



Impacto de sistemas produtivos nos estoques de carbono e nitrogênio do solo na Região Noroeste do Paraná

Marcos Fernando Glück Rachwal¹, Josileia Acordi Zanatta¹, Vanderley Porfírio-da-Silva¹, Luziane Franciscon¹

¹Embrapa Florestas, Estrada da Ribeira, Km 111, CP. 319, CEP 83411-000, Colombo, PR, Brasil

***Autor correspondente:**

marcos.rachwal@embrapa.br

Termos para indexação:

Eucalipto
Integração pecuária-floresta
Pastagem convencional

Index terms:

Eucalyptus
Livestock forest integration
Conventional pasture

Histórico do artigo:

Recebido em 03/12/2020

Aprovado em 26/10/2021

Publicado em 26/11/2022

Resumo - Comparou-se os estoques de C e N em Latossolo Vermelho sob Floresta Estacional Semidecidual (FN), pastagem convencional (P) e sistema de integração pecuária-floresta (IPF). Coletaram-se amostras de solo em subcamadas até 100 cm de profundidade, após 5 anos da implantação dos sistemas produtivos. O solo do IPF apresentou estoque de C, na camada de 0 a 30 cm, 39% e 23% menor do que no solo da FN e da P, respectivamente. Com 3,2 Mg ha⁻¹ de N o solo do IPF continha menor estoque na camada de 0 cm a 30 cm em relação ao solo da P (4,7 Mg ha⁻¹ de N). Na camada de 0-100 cm não houve diferença nos estoques de C entre os tratamentos, mas o IPF apresentou o menor estoque de N. Os sistemas produtivos necessitam de medidas adicionais de manejo para potencializar o acúmulo de C e N no solo, entre as quais, reposição de nutrientes, adequado manejo da pastagem e melhores práticas silviculturais no IPF, visando reduzir o grau de sombreamento. Isto trará sustentabilidade aos sistemas, minimizando a perda de C e N para a atmosfera, na forma de GEE, um dos fatores que colabora para as mudanças do clima.

Impact of productive systems on carbon and nitrogen stocks in the soil, in the northwest region of Paraná

Abstract - The objective was to compare the C and N stocks of a Ferralsol under Semideciduous Forest (NF), conventional pasture (P) and integration livestock-forestry system (ILF). Soil sampling was taken 5 years of the deployment of production systems. It was collected in sublayers up to 100 cm of deep. The ILF soil had the lowest C stock in the 0 to 30 cm, being 39% less than in the NF soil and 23% less than in the P soil. With 3.2 Mg N ha⁻¹, the ILF soil showed the lowest N stock in the 0 to 30 cm than P soil and NF soil, where N stock was 4.7 Mg N ha⁻¹. In the 0 to 100 cm, there were no differences between the systems for soil C stocks, but the N stock was lower in the ILF system, with 9.2 Mg ha⁻¹ in ILF. Improvements must be implemented to ILF and P to recover C and N stocks, increase productivity, including the replacement of nutrients, especially N, adequate pasture management, and better silvicultural practices in the ILF to reduce the degree of shading; contributing not only to the sustainability of production systems, but also to the control of climate change.



Introdução

Modelos convencionais de uso do solo prejudicam a qualidade do solo e diminuem a produtividade (Sanderson et al., 2013; Palm et al., 2014). Adicionalmente, a perda de carbono orgânico do solo, pela conversão da vegetação original em usos mais intensivos, afeta a capacidade de mitigação dos gases de efeito estufa (GEE), como as pastagens, que podem intensificar esta perda (Post et al., 2000; Lal, 2005; Cerri et al., 2008; Ostle et al., 2009; Parron et al., 2015; Higa et al., 2017). As mudanças de uso do solo podem agravar as mudanças climáticas quando resultam em perdas de carbono. Segundo Sá et al. (2017), entre 1870 e 2014 houve uma perda global de 148 milhões de toneladas de carbono do solo.

O uso de sistemas integrados de produção agropecuária, que permitem o desenvolvimento da agricultura, pecuária e silvicultura em uma mesma área (Balbino et al., 2011), é considerado como uma alternativa para reverter a degradação da agropecuária tradicional, principalmente a perda de carbono no solo (Salton et al., 2014), e para incrementar a produtividade, contribuindo para o enfrentando das mudanças do clima (Stavi & Lal, 2013; Oliveira et al., 2018). Estes sistemas, por serem mais diversos e complexos, se assemelham aos ecossistemas naturais (Groppo et al., 2015) e, quando bem planejados, podem minimizar os efeitos das variações e eventos meteorológicos, como altas temperaturas, geadas, ventos frios, granizo e excesso de radiação nas lavouras, nas pastagens e nos rebanhos (Ong et al., 2015; Varella et al., 2016), fenômenos que podem se intensificar com os processos de alteração do clima global.

A adoção de sistemas de manejo, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), tem grande potencial para elevar a qualidade do solo, aumentando os estoques de C em curto e médio prazos (Batlle-Bayer et al., 2010; Piva, 2012; Sacramento et al., 2013). Isso é possível devido à combinação sinérgica de espécies florestais e forrageiras com elevada produção primária, associada à presença de animais que se alimentam das espécies forrageiras, o que estimula o crescimento em ambiente com conforto térmico pela presença das árvores (Porfírio-da-Silva et al., 2001; Balbino et al., 2011; Embrapa, 2011).

Além disso, o sistema ILPF com eucalipto tem elevado potencial de acumular C nas raízes das árvores e também na serapilheira (Pulrolnik, 2016). Conceição et al. (2017) registraram, em três anos de monitoramento,

maior estoque de C até 30 cm de profundidade no solo, em sistema ILPF com eucalipto e em pastagem, em relação à lavoura e ao plantio homogêneo de eucalipto. Os mesmos autores relataram que no ILPF o estoque de N foi mais elevado, possivelmente beneficiando o crescimento das plantas na lavoura e na pastagem e, conseqüentemente, o aumento dos estoques de C.

Por outro lado, Neves et al. (2004) determinaram maior teor de C em solo sob plantio homogêneo de eucalipto do que em pastagem convencional e em sistema integrado eucalipto/pastagem, em praticamente todas as profundidades estudadas. Em relação ao N, Pulronik et al. (2009) e Pegoraro et al. (2011) encontraram maior estoque de N total em solo sob pastagem do que sob eucalipto. Alguns autores não encontraram diferença nos estoques de C e de N do solo até 40 cm entre floresta nativa, pastagem convencional e plantio de eucalipto (Rangel & Silva, 2007) e entre pastagem extensiva e sistema ILPF com eucalipto (Bieluczyk, 2018). Portanto, pode-se dizer que não há um padrão de alteração nos estoques de C e de N em função dos tipos de solo, práticas de manejo, histórico e tempo de uso, o que sugere que os resultados são influenciados pela interação do ambiente e das práticas de manejo adotadas nos sistemas (Sá et al., 2017; Lorenz & Lal, 2018).

A região Noroeste do Paraná é caracterizada por solos de textura arenosa à média, derivados do arenito Caiuá, que naturalmente tem uma fragilidade intrínseca e, se não manejados adequadamente, podem vir a apresentar algum grau de degradação do solo. Recentemente, muitos pecuaristas da região têm adotado o sistema ILPF em busca de maior renda, diversificação e estabilidade da produção. Assim, é importante investigar se os sistemas de uso e as práticas de manejo adotadas na região têm resultado em melhorias, especificamente nos teores de matéria orgânica do solo, o que tem relação estreita com a fertilidade e qualidade do mesmo. Neste contexto, este trabalho objetivou determinar os estoques de C e N em solo com baixo teor de argila cultivado sob sistema de integração pecuária-floresta, implantado há 5 anos em área de pastagem convencional.

Material e métodos

Descrição da área de estudo e tratamentos

Essa pesquisa foi realizada na Fazenda Santa Lydia, localizada no município de Diamante do Norte, noroeste

do Paraná (22°37'59" S e 52°48'30" W). Segundo Köppen, o clima é subtropical (Cfa), com chuvas bem distribuídas anualmente, verões quentes, temperatura média anual de 19 °C e pluviosidade anual de 1.500 mm. A cobertura vegetal original da área é Floresta Estacional

Semidecidual (FES) e o solo é um Latossolo Vermelho A moderado com textura média (Tabela 1) e relevo suave ondulado. Este solo é derivado de rocha sedimentar arenítica da Formação Caiuá do Cretáceo Superior, que apresenta elevados teores de areia.

Tabela 1. Granulometria do solo na Floresta Estacional Semidecidual, pastagem convencional e integração pecuária-floresta (IPF).
Table 1. Soil granulometry in native forest (FN), conventional pasture (P) and livestock-forest integration system (IPF).

Camada (cm)	Pastagem			Floresta Estacional Semidecidual			IPF		
	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte
	----- g kg ⁻¹ -----								
0 – 5	135	749	115	154	797	49	151	780	69
5 – 10	166	770	64	163	789	48	166	776	58
10 – 20	165	766	69	182	766	52	161	774	66
20 – 30	220	703	77	190	756	54	194	737	69
30 – 40	258	674	68	232	717	51	251	689	60
40 – 60	287	635	78	249	692	59	287	641	71
60 – 80	311	580	109	289	656	55	303	642	55
80 – 100	308	591	101	301	644	55	295	630	75

O histórico de uso das áreas cultivadas iniciou com a retirada da floresta original há 59 anos. Ao longo desse período, a área foi cultivada com café (24 anos), rotação milho/soja/trigo (7 anos) e pastagem de *Urochloa brizantha* (23 anos). Em 2012, em parte de área foi implantado um sistema integrado de pecuária e floresta (IPF) com eucaliptos (*E. urograndis* - cv. I144), no arranjo espacial de renques de filas duplas, dispostos em linhas demarcadas em nível e espaçadas em 20 m, com espaçamento de 4 m entre fileiras e 2 m entre árvores, em associação com o cultivo intercalado de mandioca (*Manihot esculenta*) por 2 anos e, posteriormente, com a grama porto-rico (*Cynodon nlemfuensis*) por 3 anos. A outra parte da área foi convertida em pastagem convencional, onde se implantou a grama porto rico (P). Tanto no sistema IPF como na P, houve pastejo de animais de corte, em rodízio de tempo fixo de ocupação de três a cinco dias em cada piquete. A lotação de animais por hectare variou, dependendo da época do ano.

Em 2012, as áreas receberam calcário (1,65 ton ha⁻¹), gesso (400 kg ha⁻¹) e mono-amônio-fosfato (500 kg ha⁻¹), quando houve a conversão da pastagem degradada de *U. brizantha* em sistema de integração pecuária-floresta e pastagem com grama porto rico.

Em 2017, as formas de uso do solo, Floresta Estacional Semidecidual (FN), pastagem convencional (P) e, sistema de integração pecuária-floresta (IPF),

foram comparados quanto aos estoques de C e N. Para o tratamento FN, foram amostrados dois remanescentes de FN que nunca sofreram corte raso e se encontravam em bom estado de conservação, sendo representativos da Floresta Estacional Semidecidual original.

Amostragem do solo e determinação dos estoques de C e N

Amostras de solo para determinação dos estoques de C e de N foram coletadas em setembro de 2017, quando o eucalipto estava com 5 anos. Foram abertas três trincheiras por tratamento, nas dimensões 1,0 m x 1,0 m x 1,2 m. No tratamento IPF, a amostragem foi feita em duas condições: sob a copa dos renques (LE) de eucalipto e na posição entre renques (PE), que corresponde à pastagem do sistema IPF (Figura 1).

Em duas paredes das trincheiras foram obtidas amostras deformadas, nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-60; 60-80 e 80-100 cm. Adicionalmente, foram coletados 2 perfis de solo, com trado holandês, para cada trincheira, totalizando 9 repetições por tratamento (3 perfis das trincheiras e 6 perfis por tradagem). As amostras foram secas, moídas finamente em almofariz para 0,25 µm e analisadas para teor de C e N no analisador automático CHNS (Elementar, modelo Vario Macro Cube), no laboratório de ciclos biogeoquímicos da Embrapa Florestas.



Figura 1. Esquema de coleta de solos em trincheiras (retângulos vermelhos) entre os renques de eucalipto (1) e sob as copas das árvores nos renques (2).

Figure 1. Soil sampling scheme in trenches (red rectangles) between the eucalyptus rows (1) and under trees canopy in the rows (2).

Nas mesmas camadas de solo coletadas para a análise de C e N, foram obtidas amostras indeformadas para determinação da densidade do solo pelo método do cilindro volumétrico (98 cm³). Nas camadas até 30 cm, foram obtidas quatro amostras volumétricas de solo por trincheira, perfazendo 12 repetições por tratamento. Abaixo de 30 cm, foram obtidas 6 repetições por camada por tratamento, e os cilindros foram obtidos do centro das camadas de solo. Na mesma trincheira, foram determinadas as espessuras dos horizontes pedogenéticos para classificação do solo.

Os estoques de C e de N em cada camada foram calculados pelo método da massa equivalente de solo (Sisti et al., 2004), quando a FN foi considerada o tratamento de referência. Os estoques acumulados de C e de N para as camadas de 0-30 cm e 0-100 cm foram obtidos pelos somatórios dos estoques das camadas individuais.

No caso do sistema IPF, os estoques de cada camada foram calculados considerando a proporção de área ocupada pelos dois componentes, sendo que em um hectare o eucalipto ocupa 25% da superfície do solo, e a pastagem 75% da área do sistema IPF.

Os tratamentos foram submetidos ao teste de variância entre os estoques de C e N nas camadas individualmente e nos estoques acumulados (0-30 cm, 30-100 cm e 0-100 cm). As médias dos estoques de C e de N de cada uso do solo foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, adotando-se o delineamento completamente casualizado (DCC). As análises foram efetuadas no Programa R Core Team (2019).

Resultados

Estoques de C e de N no solo

Os estoques de C nos solos dos diferentes sistemas de uso e profundidades amostradas podem ser visualizados na Tabela 2. O estoque acumulado até a profundidade de 30 cm no solo da Floresta Estacional Semidecidual (FN) (34,6 Mg ha⁻¹) se igualou estatisticamente ao solo da pastagem convencional (P) (29,2 Mg ha⁻¹) e ambos superaram o solo do sistema integração pecuária-floresta (IPF) (22,5 Mg ha⁻¹). Quando consideradas as profundidades de 0 a 100 cm e de 30 a 100 cm, não

foram observadas diferenças significativas nos estoques acumulados de C entre os três tipos de uso do solo.

Foram observadas diferenças do estoque de C, em função dos tipos de uso do solo (Tabela 2), apenas nas três primeiras camadas (0-5 cm; 5-10 cm e 10-20 cm). Nestas, o solo da FN apresentou mais C do que o solo do tratamento IPF, mas o estoque de C no solo da FN somente diferiu do da P na camada de 0 a 5 cm. O solo do IPF superou o da P apenas na camada de 5 a 10 cm.

Os estoques acumulados de C dos solos na camada de 0 a 30 cm foram de 29,2, 22,9 e 21,2 Mg ha⁻¹, na P, entre renques de eucaliptos (PE) e sob a copa dos renques (LE), respectivamente, sendo que no solo da P o valor foi igual ao da PE e da LE (Tabela 2). Na P o estoque de C no solo não diferiu significativamente da FN, na camada de 0 cm a 30 cm e foi similar à PE em praticamente todas as camadas. Não houve diferença significativa nos estoques de C nas profundidades de 30-100 cm e 0 a 100 cm entre os tratamentos.

Em quase todas as camadas, o estoque de C do solo da P foi igual ao estoque do solo do LE e do PE (Tabela 2). O estoque de C do solo da P superou o da PE e do LE apenas na camada de 0 cm a 5 cm, enquanto o solo

do LE superou o da P na camada de 80 cm a 100 cm, fazendo com que, nessa camada, o IPF apresentasse 33% mais C estocado. Também nas camadas de 40-60 cm e 60-80 cm, o solo do IPF apresentou, respectivamente, 4% e 19% mais C estocado do que a P. Os teores de C nas camadas de 40 cm a 100 cm no solo do LE foram sempre os mais elevados (dados não apresentados), provavelmente devido à concentração de raízes das árvores de eucaliptos na faixa dos renques. Entre os componentes do IPF, não houve diferença no estoque acumulado de C (0-30 cm; 30-100 cm e 0-100 cm) entre o solo da PE e do LE, bem como em nenhuma das camadas individualmente.

Os estoques acumulados de N no solo da FN (4,7 Mg ha⁻¹) e da P (4,7 Mg ha⁻¹), na profundidade de 0 a 30 cm, foram semelhantes, e superaram o estoque do IPF (3,2 Mg ha⁻¹) (Tabela 3). Na camada de 0-100 cm observou-se o mesmo comportamento, porém, até um metro de profundidade o solo da FN teve 2,5 Mg N ha⁻¹ a mais do que o do sistema IPF e 1,7 Mg ha⁻¹ a menos do que no solo da P, que acumulou 4,3 Mg ha⁻¹ a mais do que o sistema IPF. Não foi observada diferença significativa nos estoques acumulados de N no solo na profundidade de 30 a 100 cm entre os três sistemas de uso do solo.

Tabela 2. Estoque de carbono (Mg C ha⁻¹) no solo em Floresta Estacional Semidecidual (FN), pastagem convencional (P) e integração pecuária-floresta (IPF) e sob a copa dos renques (LE) e entre renques (PE).

Table 2. Carbon stock (Mg C ha⁻¹) in the soil in Semideciduous Forest (FN), conventional pasture (P), livestock- forest integration (IPF) and under trees canopy in the rows of trees (LE) and between rows of trees (PE).

Camada (cm)	FN	P	IPF	PE ¹	LE ¹
	----- ² Mg C ha ⁻¹ -----				
0 – 5	10,1 ± 3,1 a A	5,4 ± 0,1 b B	3,6 ± 0,9 b	3,5 ± 1,3 B	4,0 ± 0,4 B
5 – 10	5,8 ± 0,9 a A	5,7 ± 0,1 a A	4,1 ± 0,7 b	4,1 ± 0,7 B	4,1 ± 0,8 B
10 – 20	10,5 ± 1,3 a	10,0 ± 1,1 ab	7,9 ± 1,4 b	8,1 ± 2,4	7,1 ± 2,4
20 – 30	8,1 ± 0,9	8,1 ± 1,2	6,9 ± 1,3	7,2 ± 2,0	5,9 ± 1,9
30 – 40	6,9 ± 1,8	7,4 ± 1,2	6,6 ± 1,2	6,9 ± 1,8	5,8 ± 1,2
40 – 60	11,0 ± 1,5	10,9 ± 1,9	11,4 ± 0,7	11,8 ± 1,0	10,5 ± 1,3
60 – 80	10,7 ± 2,2	10,4 ± 2,7	12,4 ± 1,9	11,9 ± 0,4	14,4 ± 7,1
80 – 100	9,4 ± 1,1 B	8,7 ± 1,9 B	11,6 ± 2,3	10,5 ± 1,8 AB	15,3 ± 4,4 A
0 – 30	34,6 ± 5,3 a A	29,2 ± 2,5 a AB	22,5 ± 3,4 b	22,9 ± 4,6 B	21,2 ± 4,7 B
30 – 100	38,1 ± 5,9	37,4 ± 7,7	42,2 ± 4,6	40,9 ± 3,0	45,9 ± 5,6
0 – 100	72,7 ± 10,6	66,7 ± 10,1	64,7 ± 6,4	63,9 ± 7,4	67,1 ± 6,9

¹Componentes do sistema IPF. ²Valores médios ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos FN, P e IPF na mesma camada de solo, pelo teste de Tukey (5%); Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos FN, P com os componentes do IPF, PE e LE na mesma camada de solo, pelo teste de Tukey (5%).

Tabela 3. Estoque de nitrogênio (Mg N ha⁻¹) no solo em floresta estacional semidecidual (FN), pastagem convencional (P), integração pecuária-floresta (IPF) e no solo sob copas nos renques (LE) e entre renques (PE).

Table 3. Nitrogen stock (Mg N ha⁻¹) in the soil in semideciduous forest, conventional pasture (P), livestock-forest integration (IPF) and under the trees canopy in the rows (LE) and between rows of trees (PE).

Camadas (cm)	FN	P	IPF	PE ¹	LE ¹
	Mg N ha ⁻¹				
0 – 5	1,11 ± 0,27 a A	0,72 ± 0,14 b B	0,47 ± 0,08 c	0,46 ± 0,08 C	0,49 ± 0,10 BC
5 – 10	0,78 ± 0,11 a NS	0,82 ± 0,18 a NS	0,53 ± 0,11 b	0,52 ± 0,09 NS	0,55 ± 0,14 NS
10 – 20	1,52 ± 0,09 ab NS	1,67 ± 0,49 a NS	1,13 ± 0,28 b	1,14 ± 0,27 NS	1,13 ± 0,37 NS
20 – 30	1,24 ± 0,08 ns NS	1,47 ± 0,47 ns NS	1,06 ± 0,24 ns	1,07 ± 0,23 NS	1,02 ± 0,33 NS
30 – 40	1,15 ± 0,23 ns NS	1,39 ± 0,42 ns NS	1,01 ± 0,24 ns	1,01 ± 0,20 NS	0,99 ± 0,34 NS
40 – 60	2,04 ± 0,36 ns NS	2,52 ± 0,67 ns NS	1,74 ± 0,46 ns	1,79 ± 0,47 NS	1,58 ± 0,46 NS
60 – 80	1,99 ± 0,40 ab AB	2,57 ± 0,52 a A	1,69 ± 0,32 b	1,74 ± 0,39 AB	1,53 ± 0,14 B
80 – 100	1,87 ± 0,23 ab AB	2,28 ± 0,49 a A	1,56 ± 0,17 b	1,57 ± 0,25 B	1,50 ± 0,11 B
0 – 30	4,65 ± 0,51 a NS	4,68 ± 1,28 a NS	3,19 ± 0,71 b	3,19 ± 0,66 NS	3,18 ± 0,93 NS
30 – 100	7,05 ± 1,11 ns NS	8,76 ± 2,05 ns NS	5,99 ± 1,18 ns	6,12 ± 1,3 NS	5,62 ± 0,85 NS
0 – 100	11,70 ± 1,54 a AB	13,44 ± 3,33 a A	9,19 ± 1,86 b	9,31 ± 1,94 AB	8,81 ± 1,75 B

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos FN, P e IPF na mesma camada de solo, pelo teste de Tukey (5%); Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos FN, P com os componentes do IPF, PE e LE na mesma camada de solo, pelo teste de Tukey (5%); NS ou ns = não significativo. ¹Componentes do sistema IPF. ²Valores médios ± desvio padrão.

O estoque de N na camada superficial (0 cm a 5 cm) da FN foi maior do que o da P e do sistema IPF, sendo que este último mostrou o menor valor.

Nas camadas de 0 cm a 5 cm, 5 cm a 10 cm, 10 cm a 20 cm, 60 cm a 80 cm e 80 cm a 100 cm o estoque de N da P foi superior ao do IPF. Nota-se que esta tendência se repete nas camadas de 20 a 30 cm, 30 a 40 cm e 40 a 60 cm. No entanto, não houve diferença significativa no estoque de N no solo nas camadas de 20-100 cm entre a FN e a P e entre o IPF e a FN.

O conteúdo de N do solo da P, na camada de 0 cm a 30 cm, foi semelhante ao do solo da PE e da LE (Tabela 3). O estoque de N acumulado no solo da P (13,4 Mg ha⁻¹), na profundidade de 0 a 100 cm, não diferiu da quantidade de N do solo da PE (9,3 Mg ha⁻¹), mas foi superior ao do LE (8,8 Mg ha⁻¹). Não ocorreu diferença significativa nos estoques acumulados de N na profundidade de 30 a 100 cm entre os componentes dos sistemas de uso do solo avaliados.

Na camada de 0 a 5 cm o estoque de N no solo da P foi superior ao da PE, sendo que ambos não diferiram do LE (Tabela 3). Em todas as demais camadas, os estoques de N no solo da LE e da PE foram muito similares e, em ambos, inferiores aos medidos no solo da P. Há uma tendência em todas as camadas do solo da P ter os maiores valores de estoque de N, inclusive em relação ao

da FN, exceto na camada de 0 cm a 5 cm. O estoque de N nas camadas de 60 cm a 80 cm e de 80 cm a 100 cm no solo da P se igualou ao da FN e superou o da LE em 1,0 Mg N ha⁻¹ e 780 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Densidade do solo

A densidade do solo até a profundidade de 30 cm nos diferentes tipos de uso variou de 0,95 g cm⁻³ (0 a 5 cm da FN) a 1,68 g cm⁻³ (de 10 a 20 cm da PE), como pode ser observando na Tabela 4. O solo da FN apresentou as menores densidades nas três primeiras camadas de solo em relação ao P e IPF. O tratamento P na superfície (1,42 g cm⁻³) mostrou menor densidade do que nas linhas de eucalipto (LE, 1,55 g cm⁻³) e na pastagem do sistema IPF (PE 1,57 g cm⁻³). Nas camadas de 5-10 cm e 10-20 cm a densidade do solo não diferiu entre as linhas de eucalipto (LE), pastagem convencional (P) e pastagem nas entrelinhas de eucalipto (PE), mas foram maiores do que na FN. Na profundidade de 20 a 30 cm a FN (1,35 g cm⁻³) expressou menor densidade do que o solo da P (1,58 g cm⁻³) e das linhas de eucalipto (LE, 1,63 g cm⁻³), não diferindo da pastagem nas entrelinhas do eucalipto. No LE (1,63 g cm⁻³) a densidade foi maior do que na PE (1,56 g cm⁻³), não tendo diferido da pastagem convencional (P). Nas camadas compreendidas entre 30 e 100 cm não houve diferença na densidade do solo entre os diferentes tipos de uso.

Tabela 4. Densidade do solo (g cm^{-3}) em camadas sob diferentes tipos de uso**Table 4.** Soil bulk density (g cm^{-3}) in layers under different types of use

Camadas (cm)	FN	LE	P	PE
	----- ¹ g cm ⁻³ -----			
0 – 5	0,95 ± 0,24 a	1,55 ± 0,03 c	1,42 ± 0,01 b	1,57 ± 0,07 c
5 – 10	1,16 ± 0,16 a	1,58 ± 0,05 b	1,61 ± 0,03 b	1,61 ± 0,06 b
10 – 20	1,37 ± 0,16 a	1,54 ± 0,05 b	1,63 ± 0,05 b	1,68 ± 0,06 b
20 – 30	1,35 ± 0,15 a	1,63 ± 0,05 c	1,58 ± 0,03 bc	1,56 ± 0,05 ab
30 – 40	1,40 ± 0,13 ns	1,46 ± 0,05 ns	1,59 ± 0,02 ns	1,50 ± 0,05 ns
40 – 60	1,36 ± 0,17 ns	1,59 ± 0,07 ns	1,59 ± 0,05 ns	1,65 ± 0,07 ns
60 – 80	1,47 ± 0,26 ns	1,51 ± 0,05 ns	1,50 ± 0,03 ns	1,37 ± 0,05 ns
80 – 100	1,47 ± 0,19 ns	1,47 ± 0,05 ns	1,49 ± 0,02 ns	1,49 ± 0,05 ns

Letras diferentes na linha indicam diferença significativa pelo teste de Tukey, ($p < 0,05$); ns, diferença não significativa; FN = Floresta Estacional Semidecidual; LE = linhas de eucalipto; P = pastagem convencional e PE = pastagem entre renques de eucalipto. ¹Valores médios ± desvio padrão.

Discussão

Densidade do solo

As maiores densidades do solo nas linhas de eucalipto (LE), pastagem convencional (P) e na pastagem entre renques de eucalipto (PE) em relação à Floresta Estacional Semidecidual (FN), na profundidade de 0 a 30 cm, possivelmente são decorrentes de compactação do solo nestes cultivos, devido aos usos que se sucederam após a retirada da vegetação nativa e também pelo pisoteio do gado (Tabela 3). É comum o aumento da densidade do solo em função da conversão de florestas nativas para usos agrícolas (Spera et al., 2004), pastagem e/ou eucalipto (Rangel & Silva, 2007; Costa et al., 2009; Cardoso et al., 2010). Neves et al. (2004) perceberam diminuição do estoque de C no solo no sistema eucalipto/pastagem/gado, devido à compactação e consequente erosão (observação de campo) e diminuição da biomassa verde pelo pastejo.

Os valores mais elevados de densidade na camada de 0 cm a 5 cm na PE e no LE, com a mesma tendência nas camadas de 5 cm a 10 cm, e de 10 cm a 20 cm, sugerem que a pressão de pastejo possa ter sido superior à ocorrida na P, o que somado ao uso temporário da área para cultivo da mandioca, possivelmente com elevado revolvimento do solo na fase de implantação do sistema IPF, pode ter levado às maiores densidades do solo. O aumento da densidade do solo nos renques de eucalipto pode ser devido ao intenso tráfego preferencial do gado sob as linhas de eucalipto. Especialistas da área de comportamento animal indicam que esse fenômeno

é devido à preferência do animal de se deslocar pela sombra das árvores (Santos, 2019), tanto quanto pela semelhança da linha de árvores em cercas (Santana et al., 2019). A compactação devido ao pisoteio animal ocorre na parte mais superficial do solo, até 15 cm (Cantarutti et al., 2001; Costa et al., 2009), podendo ser temporário e reversível (Cassol, 2003). Práticas de manejo da pastagem adequadas podem evitar que a compactação pelo pisoteio animal atinja valores que desencadeiem a degradação permanente da capacidade produtiva da pastagem (Dias Filho, 2007).

A adequada pressão de pastejo pode contribuir com a diminuição das perdas de C, mantendo a capacidade produtiva da pastagem e, conseqüentemente, os estoques no solo e na biomassa vegetal (Verbruggen et al., 2012). Em nenhum dos tipos de cobertura vegetal o solo atingiu valores superiores a $1,75 \text{ g cm}^{-3}$, considerado por Reichert et al. (2003) como limite de adensamento. Esses autores propuseram valores de densidade do solo considerada crítica para algumas classes texturais ($1,30 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos, $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ para os franco-argilosos e de $1,70$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ para os franco-arenosos).

Estoques de C

Os estoques de C no solo em diferentes ambientes edafoclimáticos variam de acordo com o uso e manejo, textura e mineralogia de solo, além do efeito do tempo de estabilização (Lorenz & Lal, 2018). O fato de não ter ocorrido diferença no estoque acumulado de C no solo na profundidade de 0 cm a 100 cm entre os sistemas de uso (Tabela 2), bem como entre seus componentes, sugere

que os sistemas têm contribuído igualmente ao acúmulo de C e na redução das emissões de GEE, especialmente de CO₂. No entanto, a perda de carbono ocorrida, principalmente, nas camadas superficiais indicou que as mudanças de uso do solo e as práticas de manejo adotadas historicamente refletiram nas perdas de C quantificadas no solo da P e do sistema IPF, quando comparados ao sistema nativo, exercendo o papel de fonte de CO₂. Guo & Gifford (2002) indicaram que o estoque de carbono no solo sofreu redução de 10%, 13%, 42% e 59%, quando o uso do solo foi convertido de pastagem para lavouras, floresta nativa para floresta plantada, floresta nativa para lavoura e pastagem para lavoura. Do mesmo modo, Silva et al. (2020) demonstraram que até a profundidade de 30 cm, tanto o solo da pastagem convencional como o do sistema silvipastoril sofreram redução no estoque de carbono total, em relação ao solo sob cerrado nativo, de 44% e 37%, respectivamente.

Confrontando os sistemas de uso do solo e as suas conversões, na profundidade de 0 cm a 30 cm, o solo da P perdeu 5,4 Mg C ha⁻¹ em relação a FN no período de 59 anos, enquanto o solo da IPF perdeu 6,7 Mg C ha⁻¹, em relação a P em 5 anos. As conversões de uso representaram taxas de perdas de 0,091 e de 1,34 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Então, analisando somente o compartimento solo, isto pode comprometer não só o papel mitigador desses sistemas frente às alterações do clima, mas a produtividade e a sustentabilidade dos mesmos em longo prazo.

O estoque acumulado de C no solo do IPF na profundidade de 0 cm a 30 cm foi significativamente menor do que no solo da P, sendo que as duas áreas foram utilizadas com pastagens, até o momento em que o sistema IPF foi implantado. Segundo Fidalski (1999), na região do Arenito Caiuá, após o cultivo de mandioca em sucessão à pastagem, é esperado um decréscimo nos teores de C no solo, devido ao revolvimento e exposição do solo para o cultivo da lavoura, resultando em oxidação da matéria orgânica e liberação de N. Nesse mesmo estudo, o autor registrou decréscimos entre 17% e 21% nos teores médios de C no solo após o cultivo de mandioca em solos derivados do arenito Caiuá. Portanto, o processo utilizado para a conversão da área de pastagem para IPF, com revolvimento do solo, calagem, fosfatagem e gessagem, mas sem fonte de N, certamente contribuiu para os menores estoques de C nesse sistema.

Pastagens cultivadas de maneira apropriada protegem o solo, por meio da biomassa e pela remoção de carbono atmosférico, estocando-o no solo devido à produção e decomposição das raízes, até profundidades superiores a 2 m, o que promove efeito positivo na estruturação dos solos (Salton & Tomazi, 2014; Embrapa, 2018). Rangel & Silva (2007) observaram que pastagem aos 12 anos de implantação apresentou estoque de C acumulado até 40 cm, similar ao da floresta nativa. Isto pode ser devido à menor intensidade de preparo do solo, o que predispõe um melhor crescimento, distribuição e manutenção de raízes, com conseqüente incremento de carbono.

Em geral, as pastagens apresentam distribuição não regular do sistema radicular até um metro de profundidade, com mais de 50% do volume de raízes na camada de 0-20 cm e apenas 12,4% entre 40 cm e 100 cm (Teixeira & Bastos, 1989). Para Conceição et al. (2017), o sistema radicular de braquiária, quando bem manejado, é profundo e bem distribuído e tem potencial para aumentar a quantidade de matéria orgânica em profundidade (Loss et al., 2012; Bieluczyk et al., 2017). De fato, pastagens bem formadas e manejadas adequadamente, quando comparadas a cultivos com revolvimento de solos ou pastagens de baixa produtividade, podem acumular C no solo (Salton & Tomazi, 2014; Embrapa, 2018). Alguns estudos demonstram que ocorre diferença nas taxas de acúmulo anual de C no solo pelas pastagens, variando de 0,1 a 1,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Sá et al., 2017; Lorenz & Lal, 2018), pois os incrementos dependem das características do solo e clima, das condições de manejo da pastagem, e do tempo decorrido. Na pastagem de grama porto-rico avaliada, esse efeito não foi percebido.

Alguns aspectos podem contribuir para explicar o menor desempenho da pastagem no sistema IPF, como a idade da pastagem, que é 2 anos mais nova do que no tratamento da P, e o sombreamento parcial causado pelo eucalipto. Ambos os fatores podem impactar a produção de biomassa da pastagem de grama porto-rico e a produção primária líquida da parte aérea e de raízes, refletindo nos menores estoques acumulados de C no solo na superfície, em comparação com a P. O sombreamento diminui a radiação fotossintética ativa incidente e provoca menor crescimento das pastagens (Paciullo et al., 2010; Pezzopane et al., 2017; Bieluczyk, 2018). Macedo et al. (2015), comparando sistemas ILP e ILPF aos seis anos, reportaram impacto no acúmulo de C no solo devido à competição por luz, água e nutrientes, com as árvores.

Adicionalmente, a grama porto-rico é pouco tolerante ao sombreamento (Andrade et al., 2009) e exigente em N para alto potencial de produção de biomassa (Taliaferro et al., 2004; Vendramini & Mislevy, 2006; Andrade et al., 2009). Segundo Oliveira & Souto (2001), essa espécie tolera até 25% de sombreamento sem prejuízo na produção de biomassa. Contudo, a grama porto-rico não é a única a sofrer pelo sombreamento. Franchini et al. (2015), avaliando um sistema integrado aos 3 anos, observaram que as árvores de *Eucalyptus urograndis*, em densidades de 272, 443 e 572 árvores ha⁻¹, em fileiras simples, duplas e triplas, respectivamente, interferiram expressivamente na produtividade de *Urochloa* sp., indicando a necessidade de redução do número de árvores por área. Bieluczyk (2018) também percebeu que *E. urograndis* com 4 anos em espaçamento de 15 m x 2 m, limitou o desenvolvimento radicular de braquiária, principalmente nas proximidades das árvores. Práticas silviculturais como a desrama e o desbaste podem reduzir o sombreamento sobre a pastagem e melhorar a relação árvores e pastagem (Porfirio-da-Silva et al., 2009; Santarosa & Oliveira, 2014), ajustando-se a distância de renques, visando favorecer a produção da pastagem até o primeiro desbaste (5-6 anos). Assim, a produção das pastagens é mantida e, conseqüentemente, reflete nos estoques de C do solo.

Em subsuperfície, embora não tenha ocorrido diferença estatística entre os estoques de C na profundidade de 30 cm a 100 cm, os valores mostram uma tendência do solo do IPF apresentar maior estoque acumulado de C nesta profundidade do que na P. O sistema IPF, concentrou os acúmulos na camada abaixo de 30 cm. Aproximadamente 65% do acúmulo de C do IPF ocorreu na camada de 30 cm e 100 cm, enquanto P e FN têm acúmulos da ordem de 52% a 56% em subsuperfície. Essas diferenças de acúmulo de C na superfície e em subsuperfície podem ser explicadas pelo efeito combinado das plantas nos sistemas. No solo do PE, devido ao menor volume de raízes da grama porto-rico, provavelmente em função do sombreamento pelo eucalipto e menor produção de biomassa, ocorreu menor estoque de C acumulado no solo na profundidade de 0 cm a 30 cm no sistema IPF. Porém, no solo do LE o estoque nas camadas de 60 cm a 100 cm foi maior, sugerindo um maior potencial de armazenar C em profundidade do que os demais sistemas (Tabela 2). Estes dados sugerem a maior capacidade do sistema silvipastoril de aportar mais C em profundidade do que a pastagem convencional.

Apesar dos menores valores absolutos, a estratégia de alocar o C em camadas mais profundas do solo é um aspecto positivo dos sistemas IPF, uma vez que o C alocado em subsuperfície tem menor possibilidade de ser perdido como CO₂ para a atmosfera.

Isto pode ser corroborado pelo estudo de Favoretto (2007), que observou que na profundidade de 40 cm a 60 cm a matéria orgânica presente no solo apresenta maior grau de humificação, ou seja, maior estabilidade em comparação com as camadas mais superficiais.

Laclau et al. (2013) colocam que, por meio de exsudatos e decomposição radicular, o eucalipto pode armazenar C em profundidades maiores do que 40 cm, o que contribui para justificar o maior estoque em profundidade no solo do LE e a tendência de maior estoque acumulado e maior proporção do C, na profundidade de 30 cm a 100 cm do IPF. Entre os motivos que podem ser destacados para essa tendência está a dinâmica das raízes do sistema IPF. Bieluczyk (2018) registrou maior comprimento total acumulado de raízes até 70 cm, em sistema iLPF com *E. urograndis* do que em pastagem extensiva.

Outra característica do eucalipto que pode facilitar o acúmulo em subsuperfície é a maior relação C:N das raízes de eucalipto, com maior resistência à decomposição do que as raízes das pastagens, possivelmente promovendo maior coeficiente de humificação (Mendham et al., 2004; Pulrolnik et al., 2009; Bieluczyk, 2018). Raízes finas de eucalipto são mais difíceis de decompor do que as de braquiária (C:N 71:1), em função de sua alta relação C:N (103:1) e elevada concentração de lignina e de celulose (McCormack et al., 2015; Freschet & Roumet, 2017; Bieluczyk, 2018). Além disso, raízes finas de *E. grandis* se desenvolvem até a profundidade de 3 m, em solo com textura média, e apresentam maior diâmetro (Bordron, et al., 2019). A presença de árvores implica na exploração do solo por raízes mais profundas (Cardinael et al., 2015). As afirmações destes autores estão de acordo com a hipótese de que o maior estoque de C no solo na camada de 80 cm a 100 cm, do LE (Tabela 2) pode estar relacionado à contribuição de raízes de eucalipto.

Ainda, com relação às alterações provocadas pela presença das árvores no sistema, inclui-se o fato de *E. urograndis* absorver grande quantidade de nutrientes (Bieluczyk, 2018), revelando seu alto poder de competição com as pastagens, por água, luz e nutrientes, como observado por Macedo et al. (2015).

Finalmente, o acúmulo de C em subsuperfície é benéfico em termos de mudanças do clima, considerando que o C estocado em profundidade estaria mais protegido do que aquele concentrado nas camadas mais superficiais. Além disso, a elevação do estoque de C no solo contribui para elevar a sua capacidade de retenção de água, o que é uma alternativa para suportar as estiagens, principalmente para solos de textura arenosa a média.

O estudo de Van Zwieten et al. (2010) confirma a ação do carbono na elevação do potencial hídrico do solo, ao afirmar que a disponibilidade de água na rizosfera é maior em solos que receberam biochar, o qual eleva a quantidade de carbono no solo. Sistemas conservacionistas incorporam no solo grande quantidade de resíduos orgânicos (Silva, 2017), os quais são responsáveis pela retenção da água prontamente disponível para as plantas (Carducci et al., 2015). Dou et al. (2016) relataram que solos arenosos, por possuírem menor quantidade de matéria orgânica, apresentam menor quantidade de água disponível para as culturas. Klein et al. (2010) também registraram um incremento do teor de água com o aumento do teor de argila.

Estratégias para aumentar a quantidade de C no solo, tanto nas camadas superficiais, como nas mais profundas, são importantíssimas tanto no sistema P como no sistema IPF, para que haja maior capacidade de contribuição à mitigação e a adaptação dos sistemas produtivos à mudança no clima.

Os sistemas agroflorestais contribuem para a mitigação dos gases de efeito estufa, desempenhando um importante papel na redução das emissões (Torres, 2015), no sequestro de carbono nos solos e nas árvores (Pulrolnik et al., 2015), e na mitigação das mudanças climáticas globais (Müller et al., 2009). Silva et al. (2021) observaram que as emissões de metano pelo gado foram neutralizadas pela fixação do CO₂ eq no fuste das árvores de eucalipto, também em sistema integração pecuária-floresta.

Estoques de N

Segundo Camargo et al. (1999), mais de 95% do N total do solo provém da matéria orgânica e está ligado a compostos orgânicos com C na sua estrutura (Pulrolnik et al., 2009), de modo que os fatores que afetam o C, muito provavelmente tenham efeito também sobre os estoques de N, em especial se a matéria orgânica do solo sofrer oxidação por revolvimento do solo, por exemplo.

O solo do IPF apresentou os menores estoques acumulados de N na camada de 0-30 cm (Tabela 3), tendo ocorrido o mesmo com ambos os componentes do sistema IPF (PE e LE). Provavelmente, o maior tempo sem distúrbios (7 anos sem revolvimento) no solo da P do que no da PE (3 anos sem revolvimento), a menor decomposição das raízes do eucalipto, a absorção de N pelas raízes mais superficiais do eucalipto (Bordron et al., 2019), a maior relação C:N (Mendham et al., 2004; Pulrolnik et al., 2009; Bieluczyk, 2018) do solo do LE do que no solo da P, explicam essas diferenças.

Pegoraro et al. (2011) encontraram maior estoque de N total na profundidade de 20 cm a 40 cm, em Argissolo Amarelo sob pastagem de *U. brizantha* do que sob *E. urograndis*. De forma semelhante, o reduzido teor de N no solo observado nesse trabalho pode ser decorrente da menor taxa de decomposição das raízes de eucalipto em comparação às pastagens (Mendham et al., 2004; Pulrolnik et al., 2009), devido à menor relação C:N das raízes das pastagens (Bieluczyk, 2018). Adicionalmente, o menor estoque de N no solo da IPF pode ser justificado pela adição de material rico em celulose e lignina (Barreto et al., 2014; Conceição et al., 2017), proveniente do eucalipto, fornecendo menos N.

O fato da grama porto-rico absorver considerável quantidade de N (Taliaferro et al., 2004), que retorna ao solo por meio da decomposição e/ou excretas animais, aliado ao fato de o solo da área da P não ter sido revolvido ao longo de 7 anos, contribui para justificar o maior estoque de N no solo da P. O mesmo resultado não foi observado na PE, onde o solo não passou por revolvimento nos últimos três anos, depois de ter sido revolvido e cultivado com mandioca por dois anos. Pulrolnik et al. (2009) observaram maiores teores de N no solo das pastagens (8,04 Mg ha⁻¹) do que no de plantio de *E. urophylla* (7,05 Mg ha⁻¹), com relação C:N de 18 e 23, respectivamente. Os autores atribuíram as diferenças nos estoques de N à rápida decomposição das raízes das pastagens. A ausência de sombreamento na P e a idade maior em 4 anos, ou seja, o fato deste sistema ter sido formado há mais tempo, também pode ter contribuído para maior taxa de produção e reciclagem dos resíduos vegetais, contribuindo aos maiores estoques de N no solo, sendo observado na camada de 0 cm a 100 cm 13% mais N do que no solo da FN.

Embora o sistema IPF tenha apresentado menores estoques de C na camada de 0 cm a 30 cm, e de N nas camadas de 0 cm a 30 cm e de 0 cm a 100 cm, do que o

sistema P, ele em si é viável tecnicamente, mas precisa de ajustes para garantir a sustentabilidade e a contribuição ao enfrentamento das mudanças do clima, com absorção de CO₂ pelas árvores, e pelo armazenamento de C no solo, na forma de matéria orgânica do solo.

A adoção de um protocolo adequado de manejo de pastagens, com adubação nitrogenada de reposição/manutenção, aliado a práticas silviculturais no IPF para regular o grau de sombreamento, podem contribuir para o aumento da produtividade primária líquida das pastagens e, portanto, incrementar o aporte de C e o estoque de matéria orgânica nas camadas superficiais e mais profundas do solo.

Conclusões

Os sistemas produtivos de integração pecuária-floresta (IPF) e pastagem convencional (P) necessitam de medidas adicionais de manejo, para potencializar o acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, pois ficou evidente a redução desses elementos em relação à Floresta Estacional Semidecidual (FN).

Na pastagem convencional, o estoque de C no solo foi menor que na floresta nativa, mas por outro lado, o estoque de N foi equivalente. O sistema IPF apresentou menores estoques de C e N na camada de 0 a 30 cm em relação a pastagem convencional, porém em subsuperfície, o sistema IPF apresentou acúmulo de C, apesar do menor estoque de N.

Medidas adequadas de manejo com relação à reposição de nutrientes, principalmente de N, e a implementação de um protocolo adequado de manejo da pastagem e de melhores práticas silviculturais no IPF para reduzir o grau de sombreamento, podem contribuir ao aumento da produtividade primária líquida da pastagem e ao aporte de carbono no solo e, conseqüentemente, impactar positivamente o estoque de matéria orgânica, contribuindo para a regulação do clima global e a sustentabilidade do sistema produtivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Agropecuária Japema Ltda pela parceria no projeto (SAIC nº 21500.18/0013); à Embrapa pelo suporte financeiro (SEG 03.13.11.004.03.007).

Referências

- Andrade, C. M. S. et al. **Gramma-estrela-roxa**: gramínea forrageira para diversificação de pastagem no Acre. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2009. 83 p.
- Balbino, L. C. et al. **Marco referencial**: integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Brasília, DF: Embrapa, 2011.
- Barreto, P. A. B. et al. Carbono das frações da matéria orgânica em solos sob plantações de eucalipto de diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 581-590, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.003>.
- Battle-Bayer, L. et al. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: a review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 37, p. 47-58, 2010.
- Bieluczyk, W. **Crescimento e decomposição de raízes finas e qualidade do solo sob sistemas integrados de agricultura, pecuária e floresta (São Carlos - SP)**. 2018. 153 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Bieluczyk, W. et al. Soil carbon and nitrogen stocks, light organic matter, and remaining phosphorus under a crop-livestock integration system. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 1825-1840, 2017.
- Bordron, B. et al. Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young *Eucalyptus grandis* trees. **Forest Ecology and Management**, v. 431, p. 6-16, 2019.
- Camargo, F. A. C. et al. Nitrogênio orgânico do solo. In: Santos, G. A. & Camargo, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 117-137.
- Cantarutti, R. B. et al. Impacto animal sobre o solo: compactação e reciclagem de nutrientes. In: Mattos, W. R. S. (ed.). **A produção animal na visão dos brasileiros**. Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 826-837.
- Cardinael, R. et al. Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. **Plant and Soil**, v. 391, n. 1-2, p. 219-235, 2015.
- Cardoso, E. L. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 9, p. 1028-1035, 2010.
- Carducci, C. E. et al. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 3, p. 284-291, 2015.
- Cassol, L. C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Cerri, C. E. P. et al. Dinâmica da matéria orgânica do solo na Amazônia. In: Santos, G. de A. et al. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 325-358.
- Conceição, M. C. G. et al. Avaliação do estoque de carbono do solo em diferentes tipos de manejo. In: XVI Congresso Brasileiro de Geoquímica, 16., 2017, Armação dos Búzios. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 2017. p. 129.

- Costa, O. V. et al. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de Tabuleiro Costeiro no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.1137-1145, 2009.
- Dias Filho, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. 3. ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 190 p.
- Dou, F. et al. Soil Texture and cultivar effects on rice (*Oryza sativa*, L.) grain yield, yield components and water productivity in three water regimes. **PlosOne**, v. 11, p. 1-12, 2016.
- Embrapa. **Braquiária muito além da alimentação animal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/busca-de-noticias/-/noticia/31795514/braquiaria-muito-alem-da-alimentacao-animal?p_auth=YxMkprRJ. Acesso em: 30 maio 2020.
- Embrapa. **Integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.cpa.embrapa.br:8080/embrapa/transferencia-detechnologia/vantagens-da-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-no-am-sao-apresentadas>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- Favoretto, C. M. **Caracterização da matéria orgânica humificada de um latossolo vermelho distrófico através da espectroscopia de fluorescência induzida por laser**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.
- Fidalski, J. Respostas da mandioca à adubação NPK e calagem em solos arenosos do noroeste do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 8, p. 1353-1359, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000800005>.
- Franchini, J. C. et al. Integração lavoura-pecuária-floresta como estratégia para aumentar a produtividade e prover serviços ambientais no noroeste do Paraná. Parron, L. M. et al. (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 266-270.
- Freschet, G. T. & Roumet, C. Sampling roots to capture plant and soil functions. **Functional Ecology**, v. 31, n. 8, p. 1506-1518, 2017.
- Groppo, J. D. et al. Changes in soil carbon, nitrogen and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, n. 15, p. 4765-4780, 2015.
- Guo, L. B. & Gifford, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002.
- Higa, R. C. V. et al. Plantações florestais comerciais e a mitigação na mudança do clima. In: Oliveira, Y. M. M. de & Oliveira, E. B. de (ed.). **Plantações florestais**: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 67-112.
- Klein, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010.
- Laclau, J. P. et al. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1-12, 2013.
- Lal, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, p. 242-258, 2005.
- Lorenz, K. & Lal, R. Carbon sequestration in grassland soils. In: _____ & _____. **Carbon sequestration in agricultural ecosystems**. Cham: Springer, 2018. p. 175-209.
- Loss, A. et al. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 50, p. 685-693, 2012.
- Macedo, M. C. M. et al. CLFIS: an overview of the Brazilian experience. In: World Congress on Integrated Crop-Livestock-Forest System, 1; International Symposium on Integrated Crop-Livestock Systems, 3., 2015, Brasília, DF. **Proceedings [...]**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 33.
- Mccormack, M. L. et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytologist**, v. 207, n. 3, p. 505-518, 2015.
- Mendham, D. S. et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. **Soil Biology and Biochemical**, v. 36, n. 1, p. 1067-1074, 2004.
- Müller, M. D. et al. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 60, p. 1117, 2009.
- Neves, C. M. N. et al. Estoque de carbono em sistemas agrossilvipastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 5, p. 1038-1046, 2004.
- Oliveira, F. L. & Souto, S. M. Efeito do sombreamento no crescimento inicial de gramíneas forrageiras tropicais. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 7, n. 2, p. 221-226, 2001.
- Oliveira, J. M. et al. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the Southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 1, p. 105-116, 2018.
- Ong, C. K. H. et al. (ed.). **Tree-Crop Interactions**: in a changing climate. Wallingford: CAB International, 2015. 358 p.
- Ostle, N. J. et al. Land and use and soil carbon sequestration. **Land Use Policy**, v. 26, p. 274-283, 2009.
- Paciullo, D. S. C. et al. Soil bulk density and biomass partitioning of *Brachiaria decumbens* in a silvopastoral system. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 5, p. 598-603, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000500014>.
- Palm, C. et al. Conservation agriculture and ecosystem service: an overview. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 187, p. 87-105, 2014.
- Parron, L. M. et al. Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. In: Parron, L. M. et al. (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 92-100.
- Pegoraro, R. F. et al. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 261-273, 2011.
- Pezzopane, J. R. M. et al. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 1, p. 1-11, 2017.
- Piva, J. T. **Fluxo de gases de efeito estufa e estoque de carbono do solo em sistemas integrados de produção no sub trópico brasileiro**. 2012. 96 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- Porfírio-da-Silva, V. et al. **Arborização de pastagens com espécies florestais madeireiras**: implantação e manejo. Colombo: Embrapa Florestas, 2009. 48 p.
- Porfírio-da-Silva, V. et al. O conforto térmico animal em pastagem arborizada. In: Congresso Brasileiro de Biometeorologia, 3., 2001, Maringá. **Anais [...]**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2001. 1 CD-ROM.
- Post, M. et al. **Development of chemical sensors for monitoring environmental emissions**. Montreal: Canadian Institute Mining, Metallurgy and Petroleum, 2000.
- Pulrolnik, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1125-1136, 2009.
- Pulrolnik, K. et al. Soil carbon stocks in integrated crop-livestock-forest and integrated crop-livestock systems in the Cerrado region. In: World Congress on Integrated Crop-Livestockforest System, 1.; International Symposium on Integrated Croplivestock Systems, 3., 2015, Brasília, DF. **Proceedings...** Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 314
- Pulrolnik, K. O estoque de carbono no solo em floresta de eucalipto e iLPF. In: **Revista Opiniões**, v. 13, n. 43, 2016.
- Rangel, O. J. P. & Silva, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1609-1623, 2007.
- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 jun. 2019.
- Reichert, J. M. et al. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.
- Sá, J. C. de M. et al. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017.
- Sacramento, J. A. A. S. et al. Estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas agrícolas tradicional e agroflorestais no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 784-795, 2013.
- Salton, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.
- Salton, J. C. & Tomazi, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 5 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 198).
- Sanderson, M. A. et al. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: outcomes from pasture and integrated crop-livestock systems. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 28, n. 2, p. 129-144, 2013.
- Santana, E. A. R. et al. Padrão de deslocamento de bovinos nelore em sistemas integrados de produção agropecuária. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 71, n. 1, p. 353-356, 2019.
- Santarosa, E. & Oliveira, E. B. Tratos culturais: desrama e desbaste. In: Santarosa, E. et al. (ed.). **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 61-74.
- Santos, J. M. F. **Desempenho produtivo e comportamento ingestivo de novilhas angus x nelore em sistemas integrados de produção agropecuária**. 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) - Universidade Estadual Paulista, Dracena.
- Silva, A. R. et al. Estoque de carbono e mitigação de metano produzido por bovinos em sistema integração pecuária-floresta (IPF) com eucalipto no Sudeste Paraense. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39997-40016, 2021.
- Silva, E. A. **Propriedades físico-hídricas do solo e desenvolvimento radicular do cafeeiro**. 2017. 110 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Silva, J. R. M. et al. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 15, n. 2, e6874, 2020.
- Sisti, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, p. 39-58, 2004.
- Spera, S. T. et al. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 533-542, 2004.
- Stavi, I. & Lal, R. Agriculture and greenhouse gases, a common tragedy: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 2, p. 275-289, 2013.
- Taliaferro, C. M. et al. Bermuda grass and star grass. In: Moser, L. et al. (ed.). **Warm season (C4) grasses**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 2004. p. 417-475.
- Teixeira, L. B. & Bastos, J. B. **Matéria orgânica nos ecossistemas de floresta primária e pastagem na Amazônia Central**. Belém: Embrapa CPATU, 1989. 26 p. (Embrapa CPATU. Boletim de pesquisa, 99).
- Torres, C. M. M. E. **Estocagem de carbono e inventário de gases de efeito estufa em sistemas agroflorestais**. 2015. 83 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Van Zwieten, L. et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant Soil**, v. 327, p. 235-246, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>.
- Varella, A. C. et al. Silvopastoral Systems in the Cold Zone of Brazil. In: Peri, P. L. et al. (ed.). **Silvopastoral systems in Southern South America**. [Cham]: Springer International Publishing Switzerland, 2016. p. 231-27. (Advances in agroforestry, 11).
- Vendramini, J. & Mislevy, P. **Stargrass**. Gainesville: University of Florida, 2006. (University of Florida. IFAS Extension SS-AGR-62). Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu/AG154>. Acesso em: 5 jun. 2009.
- Verbruggen, E. et al. Provision of contrasting ecosystem services by soil communities from different agricultural fields. **Plant and Soil**, v. 350, p. 43-55, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0828-5>.