). Em um Latossolo Vermelho argiloso, no Cerrado goiano, Oliveira et al. (2022) estimaram o potencial de acúmulo de C em ILP, usando o modelo CQESTR, num estudo no qual foi implantado, há 20 anos, o sistema ILP numa área cultivada por 30 anos de agricultura convencional. Nas avaliações realizadas para um período adicional de 20 anos, os autores observaram que o aumento estimado em C, na camada de  $0$  a  $30 \text{ cm}$  do solo, foi de  $18$  e  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  na taxa de  $0,90$  e  $0,60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  sob ILP. Além disso, ficou demonstrado que o sistema ILP propiciou maior acúmulo de C do que sistemas de produção de grãos em SPD, no mesmo intervalo de condução do experimento.

A capacidade de acúmulo de C está associada ao ILPF (Nair et al., 2010; Sarto et al., 2020) devido à assimilação de C atmosférico adicional na biomassa (Müller et al., 2009) em comparação à agricultura convencional,

a outros sistemas integrados sem árvores, ou até a alguns sistemas florestais (monoculturas) (Tsukamoto Filho et al., 2004). A dinâmica de C sob ILPF pode ser muito diferente daquela observada em sistemas sem cultivo de árvores. O componente florestal pode influenciar diretamente o acúmulo de C no solo pelo arranjo, densidade e espécies de árvores cultivadas (Kunhamu et al., 2011). A estratificação horizontal da área, na qual as árvores são intercalares com pastagens ou lavouras nas entrelinhas, é um arranjo para facilitar o uso de máquinas. Efeitos indiretos da componente árvore podem se manifestar por meio de sua influência sobre as culturas anuais (Mendes et al., 2013; Franchini et al., 2014) ou sobre a pastagem (Paciullo et al., 2011) disposta nas entrelinhas das árvores. O efeito do arranjo e de cultivo simultâneo de plantas nos sistemas de integração afetam a distribuição espacial do C orgânico do solo (Oliveira et al., 2018). Além disso, as árvores afetam a distribuição vertical das frações da MOS (Heile et al., 2010). Por isso, é importante que um plano de amostragem adequado seja utilizado no sentido de se avaliar corretamente a variabilidade horizontal e vertical do COS.

As taxas de acúmulo de carbono orgânico do solo em sistemas integrados implantados nos biomas do Cerrado e Amazônico são apresentadas na Tabela 1. Conceição et al. (2017) observaram uma taxa de  $1,83 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , na camada de 0 a 30 cm do solo, em ILPF, após três anos de implementação em área anteriormente sob agricultura convencional, em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, na zona de transição Cerrado - Amazônia, no estado de Mato Grosso. No sul da Amazônia, em um sistema ILPF implantado em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, dentro de um período de 12 anos, a acumulação de C foi de  $1,47 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na camada de 0 a 100 cm do solo, em comparação com o balanço de C em uma pastagem degradada adjacente (Oliveira et al., 2018). Nesse estudo, a maior parte do C armazenado foi encontrada sob as linhas de árvores nas camadas de solo abaixo de 30 cm. Os mesmos autores encontraram também um gradiente de C entre o ponto meio da pastagem na entrelinha das árvores até a linha das árvores, na camada de 30 a 100 cm do solo, sendo que o estoque de C aumentou gradualmente na direção das linhas de árvores. A acumulação de C foi observada em solo nutricionalmente equilibrado. No mesmo ambiente, entretanto, não foi observado acúmulo de C em área onde o solo foi deficiente em N. No sudeste do Brasil, Bieluczyk et al. (2020) observaram um ganho de  $1,96$  e  $1,74 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em ILP e ILPF, respectivamente, na camada até 40 cm de profundidade do solo, em comparação ao pastejo extensivo. A inclusão de árvores no ILP, entretanto, não resultou em aumento de estoques de C, ao contrário, causou redução da taxa de acúmulo de C em  $0,22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . A redução nos estoques de C foi

explicada pela redução nas entradas de N no solo causadas pelo crescimento limitado de espécies de culturas anuais e gramíneas sob o sombreamento de árvores. O manejo adequado de ILPF, por exemplo, distância entre renques de árvores, equilíbrio no suprimento de nutrientes, especialmente N, o manejo da fertilidade, a escolha certa da espécie de pasto, uso correto de capacidade de suporte e a adubação do sistema integrado de produção, entre outras, é fundamental para alcançar acúmulo de C no solo.

**Tabela 1.** Taxas de acúmulo de carbono orgânico do solo (COS) em sistemas integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nos biomas Cerrado e Amazônia.

Região	Solo	Linha de base do estoque de COS (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Potencial de acúmulo de COS (Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Tempo de acúmulo (ano)	Profundidade do solo (m)	Informação adicional	Referência
Transição Cerrado - Amazônia	Latossolo Vermelho-Amarelo	64,50	1,83	3	0,3	ILPF, PMA 2550 mm, TMA 25 C, Argila% = 56	Conceição et al. (2017)
Cerrado	Latossolo Vermelho-Amarelo	-	1,96	6	0-0,4	ILP, PMA 1545 mm, TMA 20,6 C, 40 > Argila% > 30	Bieluczyk et al. (2020)
		-	1,74			ILPF, PMA 1545 mm, TMA 20,6 C, 40 > Argila% > 30	
Sul da Amazônia	Nitossolo Vermelho	50,10	2,85	4	0-0,3	ILP, PMA 2200 mm, TMA 26 C, 70 > Argila% > 60, solo de alta fertilidade	Carvalho et al. (2010; 2014)
	Latossolo Amarelo	57,40	1,35	4	0-0,3	ILP, PMA 2000 mm, TMA 28 C, 60 > Argila% > 50	
Cerrado	Latossolo Vermelho	66,44	0,82	8	0-0,3	ILP, PMA 1500-1800 mm, TMA 23 C, 70 > Argila% > 60	
Cerrado	Latossolo Vermelho Acriférrico	64,73-63,74	0,60-0,90	10	0-0,3	ILP, PMA 1503 mm, TMA 23 C, Argila% = 53 (Tempo de acumulação de COS 10 anos após 19 anos sob ILP)	Oliveira et al. (2022)

*Continua*

Tabela 1. Continuação

Região	Solo	Linha de base do estoque de COS (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Potencial de acúmulo de COS (Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Tempo de acúmulo (ano)	Profundidade do solo (m)	Informação adicional	Referência	
Sul da Amazônia	Latossolo Vermelho-Amarelo	110,66	1,47	12	0-1,0	ILPF com 3 linhas de árvores por renque, solo balanceado em nutrientes, PMA 1954 mm, TMA 26 C, 0-30 cm 60 > Argila% > 50, 30-100 cm 70 > Argila% > 60	Oliveira et al. (2018)	
		55,05	0,58	12	0-0,3			
		55,61	0,89	12	0,3-1,0			
		110,66	-0,04	12	0-1,0			
		55,05	0,01	12	0-0,3			
		55,61	-0,05	12	0,3-1,0			

PMA: precipitação média anual; TMA: temperatura média anual. Adaptado de Khalil et al. (2021).

### ***Fracionamento da MOS em solos de sistemas integrados de produção***

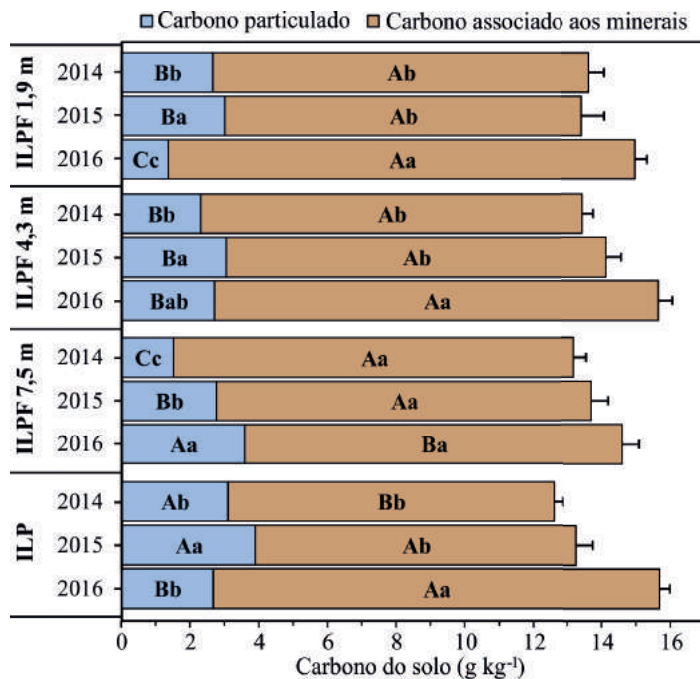
Os estoques de C e N do solo têm sido utilizados para quantificar os efeitos de sistemas agrícolas na qualidade do solo e, em abordagens recentes, incluídos em avaliações da sustentabilidade (Sá et al., 2017). Entretanto, para além da quantidade de C e N do solo, os efeitos de sistemas de manejo são mais acuradamente e rapidamente compreendidos quando avaliados aspectos sobre a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS). Fracionar a MOS de forma granulométrica, densimétrica, química, isotópica, dentre outras, permite inferir sobre os efeitos do manejo recente e o grau de transformação, a ciclagem e a labilidade do material orgânico no solo. Um estudo de frações da MOS define, ou até prevê, a função do solo no armazenamento ou perda de carbono, pois as frações possuem tempo de ciclagem e funções bioquímicas e biológicas distintas (Cerli et al., 2012).

Alguns estudos recentes, conduzidos sob sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta, têm se utilizado de métodos de fracionamento da MOS para investigar a sua quantidade, a qualidade e, eventualmente, a origem do C remanescente no solo. Dentre eles, destaca-se o trabalho de Bieluczyk et al. (2020), em que os autores avaliaram a influência do sistema ILPF, em série temporal, sobre os *pools* de C em solos após ciclos sucessivos de lavoura e de pastagem. Para estudar parâmetros qualitativos da MOS, os autores realizaram



o fracionamento granulométrico e quantificaram a MOS leve, com flotação em água dos resíduos orgânicos mais lábeis do solo (Anderson; Ingram, 1993); para avaliar a origem do C e do N no solo, bem como identificar mudanças nas suas propriedades ao longo do tempo, foi analisada as razões isotópicas do C e do N associados à MOS (i.e.,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ).

Utilizando a fração do C particulado, e a MOS leve em água, Bieluczyk et al. (2020) mostraram que o consórcio do milho com a *Urochloa brizantha* cv. Marandú, no ciclo da lavoura, foi o que causou maior aporte de MOS nos sistemas integrados, tanto na ILP quanto na ILPF. O C particulado e a MOS leve refletem o aporte recente de MOS (Loss et al., 2012b), e o maior acúmulo nessas frações ocorre em função da adição contínua de resíduos orgânicos e palhas e material orgânico que excedem a capacidade de decomposição da biomassa microbiana do solo (Bordonal et al., 2017). Nesse sentido, Bieluczyk et al. (2020) também destacaram que uma grande quantidade de resíduos de palha e raízes foi disponibilizada para o processo de decomposição ao dessecar a prévia pastagem para a semeadura do milho consorciado com a braquiária. Por outro lado, após o ciclo de lavoura, o C particulado da ILPF foi menor que o da ILP em algumas camadas do solo. Na Figura 4 são apresentados esses resultados distribuídos espacialmente para três distâncias ( $n = 6$ ) dos renques de eucalipto, avaliadas de acordo com o espaço na entrelinha de árvores no sistema ILPF. Após a safra de milho, as três posições na entrelinha da ILPF apresentaram menores teores de C particulado, se comparadas à ILP. Após um ano sucessivo de pastejo, a posição mais próxima aos renques (1,9 m) reduziu ainda mais os teores de C particulado. Porém, ao analisar conjuntamente ambos os compartimentos do C (particulado e associado aos minerais), percebe-se que o valor de sua soma (C total) não difere entre as áreas, sendo o balanço das frações a principal mudança entre as posições e arranjos de plantas nos sistemas ILPF e no ILP.



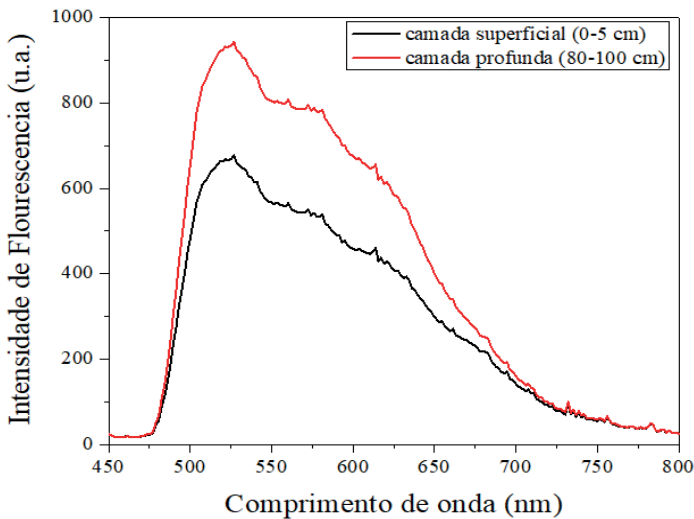
**Figura 4.** Teores de carbono particulado e associado aos minerais de solo em sistema integração-lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) com plantas e forragens dispostas a 1,9, 4,3 e 7,5 metros dos renques de eucalipto. Letras maiúsculas comparam as médias de tratamentos e as minúsculas o ano de coleta do solo, para avaliação temporal dos pools de C no tempo (Tukey  $p \leq 0,05$ ). Avaliações sucessivas após 2 anos de pastejo e uma safra de milho.

Fonte: Adaptado de Bieluczyk et al. (2020).

### *Qualidade da MOS sob sistemas integrados de produção*

Considerando a relevância da MOS, pesquisas são realizadas em todo o mundo para avançar no conhecimento da composição química e molecular, bem como do C em sua estrutura, nos variados solos e sistemas de produção, utilizando diferentes técnicas, desde as mais simples até as mais avançadas. Com essa perspectiva, há destaque para o emprego da Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser (LIFS) como uma excelente ferramenta para avaliar a transformação da MO em solos agrícolas (Milori et al., 2006; Senesi et al., 2016; Tadini et al., 2018; Segnini et al., 2019; Tadini et al., 2021a). Além de ser uma técnica ambientalmente sustentável, permite avaliar a qualidade e a estabilidade da MO por meio da determinação do índice de humificação ( $H_{LIFS}$ ) (Milori et al., 2006).

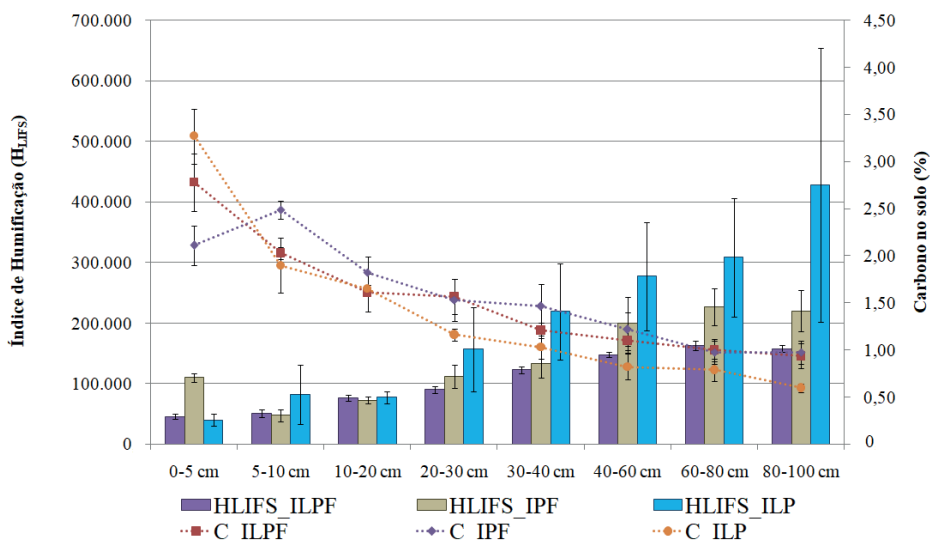
Tadini et al. (2021a) avaliaram solos sob sistemas integrados (ILPF, IPF e ILP) em uma área de campo experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos (SP), após 5 anos de estabelecimento do sistema ILPF. A Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser foi empregada nesse estudo a fim de avaliar a qualidade e o grau de transformação da MOS (Milori et al., 2006), por meio da determinação do índice de humificação ( $H_{LIFS}$ ) nesses sistemas agrícolas. Um espectro típico de emissão com excitação em 405 nm, obtido pelo LIFS empregando amostras de solos do sistema ILPF (Tadini et al., 2021a), é apresentado na Figura 5. Os espectros de emissão das amostras dos solos indicaram uma banda de intensidade máxima em torno de 525 e 550 nm, com ombros em torno de 570 e 620 nm. Esses padrões sugerem a presença relevante de componentes moleculares em estruturas aromáticas da MO, que englobam radicais dos grupos orgânicos funcionais do tipo carbonila e carboxílico, sendo a maior intensidade de fluorescência verificada na camada mais profunda de solo (80 - 100 cm).



**Figura 5.** Espectros típicos de emissão da Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser (LIFS) obtidos com as pastilhas de solos de um sistema integrado de produção (ILPF) na camada superficial (0 - 5 cm) e mais profunda do solo (80 - 100 cm).

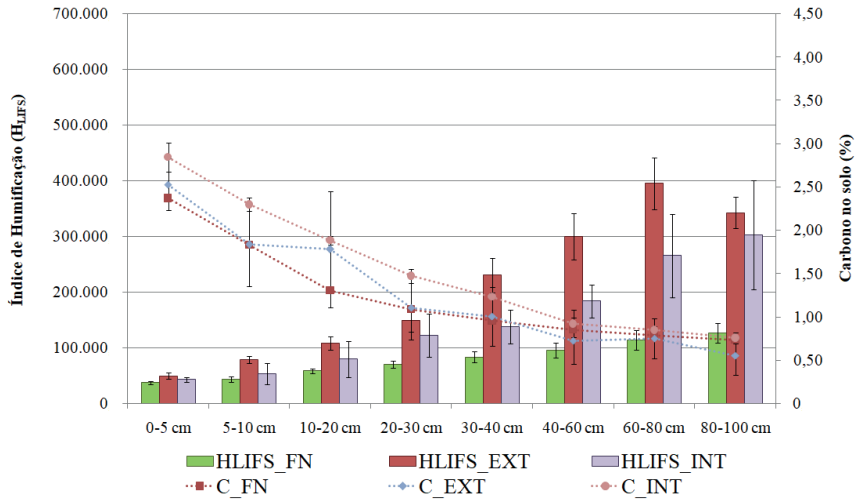
Os valores médios do carbono no solo (%) e os índices de humificação ( $H_{LIFS}$ ) em diferentes sistemas agrícolas, tais como pastejo intensivo (INT) e extensivo (EXT), ILPF, IPF, ILP e floresta natural (FN) são apresentados nas Figuras 6 e 7. Os teores de carbono diminuíram sistematicamente do horizonte

superficial até a profundidade de 100 cm, em todas as áreas (Figuras 6 e 7). No entanto, foi observado que em até 100 cm de profundidade, há uma quantidade maior de carbono no ILPF (Figura 6) do que na FN (Figura 7), demonstrando o potencial de sequestro de carbono nesses sistemas integrados conforme confirmados e descritos por Bernardi et al. (2020). Além disso, pode-se observar que em sistemas nos quais as gramíneas são inseridas, por exemplo, ILPF e IPF, as raízes podem estar contribuindo para a biomassa subterrânea e desempenhando um papel fundamental para o acúmulo de carbono nesses sistemas integrados.



**Figura 6.** Valores médios do Carbono no solo (%) e Índice de Humificação ( $H_{LIFS}$ ) dos sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pecuária-floresta (IPF) e lavoura-pecuária (ILP) em diferentes profundidades

Fonte: Adaptado de Bernardi et al. (2020) e Tadini et al. (2021a).



**Figura 7.** Valores médios do Carbono no solo (%) e Índice de Humificação ( $H_{LIFS}$ ) das áreas floresta natural (FN), pastejo intensivo (INT) e extensivo (EXT) em diferentes profundidades

Fonte: Adaptado de Bernardi et al. (2020) e Tadini et al. (2021a).

Bieluczyk et al. (2020), avaliando as mesmas áreas de estudo dos sistemas ILPF e ILP (Figura 6), observaram um acúmulo de carbono orgânico de  $0,28 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de C no solo na profundidade de 0 a 40 cm para o sistema ILP, que sucedeu o pasto em uso exclusivo da terra. Em contraste, no sistema ILPF não foi observado esse aumento no conteúdo MOS. No entanto, os resultados de Bernardi et al. (2020), utilizando as mesmas áreas e amostras apresentadas nas Figuras 6 e 7, mostraram que os estoques de carbono foram de 179,9; 160,2; 136,4 e 129,7  $\text{Mg ha}^{-1}$  para o ILP, ILPF, IPF e FN, respectivamente, após cinco anos de implementação dos sistemas integrados agrícolas. Os autores concluíram que os sistemas integrados (ILPF, IPF e ILP) levaram a um aumento no acúmulo de carbono nesses solos em apenas cinco anos de implantação. Avaliando a qualidade química do carbono em solo sob sistemas de plantio direto e de sucessão soja/milho em sistemas integrados ILP, no município de Querência, Mato Grosso, Brasil, Soares et al. (2020) observaram que os maiores estoques de carbono foram observados nos sistemas ILP devido ao maior aporte de resíduo orgânico nesses solos, que promoveu aumento nos estoques de carbono nesses sistemas, resultados que estão de acordo aos reportados por Almeida et al. (2021).

Os valores dos índices de humificação ( $H_{LIFS}$ ) (Figuras 6 e 7) aumentaram com a profundidade em todos os sistemas agrícolas. Os sistemas integrados

(ILPF, IPF e ILP) e a pastagem extensiva (EXT) apresentaram maiores valores médios do  $H_{LIFS}$  da MOS comparado às áreas de floresta nativa e pastagem intensiva. A presença de animais também merece destaque como nos sistemas integrados (ILPF, IPF e ILP) e na área de pastagem contínua (EXT), uma vez que os dejetos *in natura* de bovinos podem ativar a biota do solo e propiciar melhor ambiente para o crescimento e atividade da biomassa microbiana do solo, por conseguinte, resultar em maior taxa de decomposição do material orgânico presente nesse solo.

O processo de humificação ou a transformação da MOS ocorre com a estabilização do C, em que pode haver a inserção de compostos mais estáveis com alta intensidade de fluorescência (por exemplo, compostos fenólicos e aromáticos) e/ou preservação de compostos mais resistentes à degradação química, como a lignina, o que implica na presença no solo de compostos orgânicos quimicamente mais estáveis à decomposição (Senesi et al., 2016).

Desse modo, vêm sendo observado nos sistemas ILPF aumento do conteúdo de C do solo, do índice de humificação e de grupos aromáticos com o aumento da profundidade, comparativamente com áreas de referência, como a floresta nativa (Tadini et al., 2021a). Além disso, a fração mais recalcitrante da MOS, os ácidos húmicos (AH), extraídos desses solos, mostraram que o sistema ILPF exibiu assinaturas  $^{13}C$  correspondentes às plantas do tipo C4 (pastagem e milho), de modo que, até o momento (5 anos de início do plantio de eucalipto), não houve contribuição relevante de resíduos orgânicos das árvores (metabolismo do tipo C3) sobre o C armazenado no solo. Por sua vez, as amostras de ácidos húmicos de solos da floresta nativa (FN) exibiram uma característica uniforme de assinatura  $^{13}C$  de plantas C3 (árvores nativas, leguminosas) (Tadini et al., 2021b). Esses resultados são consistentes com os reportados em outro estudo realizado por Bieluczyk et al. (2020), com amostras de solo para a mesma área experimental com ILPF e FN, monitorados até 40 cm no perfil de solo.

Outro resultado interessante, observado por Tadini et al. (2021b), foi a presença de ácidos benzenopolicarboxílicos (BPCA) determinados por análise cromatográfica líquida de alta resolução (HPLC), a qual revelou estruturas aromáticas condensadas presentes nas amostras de ácidos húmicos dos sistemas ILPF e floresta nativa. Ressalta-se que os compostos aromáticos condensados são geralmente considerados de origem termogênica (incêndios florestais) e, devido à ausência de eventos de queima nessa área sugere-se que possa estar sendo oriundo da lignina, visto que estudos recentes sugeriram que o C condensado (também conhecido como “Carbono Negro” ou “*Black Carbon*”) pode ser produzido durante a transformação (humificação) da lignina conduzida por

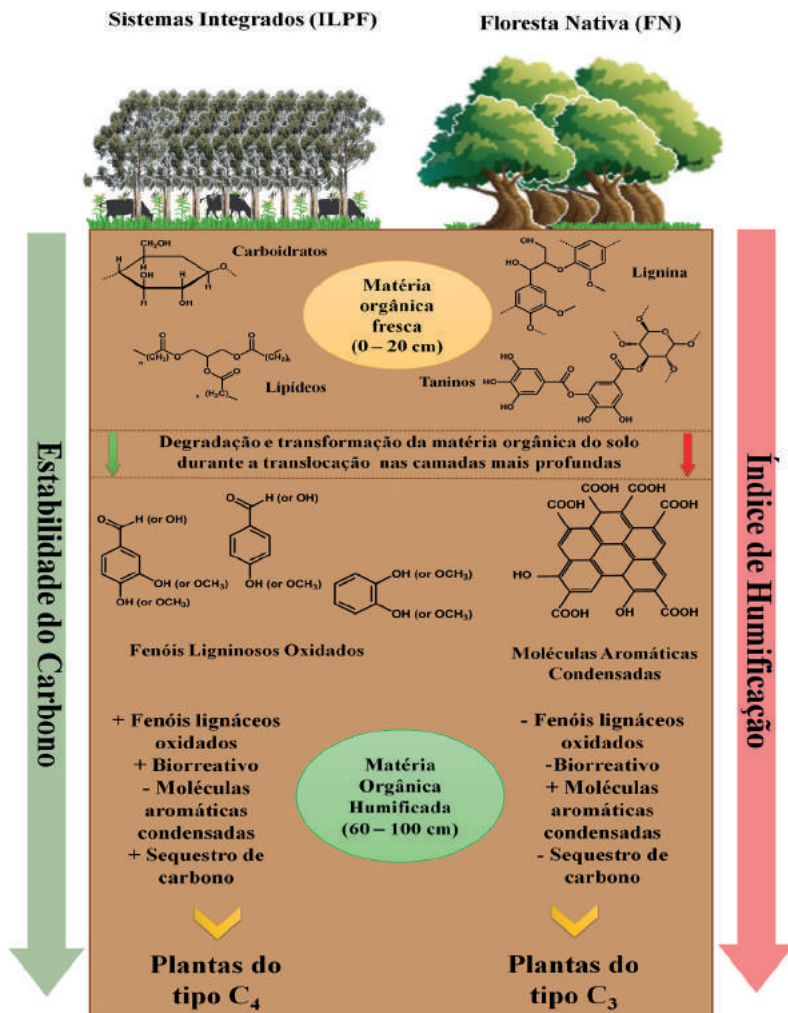
radicais livres, por exemplo, “reações de Fenton”, com ativa participação de íons de ferro (Chen et al., 2014; DiDonato et al., 2016).

Tadini et al. (2021ab) também revelaram que a floresta nativa e os sistemas ILPF apresentam compostos aromáticos condensados, que são mais humificados, com o aumento da profundidade do solo. Além disso, as caracterizações das amostras de ácidos húmicos por ressonância paramagnética eletrônica (EPR), com detecção de radicais livres do tipo semiquinona, mostraram associação ao índice de humificação das amostras em que os ácidos húmicos de sistemas ILPF têm um nível absoluto mais elevado de radicais livres do tipo semiquinona que os ácidos húmicos de solos de floresta nativa e pastagens (Tadini et al., 2022a).

A espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear 1D e 2D combinada com o processo de termoquinólise de hidróxido de tetrametilamonio (TMAH) e seguida por cromatografia gasosa bidimensional - espectrometria de massa (TMAH-GCxGC-MS) foram empregadas nesses sistemas integrados e mostraram que a aromaticidade observada no aumento do índice de humificação deve-se à presença de fenóis lignináceos oxidados - resíduos de guaiacil, siringil e p-hidroxifenil -, as quais demonstraram ser produtos resultantes do processo de humificação da MOS e estão sendo acumuladas nas camadas mais profundas do solo nos sistemas ILPF do que na FN, que é dominado por compostos aromáticos condensados. Essas análises revelaram também que o solo do sistema ILPF é bioquimicamente mais ativo, provavelmente devido à maior abundância de fenóis lignificados, com caráter monofenólico e alta oxigenação, quando comparados aos compostos aromáticos condensados encontrados nos solos da FN. A hipótese para explicar essa alta reatividade bioquímica observada nos ácidos húmicos dos sistemas ILPF seria justificada pela elevada quantidade e alta diversidade de resíduos de biomassa provindas do capim Piatã, do milho, de folhas e de exsudatos das raízes do eucalipto e de dejetos do gado (especialmente esterco bovino) depositados na camada superficial desses solos. Assim, devido à diversidade de entradas de biomassa, o aumento no sequestro de C e bioatividade da MO humificada são mais prevalentes nos solos sob ILPF, pois diferentes espécies microbianas funcionam ativamente (Lange et al., 2015).

Portanto, esses estudos demonstraram que, apesar dos solos de sistema ILPF apresentarem maior quantidade de estruturas aromáticas fluorescentes (maior índice de humificação detectado por LIFS, em amostras de solos intactos), esses solos são quimicamente menos estáveis, contudo, bioquimicamente mais ativo, permitindo que seu conteúdo de MOS seja mais facilmente alterado e diversificado por microrganismos, do que nos solos das áreas de FN. Desse modo, os resultados relatados acima permitiram obter informações críticas

sobre os constituintes estruturais da MOS e propor um diagrama conceptual do processo de humificação e estabilização do carbono nesses sistemas integrados, conforme apresentado na Figura 8.



**Figura 8.** Diagrama do processo de humificação e estabilização da matéria orgânica do solo com a profundidade nos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e em floresta natural em área tropical.

Fonte: Adaptado de Tadini et al. (2022b).

Na Figura 8, observa-se que a matéria orgânica fresca no ILPF é extremamente diversificada contendo vários resíduos de remanescentes de capim-piatã, milho, folhas e exsudatos de raízes de eucalipto e esterco bovino. Alguns desses resquícios



também estão presentes na camada de matéria orgânica humificada, porém, por simplicidade, são mostrados apenas fenóis ligninosos oxidados e moléculas aromáticas condensadas. Os fenóis ligninosos, com caráter monofenólico e alta oxigenação, devem ser produto de processos de humificação durante a translocação da MOS em horizontes mais profundos do solo nos sistemas ILPF enquanto na FN é dominado por aromáticos condensados. Além disso, os fenóis ligninosos são responsáveis pela estabilização da MOS nesse tipo de manejo agrícola, e foi observado também a presença de substâncias lipídicas que provavelmente se originaram da hidrólise de cadeias de lignina durante sua decomposição microbiana, ou são exsudatos de micróbios, pois o metabolismo microbiano é uma das possíveis vias de formação dessa matéria orgânica (Guo et al., 2019; Dou et al., 2020).

Os sistemas integrados são estratégias de gerenciamento muito positivas na estabilização do C no solo e destacam-se como práticas agrícolas inovadoras e sustentáveis. Estudos descritos na literatura (Bernardi et al., 2020; Bieluczyk et al., 2020; Soares et al., 2020; Almeida et al., 2021; Tadini et al., 2021ab; 2022ab) vêm demonstrando que o emprego desses sistemas integrados, com apenas 3 - 5 anos de estabelecimento, estão acumulando uma MO mais estável e tornando uma alternativa eficiente na redução de CO<sub>2</sub> no Brasil e no mundo.

### **Considerações finais**

Os sistemas integrados de produção são estratégias de uso sustentável da terra, que podem apoiar o aumento da produção agrícola e, ao mesmo tempo, recuperar e preservar o meio ambiente. A adoção dos sistemas integrados representa um avanço significativo na busca da sustentabilidade da agricultura brasileira.

As alterações promovidas pelos sistemas integrados nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo refletem na quantidade e qualidade do carbono orgânico. Nos resultados de estudos aqui apresentados, os autores avaliaram a dinâmica, aspectos estruturais e reatividade da matéria orgânica nesses sistemas integrados. Dessa forma foram discutidas como estas informações são fundamentais para compreender os processos que influenciam no acúmulo do C nos solos. Também foi comprovado que sistemas integrados promovem maior acúmulo de C no solo e aumento da estabilidade da matéria orgânica. Os estudos ainda confirmaram a importância desses sistemas para a agricultura sustentável, combate às mudanças climáticas e por ser uma das importantes estratégias do país para a descarbonização da agropecuária.

Por fim, sugere-se que estudos sobre a quantidade, qualidade e estrutura das frações da matéria orgânica nos solos, sob sistemas integrados, sejam conduzidos para as diferentes combinações de sistema integrados nos diferentes biomas.

## Agradecimentos

Os trabalhos que deram suporte a este capítulo foram desenvolvidos no âmbito do Projeto Rural Sustentável - Cerrado, resultado da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e a Embrapa.

## Referências

- ALMEIDA, L. L. S.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO, A. L. C.; LANA, A. M. Q.; SOUZA, I. A.; PEGORARO, R. F.; FERREIRA, E. A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, v. 205, e104785, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.
- ALVES, B. J. R.; MADARI, B. E.; BODDEY, R. M. Integrated Crop-Livestock-Forestry Systems: Prospects for a sustainable agricultural intensification. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 108, p. 1-4. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9851-0>.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. 2nd ed. Wallingford: CABI Pub., 1993. 240p.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Marco referencial: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p
- BALBINOT JR., A. A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural*, v. 39, p. 1925-1933, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000107>.
- BAPTISTELLA, J. L.; ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. *Urochloa* in tropical agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. v. 4, article 119, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.
- BATJES, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use and Management*, v. 21, p. 22-24, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2005.tb00102.x>.
- BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. P.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa. 2011. v. 7. p. 55-118.
- BERNARDI, A. C. C.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, J. R. M.; ALVES, T. C.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; RODRIGUES, P. H. M.; MARTIN NETO, L.; OLIVEIRA, P. P. A. Estoques de carbono no solo em sistemas integrados no bioma Mata Atlântica. In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; COSTA, M. S. N. (org.). **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da pecuária brasileira**. Brasília, DF: MAPA: SENAR, 2020. p. 104-105. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222802/1/EstoquesCarbonoSoloSistemas.pdf>.
- BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in Southeastern Brazil. *Geoderma*, v. 371, e114368, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>.
- BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; CHERUBIN, M. R. Eucalyptus tree influence on spatial and temporal dynamics of fine root growth in an integrated crop livestock forestry system in southeastern Brazil. *Rhizosphere*, v. 19, e100415, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisp.2021.100415>.
- BLUM, W. E. H.; SCHAD, P.; NORTCLIFFE, S. **Essentials of soil science: Soil formation, functions, use and classification** (World Reference Base, WRB). Stuttgart: Borntraeger Science Publishing, 2018. 171 p.
- BORDONAL, R. O.; LAL, R.; RONQUIM, C. C.; FIGUEIREDO, E. B.; CARVALHO, J. L. N. N.; MALDONADO JR., W.; MILORI, D. M. B. P.; SCALA JR., N. La. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 240, p. 54-65, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.016>.
- BORGES, W. L. B.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Impact of Crop-Livestock-Forest Integration on Soil Quality. *Agroforestry System*, v. 93, p. 2111-2119, 2019.
- BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Silvopastoral system with eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, e20180425, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425>.

BOUMA, J. Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 177, p. 111-120, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201300646>.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**: visão estratégica para um novo ciclo. Brasília, DF: Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, MAPA. 28 p. 2021.

BRASIL, Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura**. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p.

BUCKWELL, A.; UHRE, A. N.; WILLIAMS, A.; POLAKOVA, J.; BLUM, W. E.; SCHIEFER, J.; LAIR, G. J.; HEISSENHUBER, A.; SCHIESEL, P.; KRÄMER, C.; HABER, W. **The Sustainable Intensification of European agriculture: A review sponsored by the RISE Foundation**. 2014. Disponível em: [http://www.risefoundation.eu/images/files/2014/2014\\_%20SI\\_RISE\\_FULL\\_EN.pdf](http://www.risefoundation.eu/images/files/2014/2014_%20SI_RISE_FULL_EN.pdf). Acessado fev 2022.

CARAUTA, M.; LATYNSKIY, E.; MOSSINGER, J.; GIL, J. D. B.; LIBERA, A. A. D.; HAMPF, A.; MONTEIRO, L.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Can preferential credit programs speed up the adoption of low-carbon agricultural systems in Mato Grosso, Brazil? Results from bioeconomic microsimulation. *Regional Environmental Change*, v. 18, p. 117-128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1104-x>.

CARAUTA, M.; TROOST, C.; GUZMAN-BUSTAMANTE, I.; HAMPF, A.; LIBERA, A.; MEURER, K.; BÖNECKE, E.; FRANKO, U.; RODRIGUES, R. A. R.; BERGER, T. Climate-related land use policies in Brazil: How much has been achieved with economic incentives in agriculture? *Land Use Policy*, v. 109, 105618, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105618>.

CARDINAEL, R.; CHEVALLIER, T.; CAMBOU, A.; BÉRAL, C.; BARTHÈS, B. G.; DUPRAZ, C.; DURAND, C.; KOUAKOUA, E.; CHENU, C. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: a survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 236, p. 243-255, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 110, p. 175-186, 2010. DOI: [10.1016/j.still.2010.07.011](https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.011)

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 183, p. 167-175, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.014>.

CERLI, C.; CELI, L.; KALBITZ, K.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K. Separation of light and heavy organic matter fractions in soil - Testing for proper density cut-off and dispersion level. *Geoderma*, v. 170, p. 403-416, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.009>.

CHEN, H.; ABDULLA, H. A.; SANDERS, R. L.; MYNENI, S. C.; MOPPER, K.; HATCHER, P. G. Production of black carbon-like and aliphatic molecules from terrestrial dissolved organic matter in the presence of sunlight and iron. *Environment Science and Technology*, v. 1, p. 399-404, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/ez5002598>.

COHN, A. S.; MOSNIER, A.; HAVLÍK, P.; VALIN, H.; HERRERO, M.; SCHMID, E.; O'HARE, M.; OBERSTEINER M. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, p. 7236-7241, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1307163111/-/DCSupplemental>.

CONCEIÇÃO, M. C. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. 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. DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2017.89066>.

COOPER, P. J. M.; CAPPIELLO, S.; VERMEULEN, S. J.; CAMPBELL, B. M.; ZOUGMORÉ, R.; KINYANGI, J. Largescale implementation of adaptation and mitigation actions in agriculture. CCAFS Working Paper no.50. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark. 2013. Disponível em: [www.ccafs.cgiar.org](http://www.ccafs.cgiar.org).

CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; SIQUEIRA NETO, M. FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.; SCOPEL, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. *Scientific Reports*, v. 6, p. 1-8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep21450>.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOWSKI, J.; MARTHA JUNIOR, G. B. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. *Cadernos de Ciências e Tecnologia*, v. 32, p. 15-43, 2015.

CORTNER, O.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; FERREIRA, J.; NILES, M. T.; REIS, J.; GIL, J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, v. 82, p. 841-853, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.006>.

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. S.; PEDREIRA, B. P. C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, A. J.; ANDREOTE, F. D.; PREMAZZI, L. M.; CERRI, C. E. P. Pasture land intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. *Applied Soil Ecology*, v. 160, e103858, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103858>.

- DIDONATO, N.; CHEN, H.; WAGGONER, D.; HATCHER, P. G. Potential origin and formation for molecular components of humic acids in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 178, p. 210-222, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.01.013>.
- DOU, S.; SHAN, J.; SONG, X.; CAO, R.; WU, M.; LI, C.; GUAN, S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness. *Pedosphere*, v. 30, p. 159-167, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60001-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60001-7).
- FAO - Food and Agricultural Organization of the United Nations. **The future of food and agriculture**. Trends and Challenges 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>. Acesso em: 01 mar 22.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Conservation agriculture. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>. Acesso em: 14 mar 22
- FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JR., A. A.; SICHIERI, F. R.; DEBIASI, H. C. Yield of soybean, pasture and wood in integrated crop-livestock-forest system in Northwestern Paraná state, Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, p. 1006-1013, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500016>.
- GUO, X.; LIU, H.; WU, S. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of The Total Environment*, v. 662, p. 501-510, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.137>.
- HEILE, S. G.; NAIR, V. D.; RAMACHANDRAN NAIR, P. K. Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. *Global Change Biology*, v. 16, p. 427-438, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01981.x>.
- HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 114, p. 1-13, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>.
- JOHNSON, M. G.; TINGEY, D. T.; PHILLIPS, D. L.; STORM, M. J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, v. 45, p. 263-289, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(01\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(01)00077-6).
- KHALIL, M. I.; CORDOVIL, C. M. D. S.; FRANCAVIGLIA, R.; HENRY, B.; KLUMPP, K.; KONCZ, P.; LLORENTE, M.; MADARI, B. E.; MUÑOZ-ROJAS, M.; RAINER, N. Integrated farming in tropical agroecosystems of Brazil. In: FAO. **Recarbonizing global soils: a technical manual of recommended management practices**: cropland, grassland, integrated systems and farming approaches. Rome, 2021. v. 4, cap. 34, p. 373-383.
- KLUTHCOUSKI, J. C.; AIDAR, H. Implantação, condução e resultados obtidos com o Sistema Santa Fé. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.). **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 407-442.
- KLUTHCOUSKI, J. C.; PACHECO, A. R.; TEIXEIRA, S. M.; OLIVEIRA, E. T. **Renovação de pastagens de Cerrado com Arroz**: I. Sistema Barreirão. Goiânia: EMBRAPA CNPAF, 1991. 20 p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 33).
- KUNHAMU, T. K.; KUMAR, B. M.; SAMUEL, S. Does tree management affect biomass and soil carbon stocks of *Acacia mangium* Willd. stands in Kerala, India? In: KUMAR, M. B.; NAIR, R. P. K. (ed.) **Carbon sequestration potential of agroforestry systems**: opportunities and challenges. Springer: Netherlands, Dordrecht. 2011. p. 217-228.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v. 304, p. 1623-1627, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- LAL, R. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, v. 5, p. 212-222, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.
- LAL, R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Soil and Tillage Research*, v. 188, p. 35-40, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.001>.
- LANGE, M.; EISENHAEUER, N.; SIERRA, C.; BESSLER, H.; ENGELS, C.; GRIFFITHS, R. I.; MELLADO-VÁZQUEZ, P. G.; MALIK, A. A.; ROY, J.; SCHEU, S.; STEINBEISS, S.; THOMSON, B. C.; TRUMBORE, S. E.; GLEIXNER, G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, v. 6, e6707, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>.
- LAPIG - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. **Atlas digital das pastagens brasileiras**. 2021. Disponível em: <https://pastagem.org/atlas/map>. Acessado em: 11 Nov 2021.
- LAROCA, J.V.S.; SOUZA, J.M.A.; PIRES, G.C.; PIRES, G.J.C.; PACHECO, L.P.; SIVA, F.D.; WRUCK, F.J.; CARNEIRO, M.A.C.; SILVA, S.S.; SOUZA, E.D. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, p. 1248-1258, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X20180011000007>.
- LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; BEUTLER, S. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of <sup>13</sup>C e <sup>15</sup>N of light-fraction organic matter under no-tillage and crop-livestock integration systems. *Acta Scientiarum*, v. 34, p. 465- 472, 2012a. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v34i4.15061>.

- LOSS, A.; PEREIRA, M. G. P.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; ANJOS, L. H. C. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, v. 50, p. 685-693, 2012b. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR12196>.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, p. 133-146, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015>.
- MADARI, B. E.; CUADRA, S. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; HIGA, R. C. V.; RAMOS, N. P.; ANDRADE, C. A.; KEMENES, A.; GONDIM, R. S. The role of agriculture in mitigating greenhouse gas emissions. In: CUADRA, S. V.; HEINEMANN, A. B.; BARIONI, L. G.; MOZZER, G. B.; BERGIER, I. (ed.). **Climate action: contributions of Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 57-65. (Sustainable development goals, 13).
- MAGALHÃES, C. A. S.; PEDREIRA, B. C.; TONINI, H.; FARIAS NETO, A. L. Crop, livestock and forestry performance assessment under different production systems in the North of Mato Grosso, Brazil. *Agroforestry Systems*, v. 93, p. 2085-2096, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0311-x>.
- MANZATTO, C. V.; ARAUJO, L. S.; ASSAD, E. D.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D.; VICENTE, L. E.; PEREIRA, S. E. M.; LOEBMANN, D. G. S. W.; VICENTE, A. K. **Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. 35 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 122).
- MARTHA JR, G. B.; ALVES, E. R. A.; CONTINI, E. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 1117-1126, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-2042011001000002>.
- MARTHA JR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, v. 110, p. 173-177, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001>.
- MCSHERRY, M. E.; RITCHIE, M. E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, v. 19, p. 1347-1357, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12144>.
- MENDES, M. M. S.; LACERDA, C. F.; CAVALCANTE, A. C. R.; FERNANDES, F. E. P.; OLIVEIRA, T. S. Desenvolvimento do milho sob influência de árvores de pau-branco em sistema agrossilvipastoril. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, p. 1342-1350, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000005>.
- MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. C. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, p. 57-63, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0270>.
- MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A.; ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; CHAPLOT, V.; CHEN, Z. S.; CHENG, K.; DAS, B. S.; FIELD, D. J.; GIMONA, A.; HEDLEY, C. B.; HONG, S. Y.; MANDAL, B.; MARCHANT, B. P.; MARTIN, M.; MCCONKEY, B. G.; MULDER, V. L.; O'ROURKE, S.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; ODEH, I.; PADARIAN, J.; PAUSTIAN, K.; PAN, G. X.; POGGIO, L.; SAVIN, I.; STOLBOVOY, V.; STOCKMANN, U.; SULAEMAN, Y.; TSUI, C. C.; VAGEN, T. G.; VAN WESEMAEL, B.; WINOWIECKI, L. Soil carbon 14 per mille. *Geoderma*, v. 292, p. 59-86, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- MONTANARELLA, L. Agricultural policy: govern our soils. *Nature*, v. 528, p. 32-33, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/528032a>.
- MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; ANGUINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. A.; KUNRATH, T. R. Integrated croplivestock systems in the Brazilian subtropics. *European Journal of Agronomy*, v. 57, p. 4-9, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>.
- MÜLLER, M. D.; FERNANDES, E. N.; CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. F. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 60, p. 11-17, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4336/2009.pfb.60.11>.
- NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; KUMAR, B. M.; SHOWALTER, J. M. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy*, v. 108, p. 237-307, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3).
- NEAL, A. L.; BACQ-LABREUIL, A.; ZHANG, X.; CLARK, I. M.; COLEMAN, K.; MOONEY, S. J.; RITZ, K.; CRAWFORD, J. W. Soil as an extended composite phenotype of the microbial metagenome. *Scientific Reports*, v. 10, e10649, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67631-0>.
- OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; FAWARIN, J. L.; SANTOS, D. C. **Sistema Santa Brígida** - Tecnologia Embrapa: consorciação de milho com leguminosas. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 16 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular técnica, 88).
- OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; LIMA, M. L.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 18, p. 105-116, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1146-0>.
- OLIVEIRA, J. M.; GOLLANY, H. T.; POLUMSKY, R. W.; MADARI, B. E.; LEITE, L. F. C.; MACHADO, P. L. O. A.; CARVALHO, M. T. M. Predicting soil organic carbon dynamics of integrated crop-livestock system in Brazil using the CQESTR model. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, e282786, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.826786>.

- PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MÜLLER, M. D.; PIRES, M. F. A.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 1176-1183, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000009>.
- PAUL, E. A. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 98, p. 109-126, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. *Agroforestry Systems*, v. 93, p. 39-49, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. *Scientia Agricola*, v. 77, e20180150. 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; ROCHA, E. L. F.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Reducing competition in crop-livestock-forest integrated system by thinning eucalyptus trees. *Experimental Agriculture*, v. 56, p. 1-13, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479720000162>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. *Agriculture Ecosystems & Environment*, v. 312, e107350, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>.
- POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. D.; RODRIGUES, R. D. A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G. D.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. *Land Degradation*, v. 32, p. 3457-3468, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>.
- RAMANKUTTY, N.; MEHRABI, Z.; WAHA, K.; JARVIS, L.; KREMEN, C.; HERRERO, M.; RIESEBERG, L. H. Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. *Annual Review of Plant Biology*, v. 69, p. 789-815, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040256>.
- REIS, J. C.; KAMOI, M. Y. T.; LATORRACA, D.; CHEN, R. F. F.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; RODRIGUES, R. A. R.; RODRIGUES-FILHO, S. Assessing the economic viability of integrated crop livestock systems in Mato Grosso, Brazil. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v. 35, p. 631-642, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/s1742170519000280>.
- ROCKSTRÖM, J.; WILLIAMS, J.; DAILY, G.; NOBLE, A.; MATTHEWS, N.; GORDON, L.; WETTERSTRAND, H.; DECLERCK, F.; SHAH, M.; STEDUTO, P.; FRAITURE, C.; HATIBU, N.; UNVER, O.; BIRD, J.; SIBANDA, L.; SMITH, J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, v. 46, p. 4-17, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>.
- RUMPEL, C.; AMIRASLANI, F.; CHENU, C.; CARDENAS, M. G.; KAONGA, M.; KOUTIKA, L. S.; LADHA, J.; MADARI, B. E.; SHIRATO, Y.; SMITH, P.; SOUDI, B.; SOUSSANA, J. F.; WHITEHEAD, D.; WOLLENBERG, E. The 4p1000 Initiative: opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. *Ambio*, v. 49, p. 350-360, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>.
- SÁ, J. C. M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; FACCIO CARVALHO, P. C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, v. 98, p. 102-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>.
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, p. 1349-1356, 2011. DOI: [10.1590/S0100-204X2011001000031](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000031).
- SALTON, J. C.; KICHEL, A. N.; ARANTES, M.; KRUKER, J. M.; ZIMMER, A. H.; MERCANTE, F. M.; ALMEIDA, R. G. Sistema São Mateus - Sistema de integração lavoura-pecuária para a região do Bósão Sul-Mato-Grossense. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. 6 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 186).
- SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENCO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 190, p. 70-79, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023>.
- SANTOIEEMMA, G. Recent methodologies for studying the soil organic matter. *Applied Soil Ecology*, v. 123, p. 546-550, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.011>.
- SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; SARTO, J. R. W.; RICE, C. W.; ROSOLEM, C. A. Deep soil carbon stock, origin, and root interaction in a tropical integrated crop-livestock system *Agroforestry Systems*, v. 94, p. 1865-1877, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00505-6>.

- SCHMIDT, W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMAN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, v. 478, p. 49-56, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10386>.
- SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; PRAES, M. F. F. M.; RODRIGUES, P. H. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. *Scientia Agrícola*, v. 76, p. 33-40, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0131>.
- SENESI, G. S.; MARTIN-NETO, L.; VILLAS-BOAS, P. R.; NICOLODELLI, G.; MILORI, D. M. B. P. Laser-based spectroscopic methods to evaluate the humification degree of soil organic matter in whole soils: a review. *Journal of Soils and Sediments*, v. 18, p. 1292-1302, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1539-6>.
- SERRAJ, R.; KRISHNAN, L.; PINGALI, P. Agriculture and food systems to 2050: a synthesis. In: SERRAJ, R.; PINGALI, P. (ed) *Agriculture and Food Systems in 2050: Global Trends, Challenges and Opportunities*. London: World Scientific Publishing, 2018. p. 3-46.
- SILVA, L. S.; LAROCA, J. V. S.; COELHO, A. P.; GONÇALVES, E. C.; GOMES, R. P.; PACHECO, L. P.; CARVALHO, P. C. F.; PIRES, G. C.; OLIVEIRA, R. L.; SOUZA, J. M. A.; FREITAS, C. M.; CABRAL, C. E. A.; WRUCK, F. J.; SOUZA, E. D. Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? *Applied Soil Ecology*, v. 170, e104257, 2022. DOI: [10.1016/j.apsoil.2021.104257](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104257).
- SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. Avaliação da adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Brasil. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). *Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos*. Brasília: DF, Embrapa, 2019. p. 340-379.
- SOARES, M. B.; FREDD, O. S.; MATOS, E. S.; TAVANTI, F. R.; WRUCKE, F.; LIMA, J. P.; MARCHIORO, V.; FRANCHINI, J. C. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. *Catena*, v. 185, e104279, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104279>.
- SOUZA, L. S.; BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; MELO FILHO, J. F.; LEPSCH, I. F.; RAMALHO FILHO, A. Terminologia básica utilizada em manejo e conservação do solo e da água. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. (ed.) *Manejo e Conservação do Solo e da Água*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. p. 1-17.
- TADINI, A. M.; NICOLODELLI, G.; SENESI, G. S.; ISHIDA, D. A.; MONTES, C. R.; LUCAS, Y.; MOUNIER, S.; GUIMARAES, F. G. E.; MILORI, D. M. B. P. Soil organic matter in podzol horizons of the Amazon region: Humification, recalcitrance, and dating. *Science of the Total Environment*, v. 613/614, p. 160-167, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.068>.
- TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN-NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Soil Tillage e Research*, v. 211, e105001, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105001>.
- TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; GORANOV, A. I.; MILORI, D. M. B. P.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; COLNAGO, L. A.; HATCHER, P. G. Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern Brazil. *European Journal of Soil Science*, v. 73, p. 1-18, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13136>.
- TADINI, A. M.; BERNARDI, A. C. C.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MARTIN-NETO, L. Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. *Geoderma Regional*, v. 28, e00476, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00476>.
- TADINI, A. M.; GORANOV, A. I.; MARTIN-NETO, L.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; HATCHER, P. G. Structural characterization using 2D NMR spectroscopy and TMAH-GC GC-MS: Application to humic acids from soils of an integrated agricultural system and an Atlantic native forest. *Science of the Total Environment*, v. 815, e152605, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152605>.
- TSUKAMOTO FILHO, A. A.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L.; PASSOS, C. A. M.; SILVA, M. L. Fixação de carbono em um sistema agrissilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. *Agrossilvicultura*, v. 1, p. 29-41, 2004.
- TUPY, O.; PEZZOPANE, J. R. M.; ESTEVES, S. N.; BERNARDI, A. C. C. Análise da viabilidade econômica e financeira da Integração Pecuária-Floresta: uma simulação. *Informações Econômicas*, v. 49, eie192018, 2019.
- VALANI, G. P.; MARTINI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, v. 220, e105357, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>.
- VERMEULEN, S.; BOSSIO, D.; LEHMANN, J.; LUU, P.; PAUSTIAN, K.; WEBB, C.; AUGÉ, F.; BACUDO, I.; BAEDEKER, T.; HAVEMANN, T.; JONES, C. A global agenda for collective action on soil carbon. *Nature Sustainability*, v. 2, p. 2-4, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0212-z>.

VIGAN A.; LASSEUR, J.; BENOÎT, M.; MOUILLLOT, F.; EUGÈNE, M.; MANSARD, L.; VIGNE, M.; LECOMTE, P.; DUTILLY, C. Evaluating livestock mobility as a strategy for climate change mitigation: Combining models to address the specificities of pastoral systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 242, p. 89-101, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.020>.

VILELA, L.; MARCHAO, R. L.; PULROLNIK, K.; GUIMARAES JUNIOR, R. Sistemas de Integração Lavouara-Pecuária: histórico e evolução no Cerrado. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 28-44.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; SHIMATA, I.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Economic viability of a crop-livestock integration system. **Ciência Rural**, v. 51, n.2, e20190538, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190538>.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; LANG, B.; LUTZOW, M. V.; MARTIN-SPIOTTA, E.; WESEMAEL, B. V.; RABOT, E.; LIEB, M.; GARCIA-FRANCO, N.; WOLLSCHLÄGER, U.; VOGEL, H. J.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149-162, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>.

WILKINS, R. J. Eco-efficient approaches to land management: a case for increased integration of crop and animal production systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society of Britain**, v. 363, p. 517-525, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2167>.

XAVIER, D. F.; SILVA LÉDO, F. J.; PACIULLO, D. S.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Nitrogen cycling in a Brachiaria-based silvopastoral system in the Atlantic Forest region of Minas Gerais, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 99, p. 45-62, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9617-x>.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; BIGHAM, J. M.; RESCK, D. V. S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: texture and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, p. 1204-1214, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0014>.