

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**Jaqueline de Cássia de Oliveira**

**Intensificação do uso da terra com sistemas integrados de produção agropecuária- efeito das modalidades e dos arranjos na ciclagem de nutrientes e estoques de carbono do solo**

**Montes Claros**

**2024**

**Jaqueline de Cássia de Oliveira**

**Intensificação do uso da terra com sistemas integrados de produção agropecuária: efeito das modalidades e dos arranjos na ciclagem de nutrientes e estoques de carbono do solo**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal.

**Orientadora:** Leidivan Almeida Frazão

**Coorientador:** Miguel Marques Gontijo Neto

Montes Claros

2024

Oliveira, Jaqueline de Cássia.

O48i  
2024 Intensificação do uso da terra com sistemas integrados de produção agropecuária: efeito das modalidades e dos arranjos na ciclagem de nutrientes e estoques de carbono do solo [manuscrito] / Jaqueline de Cássia de Oliveira. Montes Claros, 2024.  
116 f.: il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Elaine Cristina Teixeira, Luiz Arnaldo Fernandes, Maria das Dores Magalhães Veloso, Maria Nilfa de Almeida Neta e Miguel Marques Gontijo Neto.

Inclui referências: f. 27-34; 61-65; 96-99.

1. Solos - Teor de carbono - Teses. 2. Mudanças Climáticas - Teses. 3. Solos - Qualidade - Teses. I. Frazão, Leidivan Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

## ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 29 dias do mês de maio de 2024 às 13:30 horas, sob a Presidência da Professora Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (Orientadora – ICA/UFMG) e com a participação da(o)s Professora(e)s Elaine Cristina Teixeira, D. Sc. (UFJS), Maria das Dores Magalhães Veloso, D. Sc. (Unimontes), Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (ICA/UFMG), e dos Pesquisadores Miguel Marques Gontijo Neto, D. Sc. (Coorientador - Embrapa/Milho e Sorgo) e Maria Nilfa de Almeida Neta, D. Sc. (ICA/UFMG), reuniu-se, presencialmente, a Banca de tese de Jaqueline de Cássia de Oliveira, aluna do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: “Intensificação do uso da terra com sistemas integrados de produção agropecuária: efeito das modalidades e dos arranjos na fertilidade e estoques de carbono do solo”, senda a aluna considerada aprovada. E, para constar, eu, Professora Leidivan Almeida Frazão, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do **ARTIGO 65** do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

**Art. 65 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.**

Montes Claros, 29 de maio de 2024.

Documento assinado digitalmente  
 **ELAINE CRISTINA TEIXEIRA**  
 Data: 03/06/2024 11:01:23-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Elaine Cristina Teixeira  
 Membro

Documento assinado digitalmente  
 **MARIA DAS DORES MAGALHÃES VELOSO**  
 Data: 02/06/2024 19:14:02-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Maria das Dores Magalhães Veloso  
 Membro

Documento assinado digitalmente  
 **MIGUEL MARQUES GONTIJO NETO**  
 Data: 03/06/2024 10:38:49-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Miguel Marques Gontijo Neto  
 Coorientador

Documento assinado digitalmente  
 **LUIZ ARNALDO FERNANDES**  
 Data: 03/06/2024 11:51:04-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Luiz Arnaldo Fernandes  
 Membro

Documento assinado digitalmente  
 **MARIA NILFA DE ALMEIDA NETA**  
 Data: 03/06/2024 18:38:49-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Maria Nilfa de Almeida Neta  
 Membro

Documento assinado digitalmente  
 **LEIDIVAN ALMEIDA FRAZÃO**  
 Data: 03/06/2024 09:50:27-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Leidivan Almeida Frazão  
 Orientadora

**Jaqueline de Cássia de Oliveira**

**INTENSIFICAÇÃO DO USO DA TERRA COM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: EFEITO DAS MODALIDADES E DOS ARRANJOS NA CICLAGEM DE NUTRIENTES E ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO**

Aprovado pela banca examinadora constituída pelos professores:

Elaine Cristina Teixeira  
Professora- UFJS

Luiz Arnaldo Fernandes  
Professor- ICA/UFMG

Maria das Dores Magalhães Veloso  
Professora- Unimontes

Maria Nilfa de Almeida Neta  
Pós-doutoranda- ICA/UFMG

Miguel Marques Gontijo Neto  
Coorientador - Embrapa Milho e Sorgo



---

Leidivan Almeida Frazão  
Orientadora – ICA/UFMG

Montes Claros, 10 de dezembro de 2024.

*Dedico esta conquista aos meus pais José Edvaldo de Oliveira e Lindaura Veloso Cardoso que, apesar das dificuldades, nunca permitiram que eu desistisse, sendo sempre o meu incentivo e inspiração. Aos meus irmãos, Liliane e Mauro, meus cunhados Késsia e Vinícius que sempre me apoiaram. Aos meus sobrinhos Enzo Miguel, Ísis Rafaela e Melinda Vitória por serem minha alegria. À minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado me dando forças, carinho e compreensão.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois, sem Ele, nada nesta vida seria possível, nem faria sentido, Ele que sempre me deu forças para que este trabalho se tornasse realidade. À Virgem Maria que sempre se mostrou minha fiel intercessora, em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

À minha família, que sempre me apoiou com todo o carinho e, nos momentos mais difíceis, foi minha salvação, especialmente, a meus pais Edvaldo e Lindaura, a meus irmãos Liliane e Mauro, a meus cunhados Késsia e Vinícius, meu sobrinho Enzo Miguel, minhas sobrinhas Ísis e Melinda que ainda não nasceram, mas já são fonte de inspiração e aos meus avós Vicente, Herminda e Diolina.

Aos meus tios, primos, afilhados, que sempre me apoiaram e estiveram em oração para que este desafio fosse finalizado.

Aos meus amigos que estiveram sempre ao meu lado, especialmente, à Cynthia, Ana Clara, Yane, Maíra e Deborah que sempre ouviram meus desabafos e medos. E aos irmãos da Obra Missionária Hessed, por todo o apoio espiritual, companherismo e partilha nos últimos anos, a presença de vocês é alívio para os meus fardos.

Aos meus orientadores, Profa. Dra. Leidivan e Miguel, por toda a paciência, compreensão, empenho e conhecimento compartilhado e dedicado à minha formação profissional e pessoal durante a execução desta pesquisa.

Aos meus amigos do Grupo de estudo ILPF, Marcos, Warley, João Gabriel, Alissam, Nicson, Alex, Stefany, Paulo, Bruna, Matheus. E, de maneira especial, a Igor, Juliana, Evander. Obrigada por terem tornado esta caminhada mais tranquila e por todo o auxílio.

Ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais – ICA/UFMG, por possibilitar a realização desta pós-graduação.

Aos professores e pesquisadores da banca examinadora, pela participação e por todas as contribuições prestadas.

A todos os professores do Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da UFMG, pelos ensinamentos compartilhados.

À Bayer, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À Fazenda da Barra em Francisco Sá, à Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas e à Fazenda Experimental do Moura/UFVJM em Curvelo, pela concessão das áreas para a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES/Brasil, pela concessão de bolsa de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Às pessoas que de alguma forma me ajudaram a realizar este sonho, seja com uma palavra, um sorriso, uma crítica, um conselho, mas que fizeram a diferença em minha vida.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Deus abençoe a cada um de vocês!

*“Que servirá a um homem ganhar o mundo inteiro, se vem a perder sua alma?”. “Portanto, quer comais, quer bebais, ou façais qualquer outra coisa, fazei tudo para a glória de Deus”.*

*(Mateus 16, 26; I Coríntios 11,31).*

## **Intensificação do uso da terra com sistemas integrados de produção agropecuária: efeito das modalidades e dos arranjos na ciclagem de nutrientes e estoques de carbono do solo**

### **RESUMO**

A diversidade de componentes e arranjos possíveis, para a implantação de sistemas agrossilvipastoris, potencializa o armazenamento de carbono (C), na biomassa vegetal da pastagem, das culturas anuais e das árvores, podendo mitigar as emissões de gases de efeito estufa e aumentar os estoques de C no solo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os teores e estoques de carbono e nitrogênio, a dinâmica da serapilheira e a fertilidade do solo, após a conversão de pastagem de baixa produtividade em sistemas agrossilvipastoris implantados, em três mesorregiões do Estado de Minas Gerais. Foi avaliado um experimento localizado no município de Francisco Sá, em Cambissolo Háplico eutrófico, composto por sistema silvipastoril, com capim-marandu e Eucalipto urograndis, com nove anos de idade, pastagem nominal e vegetação nativa (área de referência). Em Curvelo foi avaliado um experimento, em Latossolo Vermelho, composto por sistema agrossilvipastoril com sete anos de idade, pastagem nominal, pastagem manejada e vegetação nativa (área de referência). Em Sete Lagoas foi avaliado um experimento, em Latossolo Vermelho, composto por três sistemas agrossilvipastoris com treze, onze e nove anos de implantação, sistema agropastoril com treze anos, pastagem manejada e vegetação nativa (área de referência). Para as amostragens nos sistemas com o componente arbóreo, foram selecionados três pontos, em função da distância dos renques de eucalipto, sendo o primeiro na linha de plantio das árvores de eucalipto (P1), o segundo a 3,0 m de distância da árvore (P2) e o terceiro no centro da aleia (P3). A dinâmica da serapilheira do eucalipto, no sistema integrado de produção agropecuária, foi avaliada na área de Francisco Sá, por meio de coletas mensais de serapilheira produzida e decomposta, ao longo de um ano. Amostras de solo foram coletadas, até 100 cm, com exceção da área de Francisco Sá, cuja coleta no Cambissolo Háplico foi possível apenas até a profundidade de 50 cm. Avaliaram-se a densidade, fertilidade e teores e estoques de C e nitrogênio (N) do solo. Em Francisco Sá (Artigo 1), as taxas de decomposição da serapilheira diferiram de acordo com a distância das linhas de árvores de eucalipto. O efluxo de CO<sub>2</sub> foi influenciado pela época de avaliação. Maiores valores ocorreram entre os meses de novembro a fevereiro, no período chuvoso, para todos os tratamentos, e o P1 foi estatisticamente igual à vegetação nativa (VN), o que teve correlação direta com a decomposição da serapilheira, acelerando o processo por elevar a umidade com maior atividade microbiana próximo às árvores do eucalipto. As maiores intensidades luminosas resultaram em maior decomposição da serapilheira de eucalipto e com maiores efluxos de CO<sub>2</sub>. Em relação aos teores de nutrientes, a VN apresentou maiores valores de Ca, Mg, CTC efetiva e V%, resultado atribuído à falta de reposição de nutrientes nos ambientes cultivados e a maior eficiência na ciclagem de nutrientes na VN. Os estoques de C e N, na camada de 0-50 cm de profundidade, foram maiores na VN e não diferiram entre o sistema silvipastoril e a pastagem nominal. Em Curvelo (Artigo 2), a VN apresentou maiores valores para os atributos K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e C, enquanto, no sistema agrossilvipastoril, foram observados valores intermediários para K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e C. Os estoques de C dos diferentes usos da terra não diferiram entre si, em todas as profundidades avaliadas, e a VN foi superior aos demais. Em Sete Lagoas (Artigo 2), os maiores valores de pH, K, Ca, Mg, SB, CTC e V foram observados, na pastagem manejada e P e Ds (densidade do solo) apresentaram maiores valores no sistema agropastoril, valores intermediários nos sistemas

agrossilvipastoril e pastagem manejada e baixos valores em VN. A pastagem manejada apresentou estoques de C iguais a VN e ao sistema agrossilvipastoril com treze anos, se diferenciando dos demais usos até 30 cm. Já nos perfis de 0-50 e 0-100 cm, a pastagem manejada e os sistema agrossilvipastoril com treze anos apresentaram estoques de C superiores a VN. O sistema agropastoril obteve os menores estoques nos perfis de 0-30, 0-50 e 0-100 cm de profundidade. Os estoques de N não diferiram entre os usos pastagem manejada e VN, e estes sistemas apresentaram os maiores valores em relação aos demais sistemas avaliados. Os sistemas agrossilvipastoris são promissores, em estocar carbono no perfil do solo, podendo superar os estoques de C e N da vegetação nativa. Sendo assim, são indicados, para a recuperação de áreas degradadas, nas condições edafoclimáticas estudadas, desde que sejam bem manejados, ao longo de todo o ciclo de produção.

**Palavras-chave:** serapilheira; efluxo de CO<sub>2</sub>; qualidade do solo; matéria orgânica.

## **Intensification of land use with integrated agricultural production systems: effect of the modalities and arrangements on nutrient cycling and soil carbon stocks**

### **ABSTRACT**

Diversity of possible components and arrangements for the implementation of agrosilvopastoral systems enhances the storage of carbon (C) in the plant biomass of pastures, of the annual crops and trees, which can mitigate greenhouse gas emissions and increase C stocks in the soil. The present study aimed to evaluate the contents and stocks of carbon and nitrogen, the dynamics of litter and soil fertility, after the conversion of low-productivity pasture into implemented agrosilvopastoral systems, in three mesoregions of the State of Minas Gerais. It was evaluated an experiment located in the municipality of Francisco Sá, in Eutrophic Haplic Cambisol, composed of a silvopastoral system, with marandu grass and *Eucalyptus urograndis*, nine years old, nominal pasture and native vegetation (reference area). In Curvelo, an experiment was evaluated in Red Latosol, consisting of a seven-year-old agrosilvopastoral system, nominal pasture, managed pasture and native vegetation (reference area). In Sete Lagoas, an experiment was evaluated in Red Latosol, consisting of three agrosilvopastoral systems with thirteen, eleven and nine years of implementation, an agropastoral system with thirteen years, managed pasture and native vegetation (reference area). For sampling in systems with arboreal components, three points were selected according to the distance between the eucalyptus rows, the first being in the eucalyptus tree planting line (P1), the second 3.0 m away from the tree (P2) and the third in the center of the alley (P3). The dynamics of eucalyptus litter in the integrated agricultural production system was evaluated in the Francisco Sá area through monthly collections of produced and decomposed litter over the course of a year. Soil samples were collected up to 100 cm, with the exception of the Francisco Sá area, where collection in the Haplic Cambisol was only possible to a depth of 50 cm. They were evaluated the soil density, fertility, and C and nitrogen (N) contents and stocks. In Francisco Sá (Article 1), the litter decomposition rates differed according to the distance from the eucalyptus tree lines. The CO<sub>2</sub> efflux was influenced by the evaluation season. Higher values occurred among the months of November and February, during the rainy season, for all treatments, and P1 was statistically equal to native vegetation (VN), which had a direct correlation with the decomposition of the litter, accelerating the process by increasing humidity with greater microbial activity near the eucalyptus trees. The higher light intensities resulted in greater decomposition of eucalyptus litter and higher CO<sub>2</sub> effluxes. Regarding nutrient contents, VN presented higher values of Ca, Mg, effective CTC and V%, a result attributed to the lack of nutrient replacement in cultivated environments and the greater efficiency in nutrient cycling in VN. The C and N stocks in the 0-50 cm depth layer were higher in VN and they did not differ between the silvopastoral system and nominal pasture. In Curvelo (Article 2), VN presented higher values for the attributes K, Ca, Mg, SB, CTC, V% and C, while, in the agrosilvopastoral system, intermediate values were observed for K, Ca, Mg, SB, CTC, V% and C. The C stocks of the different land uses did not differ from each other, in all the depths evaluated, and VN was higher than the others. In Sete Lagoas (Article 2), the highest values of pH, K, Ca, Mg, SB, CTC and V were observed in the managed pasture and P and Ds (soil density) presented higher values in the agropastoral system, intermediate values in the agrosilvopastoral and managed pasture systems and low values in VN. The managed pasture presented C stocks equal to VN and the agrosilvopastoral system at thirteen years, differing from the other uses up to 30 cm. Already in the 0-50 and 0-100 cm profiles, the

managed pasture and the agrosilvopastoral systems with thirteen years presented higher C stocks than VN. The agropastoral system obtained the lowest stocks in the 0-30, 0-50 and 0-100 cm depth profiles. The N stocks did not differ between the managed pasture and VN uses, and these systems presented the highest values in relation to the other systems evaluated. Agrosilvopastoral systems are promising in storing carbon in the soil profile, and may exceed the C and N stocks of native vegetation. Therefore, they are indicated for the recovery of degraded areas, under the studied edafoclimatics conditions, as long as they are well managed throughout the production cycle.

**Keywords:** litter; CO<sub>2</sub> efflux; soil quality; organic matter.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Artigo 1 - Dinâmica de decomposição da serapilheira arbórea e influência nos estoques de carbono e fertilidade do solo sob sistema silvipastoril

Figura 1- Localização da Fazenda da Barra e representação da área experimental, no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....33

Figura 2. Histórico de mudança do uso do solo na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....34

Figura 3. Esquema de amostragem do solo, intensidade luminosa e efluxo de CO<sub>2</sub> (A) e de serapilheira (B), na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. VN: vegetação nativa; PN: pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril. Pontos: P1, no renque, entre as árvores de eucalipto; P2: localizado a 2,5 m (A) e 1 m (B) de distância do renque de eucalipto e; P3: localizado a 7 m (A) e 4 m (B) de distância do renque de eucalipto.....35

Figura 4. Médias mensais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, coletadas da estação climática automática de Montes Claros, MG, localizada próxima à Fazenda da Barra, município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....39

Figura 5. Intensidade luminosa anual (A) e mensal (B), nos sistemas de manejo avaliados no Município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. NV: Vegetação nativa; NP: Pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril (P1): ponto localizado entre as árvores do renque; (P2): ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; (P3): ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Tratamentos com letras diferentes foram estatisticamente distintos pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn-Bonferroni ao nível de significância de 5%. Linhas tracejadas, ao lado das letras do teste de médias no Boxplot, representam as médias.....40

Figura 6. Produção mensal de serapilheira do eucalipto, em sistema integrado de produção agropecuária na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais. SSP(P1): ponto entre as árvores do renque; SSP(P2): ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; e SSP(P3): ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Os valores apresentados referem-se à média (n=5) ± erro-padrão.....41

Figura 7. Produção mensal de serapilheira (A: Folhas; B: Caule; C: Material reprodutivo; e D: Material amorfo), em sistema integrado de produção agropecuária, na área experimental da Fazenda da Barra, no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. P1: ponto entre as árvores do renque; P2: ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; e P3: ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Os valores apresentados referem-se à média (n=5) ± erro-padrão.....42

Figura 8. Análise de componentes principais, considerando o total de serapilheira acumulada (SA) e partição em folhas (F), caule (C), material reprodutivo (MR) e material amorfo (MA), em sistema integrado de produção agropecuária, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. C representa o período chuvoso e S o período seco; P1: ponto entre as árvores do renque; P2: ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; e P3: ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque.....43

Figura 9. Curva de decomposição de serapilheira, em sistema integrado de produção agropecuária, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais. P1: ponto entre os eucaliptos, no renque; P2: ponto localizado a 1 m de distância do renque e; P3: ponto localizado a 4 m de distância do renque.....44

Figura 10. BoxPlot (A) e série temporal (B) do efluxo de CO<sub>2</sub> entre os sistemas de manejo avaliados, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no Município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. NV: Vegetação nativa; NP: Pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril (P1): ponto localizado entre as árvores do renque; (P2): ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; (P3): ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Tratamentos com letras diferentes foram estatisticamente distintos pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn-Bonferroni ao nível de significância de 5%. Linhas tracejadas, ao lado das letras do teste de médias no Boxplot, representam as médias.....46

Figura 11. Temperatura do solo e fluxo de água (Wflux), nos pontos de amostragem do sistema silvipastoril (A; C) e nos diferentes usos do solo (B; D), respectivamente, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais. VN: vegetação nativa; PN: pastagem nominal e SSP: sistema silvipastoril (P1: entre as árvores de eucalipto; P2: a 1m de distância da árvore de eucalipto e P3: a 4m de distância da árvore de eucalipto), Os valores apresentados referem-se à média (n=5) ± erro-padrão.....47

Figura 12. Temperatura e fluxo de água (Wflux) mensal, nos pontos de amostragem do sistema silvipastoril (A; C) e nos diferentes usos do solo (B; D), respectivamente, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. Na PN: pastagem nominal; VN: vegetação Nativa e no sistema silvipastoril (P1: ponto entre os eucaliptos, no renque; P2: ponto localizado a 1 m de distância do renque e; P3: ponto localizado a 4 m de distância do renque).....48

Figura 13. Análise dos componentes principais, considerando os atributos do solo avaliados nas camadas de 0-5 (A), 5-10 (B), 10-20 (C) e 20-30 (D) cm de profundidade, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. PN: pastagem nominal; VN: vegetação nativa e SSP: sistema silvipastoril (P1: ponto entre os eucaliptos, no renque; P2: ponto localizado a 1 m de distância do renque e; P3: ponto localizado a 4 m de distância do renque).....53

Figura 14. Estoques de carbono (EC) e nitrogênio total (NT) do solo, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. VN: vegetação nativa; PN: pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril (P1: entre às árvores de eucalipto; P2: a 1m de distância da árvore de eucalipto e P3: a 4m de distância da árvore de eucalipto). Barras seguidas de mesma letra ou sem letras para a mesma profundidade não apresentam diferença estatística para o teste t (LSD) a 5% de probabilidade. ....62

Artigo 2 – Estoques de carbono e fertilidade do solo em diferentes arranjos produtivos de sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mineiro

Figura 1. Localização geográfica dos municípios de Curvelo e Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.....74

Figura 2. Dados climáticos dos locais de estudados entre 2009 e 2022. INMET (2024) .....75

Figura 3. Esquema de coleta de solo nos dois locais de avaliação. A= Sete Lagoas; B= Curvelo.....78

Figura 4: Análise de componentes principais dos atributos físico-químicos do solo, em diferentes locais de estudo (Curvelo-MG = A; Sete Lagoas-MG = B) e sob diferentes usos e manejos, na camada de 0–30 cm de profundidade. VN = Vegetação nativa; PN= Pastagem nominal; PM = Pastagem manejada; SAP= sistema agropastoril; SASP1= sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). SB = soma de bases; CTC = capacidade efetiva de troca de cátions; V = saturação por bases; C = carbono orgânico; Ds= densidade do solo.....81

Figura 5. Teores de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção, localizado em Curvelo/MG. SASP = sistema agrossilvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 6 metros de distância da árvore de eucalipto.....82

Figura 6. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Curvelo/MG. VN = Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; PM = pastagem manejada; SASP = sistema agrossilvipastoril. As barras representam o erro-padrão da média.....83

Figura 7. Teores de carbono (C) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, localizados em Sete Lagoas/MG. A= SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); B SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); C= SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. As barras representam o erro-padrão da média.....85

Figura 8. Teores de nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, localizados em Sete Lagoas/MG. A= SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); B SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); C= SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. As barras representam o erro-padrão da média.....87

Figura 9. Teores de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Sete Lagoas/MG. VN= Vegetação nativa; PM = Pastagem manejada; SAP = sistema agropastoril; (SASP1) = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). As barras representam o erro-padrão da média.....89

Figura 10. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema agrossilvipastoril do experimento, localizado em Curvelo/MG. P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 6 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro-padrão da média.....90

Figura 11. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Curvelo/MG. VN= Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; PM = pastagem manejada; SASP= sistema agrossilvipastoril. Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro-padrão da média.....91

Figura 12. Estoques de carbono (A;B;C) e nitrogênio (D;E;F) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, localizados em Sete Lagoas/MG. SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (09 anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra ou sem letras, em uma mesma profundidade ou coluna e em um mesmo sistema, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro-padrão da média.....92

Figura 13. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Sete Lagoas/MG. VN = Vegetação nativa; PM = Pastagem manejada; SAP = sistema agropastoril; SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro padrão.....93

## LISTA DE TABELAS

Artigo 1 – Dinâmica de decomposição da serapilheira arbórea e influência nos estoques de carbono e fertilidade do solo sob sistema silvipastoril

Tabela 1. Teores de micro e macronutrientes nas folhas e galhos de eucalipto, em sistema silvipastoril, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....42

Tabela 2. Densidade e atributos químicos de um Cambissolo Háplico eutrófico, sob diferentes usos do solo, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....56

Tabela 3. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....58

Tabela 4. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....59

Tabela Suplementar 1. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....66

Artigo 2 - Estoques de carbono e fertilidade do solo em diferentes arranjos produtivos de sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mineiro

Tabela 1. Correlação entre as variáveis e os componentes principais e explicação dos componentes principais para atributos físico-químicos do solo em diferentes locais de estudo.....77

Tabela suplementares .....100

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	19
2 OBJETIVOS .....	21
2.1 Objetivo Geral .....	21
2.2 Objetivos Específicos .....	21
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1 Sistemas integrados de produção e mitigação de gases de efeito estufa.....	22
3.2 Produção e decomposição da serapilheira em sistemas integrados de produção.....	23
3.3 Estoques de carbono e nitrogênio no solo.....	24
3.4 Efeito do aporte de matéria orgânica na qualidade do solo.....	25
3.5 Referências .....	26
4 ARTIGOS 34	
4.1 Artigo 1 - Dinâmica de decomposição da serapilheira arbórea e influência nos estoques de carbono e fertilidade do solo sob sistema silvipastoril.....	34
4.1.1 Introdução.....	37
4.1.2 Material e Métodos .....	37
4.1.2.1 Localização da área de estudo .....	37
4.1.2.2 Histórico de uso da terra .....	38
4.1.2.3 Descrição dos Tratamentos .....	39
4.1.2.4 Variáveis ambientais .....	40
4.1.2.5 Produção e decomposição da serapilheira proveniente do componente arbóreo .....	41
4.1.2.6 Efluxos de CO <sub>2</sub> do solo entre os diferentes usos e manejos do solo .....	42
4.1.2.7 Amostragem e preparação de amostras de solo .....	42
4.1.2.8 Avaliação da fertilidade e densidade do solo.....	42
4.1.2.9 Determinação dos teores e estoques de Carbono e Nitrogênio do solo .....	42
4.1.2.10 Análise estatística .....	43
4.1.3 Resultados e Discussão.....	43
4.1.3.1 Variáveis ambientais .....	43
4.1.3.2 Produção e decomposição da serapilheira do componente florestal .....	46
4.1.3.3 Efluxos de CO <sub>2</sub> do solo .....	50
4.1.3.4 Atributos de fertilidade e densidade do solo .....	54
4.1.3.5 Teores e estoques de Carbono e Nitrogênio do solo .....	57
4.1.4. Conclusões.....	60
4.1.5 Referências .....	60
4.2 Artigo 2 - Estoques de carbono e fertilidade do solo em diferentes arranjos produtivos de sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mineiro.....	67
4.2.1 Introdução.....	70
4.2.2 Material e métodos .....	70
4.2.2.1 Descrição das áreas de estudo.....	70
4.2.2.2 Sistemas de uso do solo .....	72

4.2.2.3 Amostragem de solo .....	74
4.2.2.4 Avaliação da fertilidade, granulometria e densidade do solo.....	75
4.2.2.5 Determinação dos teores e estoques de Carbono e Nitrogênio do solo .....	75
4.2.2.6 Análise estatística .....	76
4.2.3 Resultados.....	76
4.2.3.1 Fertilidade e densidade do solo .....	76
4.2.3.2 Teores de Carbono e Nitrogênio.....	78
4.2.3.3 Estoques de Carbono e Nitrogênio .....	87
4.2.4 Discussão .....	92
4.2.4.1 Fertilidade e densidade do solo .....	92
4.2.4.2 Teores e Estoque de Carbono e Nitrogênio do solo .....	93
4.2.5 Conclusão.....	95
4.2.6 Referências .....	96
Apêndice 100	
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	116

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas, especialmente as que influenciam nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), são reconhecidamente responsáveis pelo aquecimento global, resultando em um aumento de 1,1°C na temperatura média da superfície global, no período de 2011-2020, em comparação a 1850-1900. Essas emissões continuam a crescer globalmente, atingindo níveis históricos pelo uso insustentável de energia, mudanças no uso da terra, práticas agrícolas, além de padrões de consumo e produção, estilos de vida e desigualdades regionais, nacionais e individuais (IPCC, 2022). No Brasil, as principais fontes de GEE são as mudanças no uso da terra, especialmente o desmatamento e as práticas agrícolas (Oliveira Filho *et al.*, 2020). Em 2022, 48% das emissões foram atribuídas à mudança no uso da terra e 26% à agropecuária (SAEG, 2024). Diante desse cenário, é essencial adotar sistemas conservacionistas de produção que contribuam para a mitigação dos GEE.

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) é uma estratégia prevista no “Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas, visando à consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC+”. Essa abordagem promove o sequestro de carbono no solo e na biomassa dos diferentes componentes dos sistemas produtivos (Conceição *et al.*, 2017; Araujo *et al.*, 2022). Segundo a Rede ILPF, a meta inicial estabelecida para o Brasil, em 2009, foi expandir a área dedicada à ILPF, em 4 milhões de hectares até 2020. Entre 2010 e 2015, essa área aumentou em 5,96 milhões de hectares, resultando no sequestro de 21,8 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Com a adesão do Brasil ao Acordo de Paris sobre Mudanças Climáticas, em 2016, a meta do Plano ABC+ foi ampliada, prevendo um acréscimo de 5 milhões de hectares com ILPF, totalizando 9 milhões de hectares até 2030. Entre os ciclos de 2015/2016 e 2020/2021, houve um aumento estimado de 52%, nas áreas de ILPF no Brasil, alcançando 17,43 milhões de hectares em todo o território nacional (Rede ILPF, 2022).

Conforme Rodrigues *et al.* (2014), a ILPF é uma técnica de produção sustentável que combina atividades agrícolas, pecuárias e florestais, em uma mesma área, podendo ser implementada, por meio de rotação, sucessão ou consórcio de culturas. Esses sistemas representam alternativas viáveis sob os aspectos socioambiental, ecológico e econômico, permitindo a utilização de práticas produtivas que atendem à demanda por alimentos, ao mesmo tempo, em que diversificam os produtos, como madeira, fibras e grãos. Além disso, a ILPF contribui para o aumento dos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo, promovendo benefícios tanto para a produção quanto para a sustentabilidade (Freitas *et al.*, 2020; Cá *et al.*, 2022; Lustosa Filho *et al.*, 2024).

A produção sustentável contribui para a melhoria da qualidade do solo, ao incorporar grandes quantidades de matéria orgânica (MO) e estimular o metabolismo microbiano, promovendo a ciclagem de nutrientes e o sequestro de carbono na biomassa viva do solo (Brandani *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2016). Segundo Freitas *et al.* (2020), a adoção de práticas de manejo, em sistemas

integrados, aumenta a deposição de serapilheira na superfície do solo e incrementa o volume de raízes no sistema, resultando em uma melhor qualidade do solo.

A recuperação de pastagens degradadas, por meio de sistemas agrossilvipastoris, que integram lavoura, componentes florestais e pecuária, em uma mesma área, promove a recuperação das características físicas e químicas do solo, eleva a produtividade, aumenta os estoques de carbono, proporciona conforto animal e gera renda para o produtor (Souza *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2021; Polanía-Hincapié *et al.*, 2021). Contudo, conforme Polanía-Hincapié *et al.* (2021), os benefícios desses sistemas variam, dependendo de fatores como condições climáticas, tipos de solo, espécies utilizadas, arranjos adotados, intensidade do pastejo animal e o manejo de pastagens, animais e árvores ao longo do tempo.

Neste estudo, testamos a hipótese de que a conversão de áreas de pastagem, em sistemas agrossilvipastoris, aumentam os estoques de C e N no solo e melhoram a ciclagem de nutrientes, contribuindo assim para mitigação dos GEE. Nesse sentido, propôs-se a avaliação desses parâmetros, em sistemas integrados de produção agropecuária, em diferentes condições edafoclimáticas, arranjos e tempo de implantação no Cerrado de Minas Gerais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar os teores e estoques de carbono e nitrogênio, a dinâmica da serapilheira e a fertilidade do solo, após a conversão de pastagem de baixa produtividade em sistemas agrossilvipastoris implantados, em três mesorregiões do Estado de Minas Gerais.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- i. Comparar os estoques de C e N do solo em sistemas agrossilvipastoris com diferentes arranjos, idades e condições edafoclimáticas;
- ii. Estimar o potencial de acúmulo de C e N do solo dos sistemas integrados de produção agropecuária em relação as áreas de referência (pastagens de baixa produtividade e vegetação nativa);
- iii. Avaliar a dinâmica da decomposição da serapilheira produzida pelo componente florestal do sistema integrado de produção;
- iv. Comparar os indicadores de fertilidade do solo entre os sistemas de uso da terra avaliados.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Sistemas integrados de produção e mitigação de gases de efeito estufa

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) é uma estratégia de produção sustentável, que combina atividades pecuárias, florestais e agrícolas, em uma mesma área, seja por meio de rotação, sucessão ou consórcio. Esses sistemas diversificados promovem a produção de energia, alimentos, fibras, produtos madeireiros e não madeireiros, de origem animal ou vegetal, otimizando os ciclos biológicos das plantas, animais, insumos e resíduos. A ILPF busca integrar os elementos do sistema produtivo para melhorar a qualidade dos produtos e do ambiente (Machado *et al.*, 2011).

No Brasil, as mudanças no uso da terra, principalmente pelo desmatamento e práticas agrícolas, são as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE), representando 48% das emissões, em 2022, seguidas pela agropecuária, responsável por 26% (Oliveira Filho *et al.*, 2020; SAEG, 2024). Diante desse cenário, a adoção de sistemas conservacionistas como a ILPF é essencial para mitigar as emissões de GEE.

De acordo com a Rede ILPF (2022), entre 2015/2016 e 2020/2021, houve um aumento estimado de 52%, na área com ILPF no Brasil, totalizando 17,43 milhões de hectares. Em 2021, os estados com maior concentração de sistemas ILPF eram Mato Grosso do Sul (18,2%), Mato Grosso (13,1%), Rio Grande do Sul (12,7%), Minas Gerais (9,1%) e Goiás/Distrito Federal (8,23%), com expansão observada em todos os biomas.

A utilização da ILPF não apenas intensifica e melhora a eficiência do uso da terra, mas também traz benefícios ambientais significativos, como o maior sequestro de carbono. Lustosa Filho *et al.* (2024) compararam a vegetação nativa (VN) com sistemas silvipastoris de sete anos, com sombreamento de 25%, 50% e 75% e observaram aumentos nos estoques de carbono total (CT) de 19,69, 2,08 e 8,17 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, resultando em sequestros anuais de 1,67, 0,30 e 1,17 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Além disso, os sistemas ILPF oferecem benefícios econômicos, como aumento de produtividade com custos menores, redução de riscos relacionados às variações climáticas e de mercado e diversificação de fontes de renda (Quandt *et al.*, 2023). Também contribuem, para reduzir custos de produção e impactos ambientais, em virtude da menor dependência de insumos químicos, promovendo o desenvolvimento sustentável (Laroca *et al.*, 2018).

Os componentes florestais dos sistemas ILPF favorecem o microclima, protegem o solo, estabilizam a temperatura e a umidade relativa do ar, além de regular os regimes hídricos e eólicos (Guillot *et al.*, 2019; Guillot *et al.*, 2021). A diversidade de elementos nesses sistemas aumenta a capacidade de armazenamento de carbono na biomassa radicular da pastagem e das árvores, ajudando a reduzir emissões de GEE e elevando os estoques de carbono tanto na superfície quanto no solo (Nair *et al.*, 2011; Damian *et al.*, 2023).

A rotação de culturas nos sistemas integrados também melhora a fertilidade do solo, por meio da ciclagem eficiente de nutrientes, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e mitigando as emissões de GEE (Paes *et al.*, 2020). Além disso, a extensão das raízes das árvores e a adição de resíduos orgânicos contribuem, para melhorar as propriedades físicas do solo, como maior

infiltração de água, menor compactação, densidade aparente reduzida e maior estabilidade dos agregados. Essas características aumentam os estoques de carbono no solo e reforçam o papel da ILPF na mitigação das mudanças climáticas (Paes *et al.*, 2020).

### 3.2 Produção e decomposição da serapilheira em sistemas integrados de produção

Os sistemas agroflorestais, caracterizados pela integração de espécies agrícolas, florestais e animais, representam uma forma mais sustentável de uso da terra, principalmente pela diversificação biológica que promovem. Essa diversificação cria interações sinérgicas entre espécies agrícolas e florestais, otimizando os processos bióticos e aprimorando o equilíbrio ecológico do sistema. Para alcançar esses benefícios, é fundamental compreender as características de cada espécie, sua posição no sistema e suas relações com outros organismos e fatores edafoclimáticos locais (Ferreira *et al.*, 2021). O tipo de vegetação e as condições ambientais influenciam diretamente a quantidade e a qualidade do material vegetal depositado no solo, que, ao longo do tempo, contribui para a formação da serapilheira. Essa, composta por folhas, galhos, órgãos reprodutivos e outros detritos, desempenha papel crucial na proteção do solo e na dinâmica dos ecossistemas, sendo particularmente relevante, em regiões de altas temperaturas, onde sua produção é influenciada pelas estações do ano (Brasil *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2010).

Nos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), a biodiversidade promove uma entrada variada de biomassa vegetal, contribuindo para o aumento da matéria orgânica do solo (MOS). As pastagens produzem biomassa tanto acima quanto abaixo do solo, enquanto as árvores acrescentam resíduos, como folhas e exsudatos radiculares, elevando os níveis de MOS. Essa matéria orgânica serve como fonte de energia para organismos do solo, aumentando a atividade biológica e melhorando a saúde geral do solo (Conceição *et al.*, 2017; Soares *et al.*, 2020; Tadini *et al.*, 2021). A decomposição da serapilheira desempenha um papel central na ciclagem de nutrientes, sendo uma forma de sinergismo entre culturas florestais, anuais e forrageiras nos sistemas ILPF, promovendo uma eficiência produtiva e ambiental (Skorupa; Barros; Neves, 2015; Alvarenga; Noce, 2005; Calil *et al.*, 2016).

Estudos sobre a dinâmica da serapilheira em sistemas ILPF são fundamentais para subsidiar a escolha de arranjos e espécies mais apropriadas, visando maximizar a ciclagem de nutrientes e otimizar os serviços ecossistêmicos (Pimentel *et al.*, 2021). Além disso, Silva, Ferreira e Neves (2018) ressaltam a importância de considerar os componentes formadores da serapilheira e seu estoque de carbono, já que a decomposição desses resíduos é essencial para manter a capacidade produtiva das áreas de ILPF.

Os impactos dos sistemas integrados variam conforme sua complexidade. Sistemas agroflorestais simples, com menor biodiversidade, tendem a oferecer níveis reduzidos de serviços ecossistêmicos em comparação com sistemas ILPF mais diversificados, que se assemelham às florestas naturais em termos de fluxo contínuo de nutrientes, abundância de resíduos acumulados e diversidade de espécies (Matos *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2018). Nos sistemas ILPF, a presença de componentes arbóreos em pastagens tem um papel crucial na ciclagem de nutrientes,

influenciando processos como a deposição de serapilheira e a decomposição de detritos vegetais, dependendo dos espaçamentos e arranjos adotados (Moreira *et al.*, 2018).

Entre as espécies florestais utilizadas, o eucalipto destaca-se como a principal escolha em sistemas silvipastoris no Brasil (Santos *et al.*, 2018). Embora a decomposição da serapilheira do eucalipto seja mais lenta, isso pode favorecer o acúmulo de matéria orgânica e nutrientes no solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e nutrientes e, conseqüentemente, melhorando a qualidade do solo (Carvalho *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020). Assim, a escolha e manejo adequado das espécies nos sistemas ILPF não apenas contribuem para a sustentabilidade ambiental, mas também para a eficiência produtiva, consolidando esses sistemas como uma alternativa viável e sustentável para a agropecuária moderna.

### 3.3 Estoques de carbono e nitrogênio no solo

O armazenamento de C é essencial para a manutenção da qualidade do solo e serve como indicador de sua saúde. Ele desempenha papel crucial para a estabilidade dos ecossistemas florestais (Wiesmeier *et al.*, 2019; Bangroo *et al.*, 2013; Amelung *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2023). Além disso, o carbono e o N no solo são fundamentais, para a ciclagem de nutrientes nos ecossistemas, sendo necessário adotar práticas conservacionistas e o uso adequado da terra, para reduzir as perdas de C e aumentar seu sequestro (Hussain *et al.*, 2019). Em regiões tropicais, os sistemas de Integração ILPF têm se mostrado modelos viáveis para o sequestro de C e mitigação das emissões de GEE (Menichetti; Martin; Bolinder, 2020; Frazão *et al.*, 2021).

A presença do componente arbóreo nos sistemas ILPF contribui significativamente para o aumento da produção de serapilheira, que eleva os aportes de matéria orgânica ao solo. Isso resulta em benefícios como a melhoria do microclima, maior resistência e resiliência do solo e aumento dos estoques de C orgânico, promovendo a qualidade do solo (Da Conceição *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2016; Guillot *et al.*, 2019). Com o avanço da idade das árvores, como o eucalipto, há maior disponibilidade de resíduos e volume de raízes, o que culmina em estoques mais elevados de C e N no solo (Shvaleva *et al.*, 2014; Valadão *et al.*, 2021). Além disso, o carbono sequestrado no fuste das árvores desempenha um papel direto na redução do CO<sub>2</sub> atmosférico (Jacovine *et al.*, 2008).

A distribuição dos estoques de carbono orgânico total (COT), dentro dos sistemas ILPF, pode variar conforme o arranjo das culturas e as condições locais. Isernhagen *et al.* (2017) observaram que, em sistemas de eucalipto consorciado com soja no verão e milho com *Urochloa brizantha* no inverno, os estoques de COT foram maiores na face sul (73,1 Mg ha<sup>-1</sup>) em comparação à face norte (69,3 Mg ha<sup>-1</sup>). Essa variação é influenciada pela deposição de serapilheira e pela exposição à radiação solar, que impactam a decomposição dos resíduos vegetais (Moreira *et al.*, 2018).

Em áreas integradas de produção, como as avaliadas por Sacramento *et al.* (2013), os estoques de C e N foram maiores em sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris, ambos com 13 anos de implantação, quando comparados ao plantio tradicional. Esses sistemas apresentaram estoques mais próximos aos da vegetação nativa (VN), evidenciando sua capacidade de recuperação de propriedades do solo. Da mesma forma, Freitas *et al.* (2020) observaram que sistemas

agrossilvipastoris aumentaram os estoques de C e N, dois anos após a avaliação inicial, com incrementos atribuídos à interação entre árvores e gramíneas, que diversificam e aumentam os aportes de serapilheira.

O potencial de sequestro de carbono em sistemas ILPF varia com o tempo e o espaço, dependendo de fatores como tipo de solo, espécies utilizadas e práticas de manejo. Menichetti, Martin e Bolinder (2020) estimaram estoques máximos de carbono no solo, por meio de modelagem bayesiana, indicando que os sistemas silvipastoris possuem maior capacidade de armazenamento, em comparação aos sistemas agrícolas, com valores estimados de até 1174,5 Mg ha<sup>-1</sup>.

Os estoques de C e N, em sistemas ILPF, são influenciados por múltiplos fatores, como culturas implantadas, práticas de manejo e condições edafoclimáticas (Sacramento *et al.*, 2013; Guillot *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2020; Almeida *et al.*, 2021; Frazão *et al.*, 2021; Moreira *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2022; Freitas *et al.*, 2024). A adição de matéria orgânica ao solo, seja por resíduos de culturas ou esterco animal, contribui para o aumento desses estoques. Fezes e urina de animais, assim como a fixação biológica de N por leguminosas, também desempenham papel relevante nesse processo, promovendo a fertilidade e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Matos *et al.*, 2020; Moreira *et al.*, 2022).

### **3.4 Efeito do aporte de matéria orgânica na qualidade do solo**

No Brasil, a pecuária extensiva ainda predomina como prática agrícola, sendo caracterizada por uma alimentação baseada majoritariamente em pastagens com suplementação limitada de sais minerais. No entanto esses sistemas frequentemente carecem de investimentos no preparo químico e físico do solo, o que contribui para a degradação das pastagens (Tavanti *et al.*, 2020). Esse cenário é agravado pelas características desfavoráveis do solo e pela degradação das pastagens, que levam à redução na qualidade e quantidade da matéria orgânica do solo (MOS). Como resultado, ocorre aumento na perda de MOS e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2019).

Diante desse panorama, é fundamental adotar práticas de manejo sustentável que garantam a cobertura do solo, melhorem a produtividade animal e promovam o aporte de matéria orgânica com qualidade e quantidade adequadas. Correção da acidez do solo, fertilização, rotação de culturas e sistemas integrados de produção, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), são estratégias promissoras, para a recuperação de solos degradados, contribuindo para a redução das emissões de GEE e o aumento dos estoques de carbono no solo (Sanz *et al.*, 2017; Tavanti *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2023; Tavanti *et al.*, 2023).

Estudos como o de Agbohessou *et al.* (2023) demonstraram que, em sistemas silvipastoris com densidade de 81 árvores por hectare, o componente arbóreo pode compensar entre 18% e 41% das emissões totais de GEE provenientes de animais (vacas, cabras e ovelhas). Além disso, esses sistemas promovem melhorias no microclima do solo, aumentam a resistência e resiliência do solo e elevam os estoques de C orgânico, resultando em melhor qualidade do solo (Oliveira *et al.*, 2016; Guillot *et al.*, 2019). Nos sistemas agrossilvipastoris, a deposição de galhos finos e folhas contribui para um aporte mais intenso de serapilheira, o que ativa a microbiota do solo e aumenta o acúmulo de MOS (Almeida *et al.*, 2021). Esses sistemas também recuperam a qualidade física do

solo, ampliam sua capacidade produtiva e evitam a compactação, graças à dinâmica de espécies e ao manejo adequado de pastagens e animais (Polanía-Hincapié et al., 2021).

A matéria orgânica do solo é continuamente transformada por processos biológicos, químicos e físicos, com impactos positivos sobre a atividade microbiana, taxa de infiltração, redução da erosão, estabilidade dos agregados, densidade e porosidade do solo (Reis et al., 2018a; Spera et al., 2010; Assis et al., 2015; Cherubin et al., 2016). A diversidade e qualidade dos resíduos adicionados ao solo influenciam diretamente sua estrutura física, enquanto a decomposição de resíduos animais e vegetais favorece a ciclagem de nutrientes no sistema (Reis et al., 2018b).

Resultados de estudos específicos corroboram essas observações. Em um experimento na Mata dos Cocais, no Maranhão, Reis et al. (2018b) identificaram maiores teores de fósforo (P), na camada superficial do solo (0-10 cm), em sistemas ILPF, quando comparados à vegetação nativa. Além disso, os teores de potássio (K) foram superiores no ILPF e, em pastagens degradadas até 40 cm de profundidade, indicando o potencial dos sistemas integrados para melhorar a fertilidade do solo.

Vásquez et al. (2021), ao avaliarem quatro sistemas silvipastoris com diferentes espécies florestais (amieiro, pinheiro, cipreste e pona), observaram alta matéria orgânica (6,74% a 9,99%) e elevada porosidade (> 60%) em todos os sistemas. O sistema com cipreste apresentou maior teor de K (382,33 ppm), enquanto o sistema com amieiro obteve o maior teor de P (12,64 ppm). O sistema com pínus destacou-se pelas melhores características do solo e maior capacidade de sequestro de carbono, alcançando 149,05 Mg ha<sup>-1</sup>.

Esses estudos destacam que sistemas integrados como os ILPF possuem um grande potencial, para mitigar os efeitos negativos da pecuária extensiva, promovendo melhorias, na qualidade do solo e no sequestro de carbono, além de contribuir para a sustentabilidade dos sistemas agropecuários no Brasil.

### 3.5 Referências

ALMEIDA, L. L. de S.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO, Á. L. de C.; LANA, A. M. Q.; DE 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 & tillage research*, v. 205, n. 104785, p. 104785, 2021. DOI 10.1016/j.still.2020.104785. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.

AMELUNG, W.; BOSSIO, D.; DE VRIES, W.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; AMUNDSON, R.; BOL, R.; COLLINS, C.; LAL, R.; LEIFELD, J.; MINASNY, B.; PAN, G.; PAUSTIAN, K.; RUMPEL, C.; SANDERMAN, J.; VAN GROENIGEN, J. W.; MOONEY, S.; VAN WESEMAEL, B.; WANDER, M.; CHABBI, A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature communications*, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2020. DOI 10.1038/s41467-020-18887-7. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18887-7>. Acesso em: 6 maio 2024.

ARAÚJO, M. D. M.; SOUZA, H. A. de; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; COSTA, J. B.; SOUZA, I. M. de; REIS, V. R. R.; BRASIL, E. P.; POMPEU, R. C. F. F. Integrated production systems in a Plinthosol: greenhouse gas emissions and soil quality. *Australian journal of crop science*, n. 16(02):2022, p. 184–191, 2022. DOI 10.21475/ajcs.22.16.02.3263. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.22.16.02.3263>.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, J. de M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, v. 19, n. 4, p. 309–316, 2015. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316>.

BANGROO, S. A.; THAIR, A.; MAHDI, S. S.; NAJAR, G. R.; SOFI, J. A. Carbon and greenhouse gas mitigation through soil carbon sequestration potential of adaptive agriculture and agroforestry systems. *Range Management & Agroforestry*, v. 34, p. 1–11, 2013. .

BRANDANI, C. B.; ABBRUZZINI, T. F.; WILLIAMS, S.; EASTER, M.; PELLEGRINO CERRI, C. E.; PAUSTIAN, K. Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. *Global change biology. Bioenergy*, v. 7, n. 4, p. 646–657, 2015. DOI 10.1111/gcbb.12175. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12175>.

BRASIL, J. B.; ANDRADE, E. M. de; AQUINO, D. D. N.; PEREIRA JÚNIOR, L. R. Sazonalidade na produção de serrapilheira em dois manejos no semiárido tropical. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 3, p. 167–176, 2017. DOI 10.24221/jeap.2.3.2017.1335.167-176. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1335.167-176>.

CÁ, J.; LUSTOSA FILHO, J. F.; DA SILVA, N. R.; DE CASTRO, C. R. T.; DE OLIVEIRA, T. S. C and N stocks in silvopastoral systems with high and low tree diversity: Evidence from a twenty-two year old field study. *The Science of the total environment*, v. 833, n. 155298, p. 155298, 2022. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.155298. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155298>.

CARVALHO, H. C. DE S., FERREIRA, J. L. S., CALIL, F. N., & SILVA-NETO, C. DE M. E. Nutrients stocks in litter in four types of vegetation in Cerrado in Goiás state, Brazil. *ENFLO*, 2019, 7, p. 1- 11. <https://doi.org/10.5902/2316980X37296>

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America*, v. 80, n. 1, p. 215–226, 2016. DOI 10.2136/sssaj2015.09.0328. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>.

CONCEIÇÃO, M. C. G. da; S. MATOS, E.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. de A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in soil carbon stocks under integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Amazon region. *Agricultural sciences*, v. 08, n. 09, p. 904–913, 2017. DOI 10.4236/as.2017.89066. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/as.2017.89066>.

COSTA, C. C. de A.; CAMACHO, R. G. V.; MACEDO, I. D. de; SILVA, P. C. M. da. Análise comparativa da produção de serapilheira em fragmentos arbóreos e arbustivos em área de caatinga na FLONA de Açú-RN. *Revista Árvore*, v. 34, n. 2, p. 259–265, 2010. DOI 10.1590/s0100-67622010000200008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/7XyBngYGWbxX95mfsYQKVMj/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 6 maio 2024.

DAMIAN, J. M.; DA SILVA MATOS, E.; CARNEIRO E PEDREIRA, B.; CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO, P.; MONICA PREMAZZI, L.; EDUARDO PELLEGRINO CERRI, C. Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: Patterns and driving factors in the soil carbon stocks. *Catena*, v. 220, n. 106750, p. 106750, 2023. DOI 10.1016/j.catena.2022.106750. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2022.106750>.

FERREIRA, N. C. F.; RAMOS, T.V.; FERREIRA JÚNIOR, R.J. CARVALHO, I.A. Decomposição de serapilheira em mata nativa do bioma Cerrado e *Eucalyptus urograndis* Litter. *Revista de Biotecnologia & Ciência*, 2020. v.9, n.1, p.1-8.

FERREIRA, J. L. S.; CALIL, F. N.; SILVA NETO, C. de M. e. Nutrient stock in the forest component in a crop-livestock-forest integration system in Central Brazil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 2, p. 86–97, 2021. DOI 10.6008/cbpc2179-6858.2021.002.0010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.002.0010>.

FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; ALMEIDA NETA, M. N.; MOTA, M. F. C.; ALMEIDA, L. L. de S.; RIBEIRO, J. M.; BICALHO, T. F.; FEIGL, B. J. Carbon and nitrogen stocks and organic matter fractions in the topsoil of traditional and agrisilvicultural systems in the Southeast of Brazil. *Soil research*, v. 59, n. 8, p. 794–805, 2021. DOI 10.1071/sr20150. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1071/sr20150>.

FRAZÃO, L. A.; PICCOLO, M. de C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado soil under different land uses. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 135, n. 3, p. 161–167, 2010. DOI 10.1016/j.agee.2009.09.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.09.003>.

FREITAS, I. C. de; ALVES, M. A.; PENA, A. N. L.; FERREIRA, E. A.; FRAZÃO, L. A. Changing the land use from degraded pasture into integrated farming systems enhance soil carbon stocks in the

Cerrado biome. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 46, n. 1, p. e63601, 2023. DOI 10.4025/actasciagron.v46i1.63601. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/jfKq6VTrVV55qWbjNhCMdh/>. Acesso em: 7 maio 2024.

FREITAS, I. C. de; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, M. V.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; AZEVEDO, A. M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian cerrado. *Rangeland ecology & management*, v. 73, n. 6, p. 776–785, 2020. DOI 10.1016/j.rama.2020.08.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>.

GUILLOT, E.; BERTRAND, I.; RUMPEL, C.; GOMEZ, C.; ARNAL, D.; ABADIE, J.; HINSINGER, P. Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: Comparison with a monocropping system. *European journal of soil biology*, v. 105, n. 103330, p. 103330, 2021. DOI 10.1016/j.ejsobi.2021.103330. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103330>.

GUILLOT, E.; HINSINGER, P.; DUFOUR, L.; ROY, J.; BERTRAND, I. With or without trees: Resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. *Soil biology & biochemistry*, v. 129, p. 122–135, 2019. DOI 10.1016/j.soilbio.2018.11.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.011>.

HUSSAIN, S.; SHARMA, V.; ARYA, V. M.; SHARMA, K. R.; RAO, C. S. Total organic and inorganic carbon in soils under different land use/land cover systems in the foothill Himalayas. *Catena*, v. 182, n. 104104, p. 104104, 2019. DOI 10.1016/j.catena.2019.104104. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104104>.

IPCC — INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. [s. d.]. *ipcc.ch*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

JACKSON, R. B.; LAJTHA, K.; CROW, S. E.; HUGELIUS, G.; KRAMER, M. G.; PIÑEIRO, G. The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, v. 48, n. 1, p. 419–445, 2017. DOI 10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>.

LAROCA, J. V. dos S.; SOUZA, J. M. A. de; PIRES, G. C.; PIRES, G. J. C.; PACHECO, L. P.; SILVA, F. D. da; WRUCK, F. J.; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, L. S.; SOUZA, E. D. de. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 11, p. 1248–1258, 2018. DOI 10.1590/s0100-204x2018001100007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/mg3g6wyXyGZhm4kvWwnvb7G/?format=html&lang=en>. Acesso em: 7 maio 2024.

LUSTOSA FILHO, J. F.; DE OLIVEIRA, H. M. R.; DE SOUZA BARROS, V. M.; DOS SANTOS, A. C.; DE OLIVEIRA, T. S. From forest to pastures and silvopastoral systems: Soil carbon and nitrogen stocks changes in northeast Amazônia. *The Science of the total environment*, n. 168251, p. 168251, 2023. DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.168251. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168251>.

MA, L.; LV, X.; CAO, N.; WANG, Z.; ZHOU, Z.; MENG, Y. Alterations of soil labile organic carbon fractions and biological properties under different residue-management methods with equivalent carbon input. *Applied soil ecology: a section of Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 161, n. 103821, p. 103821, 2021. DOI 10.1016/j.apsoil.2020.103821. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103821>.

MA, Z.; CHEN, H. Y. H.; BORK, E. W.; CARLYLE, C. N.; CHANG, S. X. Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: A global meta-analysis. *Global ecology and biogeography: a journal of macroecology*, v. 29, n. 10, p. 1817–1828, 2020. DOI 10.1111/geb.13145. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/geb.13145>.

MATOS, P. S.; FONTE, S. J.; LIMA, S. S.; PEREIRA, M. G.; KELLY, C.; DAMIAN, J. M.; FONTES, M. A.; CHAER, G. M.; BRASIL, F. C.; ZONTA, E. Linkages among soil properties and litter quality in agroforestry systems of southeastern Brazil. *Sustainability*, v. 12, n. 22, p. 9752, 2020. DOI 10.3390/su12229752. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su12229752>.

MENICHETTI, L.; KÄTTERER, T.; BOLINDER, M. A. A Bayesian modeling framework for estimating equilibrium soil organic C sequestration in agroforestry systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 303, n. 107118, p. 107118, 2020. DOI 10.1016/j.agee.2020.107118. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2020.107118>.

MOREIRA, E. D. S.; GONTIJO NETO, M. M.; LANA, Â. M. Q.; BORGHI, E.; SANTOS, C. A. dos; ALVARENGA, R. C.; VIANA, M. C. M. Production efficiency and agronomic attributes of corn in an integrated crop-livestock-forestry system. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 4, p. 419–426, 2018. DOI 10.1590/s0100-204x2018000400003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018000400003>.

MOREIRA, E. D. S.; OLIVEIRA, A. F. de; SANTOS, C. A. dos; GONÇALVES, L. C.; VIANA, M. C. M.; MARRIEL, I. E.; GONTIJO NETO, M. M.; ALVARENGA, R. C.; LANA, Â. M. Q. Soil carbon stock and biological activity in silvopastoral systems planted with. *Soil research*, v. 60, n. 7, p. 705–718, 2022. DOI 10.1071/sr21223. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1071/sr21223>.

NAIR, P. K. R.; TONUCCI, R. G.; GARCIA, R.; NAIR, V. D. Silvopasture and carbon sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (cerrado). *Advances in Agroforestry*. Dordrecht:

Springer Netherlands, 2011. p. 145–162.

OLIVEIRA, W. R. D. de; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M. de; COSER, T. R.; SILVA, A. M. M.; LACERDA, M. M.; SOUZA, K. W.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PULROLNIK, K. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1501–1510, 2016. DOI 10.1590/s0100-204x2016000900049. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/PFnYg93b8n6PP3Cb8rrNhHJ/abstract/?lang=en>. Acesso em: 6 maio 2024.

OLIVEIRA FILHO, E. G.; MEDEIROS, J. C.; ROSA, J. D.; SOUZA, H. A. de; DEON, D. S.; MADARI, B. E. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions in Savannah agrosystems. *Australian journal of crop science*, n. 14(12):2020, p. 1970–1976, 2020. DOI 10.21475/ajcs.20.14.12.2846. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.20.14.12.2846>.

OLIVEIRA, P. H. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; SALES, M. V. S. Litter and soil-related variation in functional group abundances in cacao agroforests using structural equation modeling. *Ecological indicators*, v. 84, p. 254–262, 2018. DOI 10.1016/j.ecolind.2017.08.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.030>.

PAES, É. C.; DIAS, F. P. M.; FERNANDES, I. O.; PEREIRA, E. G.; DE LIMA, J. M.; ALCOFORADO, P. A. U. G.; NÓBREGA, R. S. A.; NÓBREGA, J. C. A. Different soil management systems promote improvements in nutrient content and litter input. *Journal of sustainable forestry*, v. 40, n. 5, p. 528–538, 2021. DOI 10.1080/10549811.2020.1788953. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10549811.2020.1788953>.

PIMENTEL, C. R.; PAULETTO, D.; RÊBELO, A. G. de M.; SILVA, A. F. da; PELEJA, V. L.; PALOMINO, E. C. Produção, acúmulo e decomposição de serapilheira em três sistemas agroflorestais no Oeste do Pará. *Advances in Forestry Science*, v. 8, n. 1, p. 1291–1300, 2021. DOI 10.34062/afs.v8i1.10523. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v8i1.10523>.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, v. 386, n. 114900, p. 114900, 2021. DOI 10.1016/j.geoderma.2020.114900. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>.

QUANDT, A.; NEUFELDT, H.; GORMAN, K. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps. *Current opinion in environmental sustainability*, v. 60, n. 101244, p. 101244,

2023. DOI 10.1016/j.cosust.2022.101244. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>.

REIS, V. R. R.; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; GARCIA, U. S.; CANTANHÊDE, I. S. de L.; MORAES REGO, C. A. R. de; COSTA, J. B.; MARQUES, E. D. O.; (B). Soil chemical attributes under crop-livestock-forest integration system and in different land uses in Mata dos Cocais region. *Journal of agricultural science*, v. 10, n. 4, p. 370, 2018. DOI 10.5539/jas.v10n4p370. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v10n4p370>.

REIS, V. R. R.; DEON, D. S.; MUNIZ, L. C.; SILVA, M. B. e.; REGO, C. A. R. de M.; GARCIA, U. S.; CANTANHÊDE, I. S. de L.; COSTA, J. B.; (A). Carbon stocks and soil organic matter quality under different of land uses in the maranhense Amazon. *Journal of agricultural science*, v. 10, n. 5, p. 329, 2018. DOI 10.5539/jas.v10n5p329. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v10n5p329>.

RIBEIRO, J. M.; FREITAS, I. C. de; BRITO, B. G. S. e.; FERNANDES, L. A.; LEITE, L. F. C.; BARBOSA, D. L. de A.; SANTOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral system as a potential model for increasing soil carbon stocks: a century model approach. *Revista brasileira de ciencia do solo*, v. 47, 2023. DOI 10.36783/18069657rbc20220136. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbc20220136>.

RODRIGUES, C. O. D.; ARAÚJO, S. A. do C.; VIANA, M. C. M.; ROCHA, N. S.; BRAZ, T. G. dos S.; VILLELA, S. D. J. Light relations and performance of signal grass in silvopastoral system. *Acta scientiarum. Animal sciences*, v. 36, n. 2, p. 129, 2014. DOI 10.4025/actascianimsci.v36i2.22398. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asas/a/zK8Kx9WBYw4fz6VrFjNZQ3K/?lang=en>. Acesso em: 6 maio 2024.

SACRAMENTO, J. A. A. S. do; ARAÚJO, A. C. de M.; ESCOBAR, M. E. O.; XAVIER, F. A. da S.; CAVALCANTE, A. C. R.; OLIVEIRA, T. S. de. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Revista brasileira de ciencia do solo*, v. 37, n. 3, p. 784–795, 2013. DOI 10.1590/s0100-06832013000300025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbc/a/V8sfqxNnshzp9JhzbptvNkH/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 7 maio 2024.

SANTOS, D. C., GUIMARÃES JÚNIOR, R.; VILELA, L.; MACIEL, G. A.; FRANÇA, A. F. S. Implementation of silvopastoral systems in Brazil with *Eucalyptus urograndis* and *Brachiaria brizantha*: Productivity of forage and an exploratory test of the animal response. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, v.266, p. 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.017>.

SANTOS, C. A. dos; OLIVEIRA, A. F. de; MOREIRA, E. D. S.; GONÇALVES, L. C.; VIANA, M. C. M.; GONTIJO NETO, M. M.; LANA, Â. M. Q. Influence of shade on productivity and nutritional value

of *Urochloa decumbens* in silvopastoral systems using different spatial arrangements of eucalyptus cultivars. *Tropical grasslands-Forrajes tropicales*, v. 11, n. 2, p. 169–182, 2023. DOI 10.17138/tgft(11)169-182. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.17138/tgft\(11\)169-182](http://dx.doi.org/10.17138/tgft(11)169-182).

SANTOS, R. S.; ZHANG, Y.; COTRUFO, M. F.; HONG, M.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAMIAN, J. M.; CERRI, C. E. P. Simulating soil C dynamics under intensive agricultural systems and climate change scenarios in the Matopiba region, Brazil. *Journal of environmental management*, v. 347, n. 119149, p. 119149, 2023. DOI 10.1016/j.jenvman.2023.119149. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119149>.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES. [s. d.]. Eco.br. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SILVA, H. R. da; SOUSA FERREIRA, J. L.; CALIL, F. N. SERAPILHEIRA ACUMULADA DE EUCALIPTO EM SISTEMA INTEGRADO DE LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA. *Revista Agrotecnologia - Agrotec*, v. 9, n. 2, p. 74, 2018. DOI 10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v9n2p72-80. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v9n2p72-80>.

SOARES, M. B.; FREDDI, O. da S.; MATOS, E. da S.; TAVANTI, R. F. R.; WRUCK, F. J.; DE 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, n. 104279, p. 104279, 2020. DOI 10.1016/j.catena.2019.104279. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104279>.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 32, n. 1, 2010. DOI 10.4025/actasciagron.v32i1.926. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.926>.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R.; BERNARDI, A. C. C.; MARTIN-NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Soil & tillage research*, v. 211, n. 105001, p. 105001, 2021. DOI 10.1016/j.still.2021.105001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.105001>.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; LANG, B.; VON LÜTZOW, M.; MARIN-SPIOTTA, E.; VAN WESEMAEL, B.; RABOT, E.; LIESS, 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 10.1016/j.geoderma.2018.07.026. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>.

#### **4 ARTIGOS**

##### **4.1 Artigo 1 - Dinâmica de decomposição da serapilheira arbórea e influência nos estoques de carbono e fertilidade do solo sob sistema silvipastoril**

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico Agriculture, Ecosystems & Environment.

## **Artigo 1 - Dinâmica de decomposição da serapilheira arbórea e influência nos estoques de carbono e fertilidade do solo sob sistema silvipastoril**

### **RESUMO**

Este estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica da serapilheira, os efluxos de CO<sub>2</sub>, a fertilidade e os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em sistema integrado de produção agropecuária, comparando os resultados obtidos com dois sistemas de referência: pastagem nominal e vegetação nativa, no Cerrado brasileiro. Foram avaliados cinco tratamentos, compostos por três pontos de amostragem no sistema silvipastoril (SSP), sendo um entre as árvores do renque duplo de eucalipto (P1) e dois pontos nas aleias distantes 2,5 (P2) e sete metros (P3) do renque; e duas áreas de referência, sendo a primeira uma pastagem nominal (PN) e a segunda a vegetação nativa de Cerrado (VN). A serapilheira do eucalipto foi coletada, mensalmente, ao longo de um ano, com uso de coletores de serapilheira, enquanto a taxa de decomposição foi estimada, avaliando a massa remanescente em *litterbags* no mesmo período. Amostras de solo foram coletadas, em camadas até 50 cm de profundidade, para avaliação da densidade, fertilidade e teores e estoques de C e N do solo. As taxas de decomposição diferiram, em função da distância da árvore no sistema silvipastoril, com tempo de meia vida de 224 dias em P1, 279 dias em P2 e 203 dias em P3. A maior retenção de umidade em P1 e maiores temperatura e intensidade luminosa em P3 foram responsáveis pela decomposição mais acelerada nesses locais. Adicionalmente, a disposição e o espaçamento das linhas de plantio do componente arbóreo no sistema silvipastoril influenciaram, na dinâmica de decomposição da serapilheira, uma vez a manutenção da umidade do solo perto da árvore acelerou a decomposição da serapilheira e elevou os efluxos de CO<sub>2</sub>, permitindo também maior radiação fotossintética no meio da aleia. A entrada de serapilheira contribuiu com a manutenção dos teores de K e P no sistema silvipastoril, uma vez que o sistema ficou sem reposição de nutrientes via adubação química a partir dos cinco anos de condução. Os estoques de C e N foram semelhantes entre o sistema silvipastoril e a pastagem nominal, evidenciando que o incremento desses estoques, em sistemas de integração agropecuária, é diretamente influenciado pelas operações de manejo e condução dos seus componentes, desde a condução da lavoura e das forrageiras até a colheita da madeira no final do ciclo de produção.

**Palavras-chave:** deposição de serapilheira; efluxo de CO<sub>2</sub>; integração pecuária-floresta; intensidade luminosa.

## **Dynamics of decomposition of tree litter and influence on carbon stocks and soil fertility under silvopastoral systems**

### **ABSTRACT**

This study aimed to evaluate the dynamics of litter, CO<sub>2</sub> effluxes, fertility and soil carbon (C) and nitrogen (N) stocks, in an integrated agricultural production system, comparing the results obtained with two reference systems: nominal pasture and native vegetation, in the Brazilian Cerrado. Five treatments were evaluated, consisting of three sampling points in the silvopastoral system (SSP), being one between the trees of the double eucalyptus row (P1) and two points in the alleys 2.5 (P2) and seven meters (P3) away from the row; and two reference areas, the first being a nominal pasture (PN) and the second being native Cerrado vegetation (VN). Eucalyptus litter was collected monthly over the course of a year using litter collectors, while the decomposition rate was estimated by evaluating the remaining mass in litterbags during the same period. Soil samples were collected in layers up to 50 cm deep to assess soil density, fertility, and C and N contents and stocks. Decomposition rates differed according to the distance from the tree in the silvopastoral system, with a half-life time of 224 days in P1, 279 days in P2, and 203 days in P3. The greater moisture retention in P1 and higher temperature and light intensity in P3 were responsible for the faster decomposition in these locations. Additionally, the arrangement and spacing of the planting rows of the tree component in the silvopastoral system influenced the dynamics of litter decomposition, since maintaining soil moisture near the tree accelerated litter decomposition and increased CO<sub>2</sub> effluxes, also allowing greater photosynthetic radiation in the middle of the alley. The input of litter contributed to the maintenance of K and P contents in the silvopastoral system, since the system was left without nutrient replacement via chemical fertilization after five years of conduction. The C and N stocks were similar between the silvopastoral system and nominal pasture, showing that the increase in these stocks, in integrated agricultural systems, is directly influenced by the management and conduction operations of their components, from the management of crops and forage to the harvesting of wood at the end of the production cycle.

**Keywords:** litter deposition; CO<sub>2</sub> efflux; livestock-forest integration; light intensity.

### 4.1.1 Introdução

Com o aumento da concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, vários países se comprometeram, durante a 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP21), em Paris, a adotar medidas, para limitar o aumento médio da temperatura global a 1,5°C (WMO, 2018). Para atingir essas metas, os solos desempenham um papel fundamental, como o maior reservatório de carbono terrestre, atuando como um sumidouro potencial de carbono, em longo prazo e contribuindo para a redução das emissões de GEE na atmosfera. (Lal, 2016; Wehrle *et al.*, 2022).

A implementação de sistemas integrados de produção agropecuária é uma estratégia, para a recuperação de áreas degradadas, pelo fato do seu impacto positivo na qualidade físico-química do solo, como a melhora na fertilidade e o estoque de carbono (C) e nitrogênio (N), principalmente nas camadas superficiais, uma vez que elevam a quantidade de matéria orgânica do solo (MOS) (Ramakrishnan, *et al.*, 2020; Vásquez *et al.*, 2021; Olaya-Montes *et al.*, 2021).

Dado ao papel do solo como fonte e reserva de C, o uso de componentes arbóreos em pastagem interfere na ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária. Essa interferência pode variar, em função dos arranjos adotados, conforme os espaçamentos entre as árvores, em virtude da maior deposição de serapilheira e da exposição à radiação solar, que interferem na decomposição dos detritos vegetais depositados (Moreira *et al.*, 2018).

A definição da modalidade e do arranjo do sistema integrado a ser utilizado depende do contexto socioeconômico e ambiental da propriedade rural. Assim, estudos são necessários, para auxiliar nos processos de tomada de decisão e políticas, para promover a gestão sustentável dos sistemas integrados (Lecegui *et al.*, 2022), usando estratégias para aumentar o C do solo e contribuir com a mitigação das emissões de GEE para a atmosfera (Sarto *et al.*, 2020).

Neste estudo, testamos a hipótese de que o componente arbóreo, em sistema integrado de produção agropecuária com baixo nível de manejo cultural, promove uma variabilidade na dinâmica de decomposição da serapilheira, com manutenção da fertilidade e dos estoques de C e N do solo. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar dinâmica da serapilheira, os efluxos de CO<sub>2</sub>, a fertilidade do solo e os estoques de C e N do solo, em sistema integrado de produção agropecuária, comparando os resultados obtidos com dois sistemas de referência: pastagem nominal e vegetação nativa, no município de Francisco Sá/MG.

### 4.1.2 Material e Métodos

#### 4.1.2.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais (16° 38'44,02" S e 43° 42' 43,77" O) (Figura 1). O solo da área foi classificado como Cambissolo Háptico eutrófico de textura argilosa (Almeida *et al.*, 2021). A altitude média da área é de 590 m, e o relevo é plano e está localizado em uma área de transição entre Cerrado e Floresta

Estacional Semidecidual. A temperatura média é de 23,4 °C, enquanto a precipitação média é de 1.105 mm. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é Aw com estações bem definidas, apresentando verão quente e úmido e inverno frio e seco.

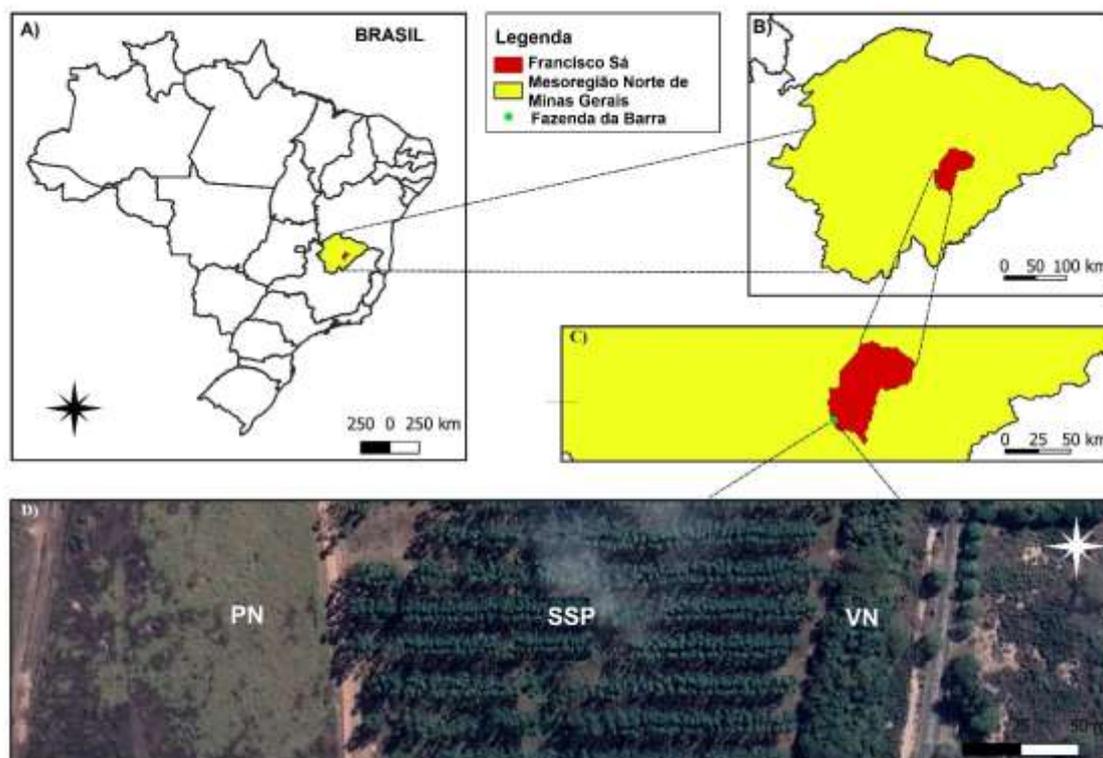


Figura 1. Localização da Fazenda da Barra e representação da área experimental, no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.

#### 4.1.2.2 Histórico de uso da terra

Em 1998, 10 ha de vegetação nativa foi convertida à pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Marandu (capim-marandu), sendo utilizada por 13 anos para bovinocultura de leite. A partir de 2011, não houve manejo da área e a pastagem foi gradualmente substituída pela vegetação espontânea, diminuindo a produtividade da forrageira. Em 2012, 3,2 ha da área foi convertida em sistema agrossilvipastoril, formado por renques duplos de eucalipto (espaçamento de 2x3m) e espaçamento de 14 m entre os renques (aleias), sendo 1,6 ha com eucalipto Urograndis (*E. urophylla* x *E. grandis*) — área utilizada para o presente estudo — e 1,6 ha com eucalipto Cloeziana. Em dezembro do mesmo ano, foi plantado o sorgo (*Sorghum bicolor*) nas aleias, o qual foi colhido, em maio de 2013, para silagem. Após a análise de solo, procedeu-se à aplicação de 190 g cova<sup>-1</sup> de fosfato natural reativo. A adubação de arranque consistiu na aplicação de 120 g planta<sup>-1</sup> de NPK (formulado 6-30-6) com micronutrientes (boro, zinco e cobre). As adubações de cobertura, no primeiro e segundo anos, também foram realizadas com NPK + micronutrientes nas mesmas dosagens citadas anteriormente. Em novembro de 2013, houve a ressemeadura do sorgo, juntamente com o plantio

de capim-marandu. A segunda colheita de sorgo para silagem foi realizada, em abril de 2014 e a pastagem não teve boa formação pelo longo período de estiagem.

Em novembro de 2014, realizaram-se uma gradagem pesada, ressemeadura do capim-marandu e a desrama do eucalipto. A partir dessas operações de manejo, o arranjo do sistema integrado de produção foi mantido com eucalipto e capim-marandu. A sequência dessas operações pode ser visualizada na Figura 2.



Figura 2. Histórico de mudança do uso do solo na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.

A partir de 2015, a gramínea do sistema integrado foi manejada apenas com roçadas no período chuvoso, sem reposição de nutrientes via adubação química, causando assim falhas nas aleias de plantio, com faixas de solo exposto. O componente arbóreo, após esse período, também não teve operações de desrama, desbastes seletivos nem controle de pragas e doenças. A área de pastagem utilizada como referência e, localizada de forma lateralizada ao sistema integrado de produção, também foi conduzida apenas com roçadas no período chuvoso, não sendo realizadas adubações de manutenção. Porém, em função do aumento da precipitação entre os anos de 2020 e 2022, em relação aos seis anos anteriores, a pastagem obteve maior volume de forragem e passou a ser classificada como pastagem nominal. Dentro do silvipastoril e da pastagem nominal, foram rotacionados, anualmente, durante o período chuvoso, uma média de 15 bezerros e 10 vacas adultas por mês (4,34 UA/ha instantânea).

#### 4.1.2.3 Descrição dos Tratamentos

Para a condução deste estudo, foram considerados os sistemas de uso e manejo do solo descritos a seguir:

- Vegetação nativa (VN): área de referência, caracterizada por vegetação típica de áreas de transição entre Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual. A relação das espécies encontradas na área de VN foi: *Deguelia costata*, *Talisia esculenta*, *Senna multijuga*, *Senna spectabilis*, *Anadenanthera macrocarpa*, *Machaerium stipitatum*, *Machaerium scleroxylon*, *Machaerium sp.*, *Aspidosperma sp.*, *Senegalia polyphylla*, *Aspidosperma sp. 2*, *Astronium urundeuva*, *Pterogyne nitens*, *Piptadenia viridiflora*, *Sclerolobium sp.*

- Pastagem nominal (PN): área cultivada com pastagem de *Urochloa brizantha*, manejada ocasionalmente com roçadas e com baixa lotação de animais durante período seco.

- Sistema Silvipastoril (SSP): com renque duplo e com nove anos de idade, utilizando o híbrido eucalipto *urograndis* (*E. urophylla* x *E. grandis*) consorciado com capim-marandu (*Urochloa brizantha*), no espaçamento (2 x 3 m) + 14m.

Para as amostragens de solo no SSP, foram selecionados três pontos, em função da distância dos renques de eucalipto, sendo o primeiro entre as árvores de eucalipto (P1), o segundo a 2,5m de distância da árvore (P2) e o terceiro a 7m de distância da árvore (P3). Já para a análise da serapilheira, foram selecionados pontos de influência do componente arbóreo, no sistema integrado, levando em consideração a projeção da copa das árvores. Foram eles: entre as árvores de eucalipto (P1), a 1m de distância da árvore (P2) e a 4m de distância da árvore (P3). Foram utilizadas cinco repetições para cada ponto (Figura 3A).

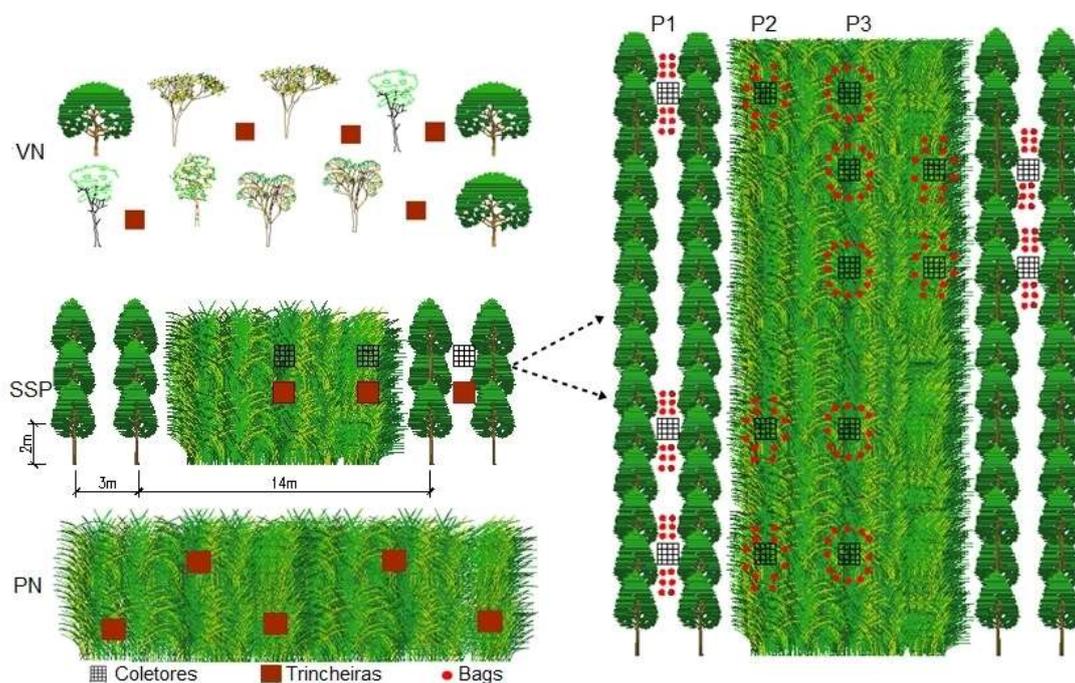


Figura 3. Esquema de amostragem do solo, intensidade luminosa e efluxo de CO<sub>2</sub> (A) e de serapilheira (B), na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. VN: vegetação nativa; PN: pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril. Pontos: P1, no renque, entre as árvores de eucalipto; P2: localizado a 2,5 m (A) e 1 m (B) de distância do renque de eucalipto e; P3: localizado a 7 m (A) e 4 m (B) de distância do renque de eucalipto.

#### 4.1.2.4 Variáveis ambientais

A intensidade luminosa da radiação fotossintética ativa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foi avaliada mensalmente por meio do aparelho ceptômetro (AccuPAR LP 80, Decagon Devices). A intensidade foi medida a 30 cm de altura a cada uma hora, sendo a primeira hora às 9h e a última às 16h e, com a média desses valores, obteve-se o valor médio para cada mês de amostragem. As medições foram realizadas na VN, PN e nos três pontos do SSP.

Para ajudar explicar a decomposição da serapilheira, nos três pontos do SSP, foram avaliados mensalmente a temperatura do solo (com um termômetro do solo) e a umidade superficial do solo (a 5 cm de profundidade).

#### 4.1.2.5 Produção e decomposição da serapilheira proveniente do componente arbóreo

Foram instalados, em fevereiro de 2022, coletores de serapilheira de 0,16 m<sup>2</sup> (0,4 x 0,4 m), com fundo de tela de nylon de malha de 1 mm e altura de 50 cm da superfície do solo para a avaliação da serapilheira aérea do eucalipto no SSP. Os coletores foram fixados, em três pontos dentro do SSP (P1, P2, P3), com cinco repetições cada, totalizando 15 coletores (Figura 3B).

A serapilheira interceptada foi coletada mensalmente entre os meses de março de 2022 e fevereiro de 2023, e os teores de macro e micronutrientes estão apresentados na Tabela 1. Após cada coleta, realizou-se a separação da serapilheira em folhas, caule, material reprodutivo (MR) e material amorfo (MA: material de origem vegetal ou animal não identificado). Em seguida, as frações foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante. Ao final do período de avaliação, foram determinados a biomassa acumulada de serapilheira (em Mg ha<sup>-1</sup>) e o percentual de cada fração obtida (folha, caule, MR e MA).

Tabela 1. Teores de micro e macronutrientes nas folhas e galhos de eucalipto, em sistema silvipastoril, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.

Tratamento	..... Folhas .....										
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPP1	7,15ns	0,47a	5,54a	8,33a	2,47a	0,73a	0,73ns	119,47ns	5,22ns	888,04ns	26,15ns
SPP2	7,04ns	0,43b	5,04b	8,58a	2,42a	0,72a	0,68ns	114,79ns	5,16ns	945,77ns	25,01ns
SPP3	7,20ns	0,48a	5,41a	7,93b	2,32b	0,74a	0,70ns	116,35ns	5,45ns	966,46ns	24,41ns
CV (%)	7,76	4,43	3,29	3,06	2,94	2,59	10,19	4,66	5,38	6,89	4,75
	..... Galhos .....										
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPP1	1,99ns	0,22b	6,10b	10,43a	2,13a	0,19	1,03a	29,97a	6,07a	715,70a	6,63a
SPP2	1,94ns	0,36a	6,62a	9,40b	1,63c	0,18	1,04a	24,92b	6,03a	630,82b	4,24b
SPP3	1,91ns	0,23b	6,57a	9,12b	1,97b	0,19	0,60b	23,58b	5,06b	722,13a	3,15b
CV (%)	9,27	3,22	3,89	5,00	4,62	5,14	5,76	12,86	4,83	5,71	27,68

SP = sistema silvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 1 metro de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras ou com letras iguais na coluna não apresentam diferença estatística entre si pelo teste t ( $p \leq 0.05$ ).

Para avaliar a decomposição, foram distribuídos, próximos a cada coletor de serapilheira, 12 sacos de nylon (*litterbags*) com 20 x 15 cm e malha de 1 mm, contendo 30 g de serapilheira de eucalipto coletada aleatoriamente no sistema silvipastoril. A coleta dos *litterbags* foi realizada simultaneamente à coleta da serapilheira interceptada pelos coletores, mensalmente. Após cada

coleta, os *litterbags* foram levados ao laboratório, lavados para a retirada do solo, levados para secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65°C (até atingir peso constante), para posterior determinação da massa seca. Logo após, determinou-se a massa remanescente (%) pela equação matemática: massa remanescente (%) = (massa final/massa inicial) x 100. Determinou-se também a taxa de decomposição (K), por meio da equação:  $C = C_0 e^{-kt}$  em que: C: massa final das amostras;  $C_0$ : massa inicial; t: tempo decorrido na experimentação; e k: constante de decomposição (PARDO et al., 1997). Por fim, obteve-se o tempo necessário, para a decomposição de 50% ( $t_{0,5}$ ) da serapilheira, com a seguinte equação:  $t_{0,5} = \ln 2/k$ ; em que:  $t_{0,5}$ : período de meia vida ou período necessário para que 50% da biomassa seja transformada (Costa e Atapattu, 2001).

#### **4.1.2.6 Efluxos de CO<sub>2</sub> do solo entre os diferentes usos e manejos do solo**

Os efluxos de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foram determinados mensalmente, utilizando-se campânula (modelo ADC Soil Hood) fixada sobre o solo, acoplada ao equipamento portátil IRGA (Infra Red Gas Analyser). As avaliações foram realizadas, nas proximidades de cada coletor de serapilheira (Figura 3B) e, também, em cinco pontos aleatórios nas áreas de referência: pastagem nominal e vegetação nativa. O fluxo de água ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e a temperatura superficial (°C) também foram determinadas em cada avaliação.

#### **4.1.2.7 Amostragem e preparação de amostras de solo**

Em fevereiro de 2022, foram coletadas amostras do solo em trincheiras, nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 cm, com cinco repetições na mata nativa e na pastagem. No sistema silvipastoril, foram cinco repetições, para cada ponto de amostragem (P1, P2, P3), totalizando 15 trincheiras (Figura 3A). Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar e passadas por peneiras de 2 mm. Amostras até 30 cm de profundidade (0–5, 5–10, 10–20, 20–30) foram separadas para análises químicas e físicas do solo. Após o preparo inicial, foram removidas as raízes e as amostras foram maceradas e passadas por peneiras de 0,150 mm para determinar os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT). Também foram coletadas amostras indeformadas para a determinação da densidade aparente do solo.

#### **4.1.2.8 Avaliação da fertilidade e densidade do solo**

As análises para a fertilidade do solo foram realizadas de acordo com a metodologia de Teixeira, *et al.* (2017). A densidade aparente do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (anéis de aço inoxidável  $\pm$  5cm de diâmetro) para todas as profundidades avaliadas (Teixeira, *et al.*, 2017).

#### **4.1.2.9 Determinação dos teores e estoques de Carbono e Nitrogênio do solo**

Os teores de COT, NT foram obtidos por combustão seca, utilizando um analisador elementar (Leco CN-2000®, St. Joseph, MI, EUA) que determina o teor de carbono por absorção de infravermelho e o nitrogênio por condutividade térmica. Com os valores obtidos, calculou-se a relação C/N de cada amostra de solo.

Para calcular os estoques de carbono (EC) e nitrogênio (EN), em Mg ha<sup>-1</sup>, foi necessário multiplicar o teor de CT ou NT (%) pela densidade aparente do solo (g cm<sup>-3</sup>) e pela espessura da camada de solo desejada (cm). Posteriormente os valores foram corrigidos para mesma massa de solo da vegetação nativa (área de referência), de acordo com a metodologia proposta por Ellert e Bettany (1996) e Moraes *et al.*, (1996).

#### **4.1.2.10 Análise estatística**

Para descrever o padrão de decomposição da serapilheira, foram utilizados modelos lineares generalizados (glm). Para descrever o padrão de deposição de serapilheira e os materiais constituintes da serapilheira (caules, folhas, material amorfo e material reprodutivo), foram geradas análises de componentes principais.

Para proceder à análise do efluxo de CO<sub>2</sub> e intensidade luminosa, foram geradas séries temporais e foram realizados testes de normalidade e homogeneidade das variâncias. Para os dados que não atenderam os pressupostos da ANOVA, foram aplicados os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Dunn-Bonferroni, ao nível de significância de 5%.

Os dados de solo referentes à densidade e atributos químicos (pH, P, Ca, Mg, K, Al, C, N, densidade, CTC e V%) foram analisados por métodos estatísticos multivariados por camada de solo (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm), utilizando-se a análise de componentes principais.

Para comparar os estoques de C e N entre os diferentes sistemas de uso do solo e pontos amostrais dentro dos sistemas integrados, foi realizada a análise de variância, com cinco repetições e delineamento inteiramente casualizado. As médias foram comparadas utilizando o teste t (LSD) a 5% de significância. Todas as análises foram realizadas no R Core Team (2023).

### **4.1.3 Resultados e Discussão**

#### **4.1.3.1 Variáveis ambientais**

A precipitação média anual, para a mesorregião Norte do Estado de Minas Gerais, obtida pela estação Montes Claros-A506, próximo à área de estudo, no período de fevereiro de 2022 a março de 2023, foi de 955,40 mm (Figura 4). Os três meses com maiores volumes de chuvas foram novembro/2022, dezembro/2022 e janeiro/2023, com precipitação de 266,40 mm, 252,40 mm e 314,00 mm, respectivamente. Não houve registro de precipitação, nos meses de junho, julho e agosto de 2022 e março de 2023 e baixos volumes também foram observados nos meses de março de 2022 (1,2 mm) e fevereiro de 2023 (2,60 mm).

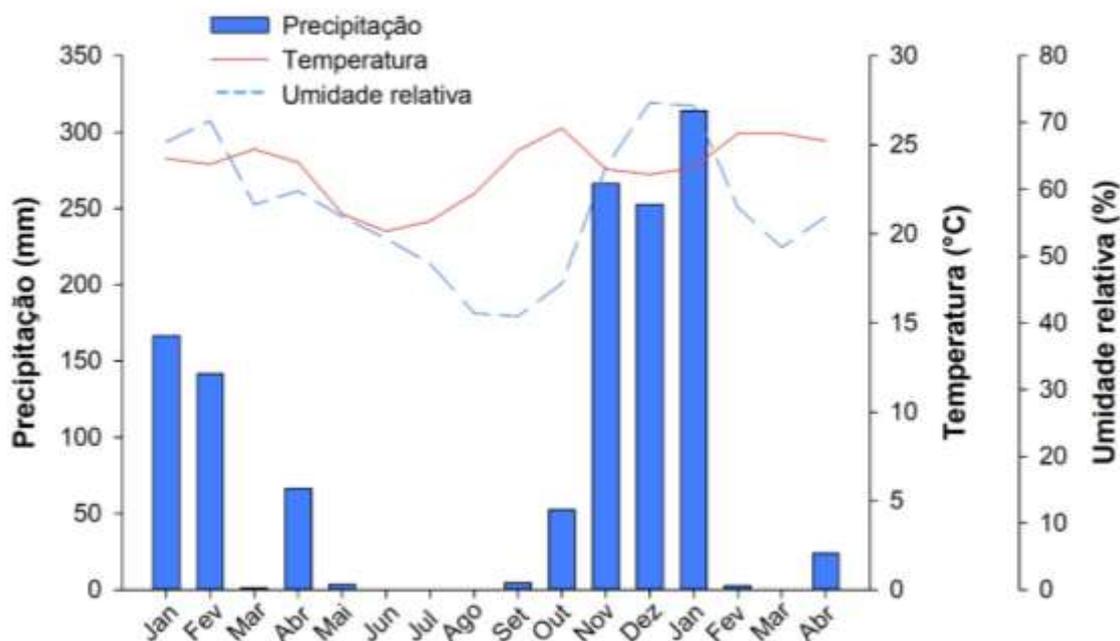


Figura 4. Médias mensais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, coletadas da estação climática automática de Montes Claros, MG, localizada próxima à Fazenda da Barra, município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.

A temperatura média anual do ano de 2022, obtida pela mesma estação que a precipitação anual, foi de 23 °C (Figura 4). Os meses de maio a julho de 2022 foram os mais frios, com temperaturas variando entre 20,13 °C e 20,72 °C. O mês de outubro foi o que obteve a maior temperatura, apresentando 25,92 °C. Com exceção de janeiro (23,73 °C), os meses iniciais de 2023 apresentaram média de temperatura superior a 25°C. A umidade relativa do ar média anual foi de 56,41%. Os meses de fevereiro, dezembro e janeiro de 2023 foram os mais úmidos, enquanto agosto, setembro e outubro do mesmo ano foram os meses mais secos.

O aumento da precipitação, umidade e da temperatura do solo elevam a atividade microbiana e a respiração do solo, influenciando assim na degradação da serapilheira; essas condições fornecem um ambiente mais favorável para o crescimento e metabolismo dos microrganismos decompositores (Almeida et al., 2021).

A intensidade luminosa variou entre os pontos P1 e P3 no sistema silvipastoril, com médias entre 237,44  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  e 423,04  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , respectivamente (Figura 5). Os maiores valores de intensidade para o P1 foram em setembro (427,8  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e março (361,32  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ), enquanto os menores ocorreram em maio, junho e julho (74  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , 117,90  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  e 98,40  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ). A média de intensidade luminosa para o sistema silvipastoril foi de 328,00  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ . Esse valor foi superior ao da VN (110  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e inferior à PN (1037,22  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) para o período de avaliação.

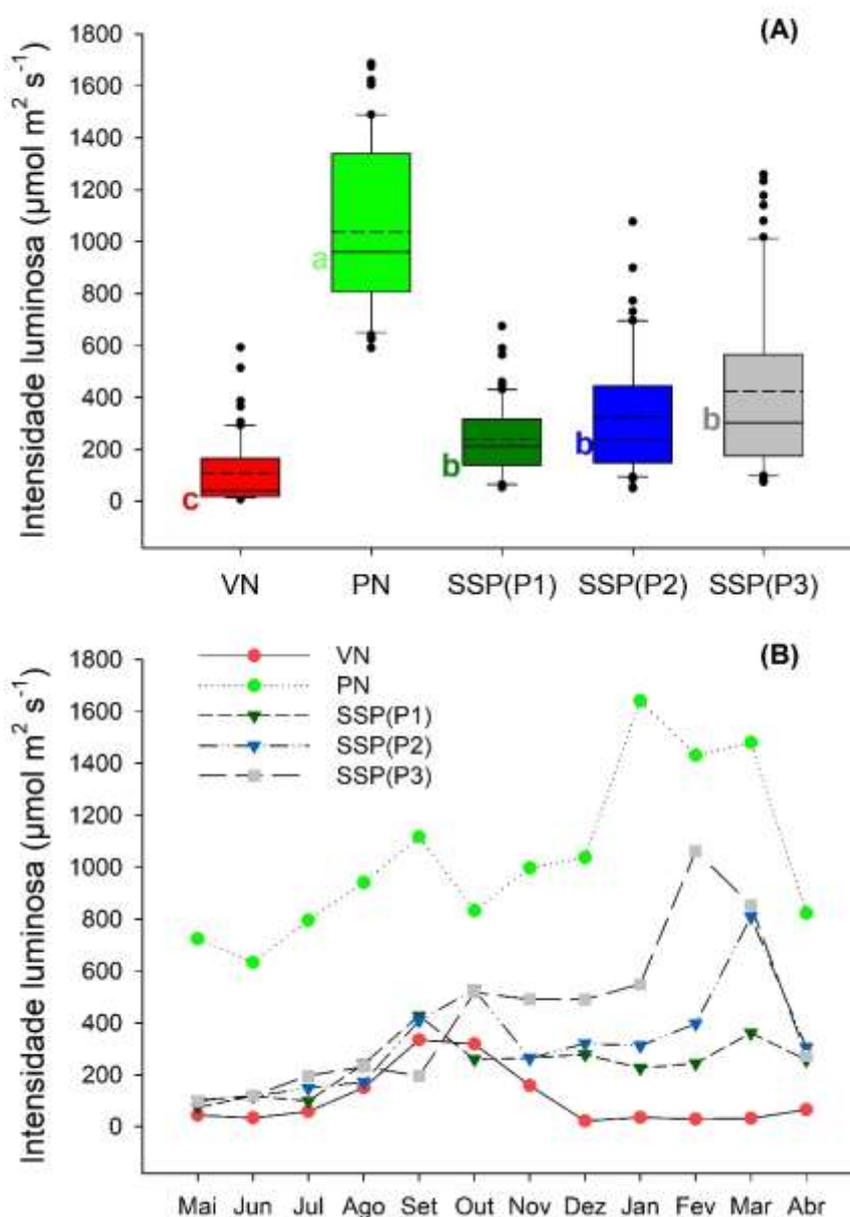


Figura 5. Intensidade luminosa anual (A) e mensal (B), nos sistemas de manejo avaliados no Município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. NV: Vegetação nativa; NP: Pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril (P1): ponto localizado entre as árvores do renque; (P2): ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; (P3): ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Tratamentos com letras diferentes foram estatisticamente distintos pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn-Bonferroni ao nível de significância de 5%. Linhas tracejadas, ao lado das letras do teste de médias no Boxplot, representam as médias.

Os maiores valores de intensidade luminosa para o SP foram observados em outubro (434,70  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ), fevereiro (567,37  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e março (674,852  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) do ano de 2023 e as menores em maio (92,12  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ), junho (118,23  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) e julho (147,70  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) (Figura

5B). Isso se deve ao posicionamento leste-oeste das linhas de eucalipto e à inclinação da terra, em relação ao sol no verão e no inverno, que otimizam a captura de luz solar no sistema (Carvalho *et al.*, 2020).

O padrão de resposta da intensidade luminosa para VN foram maiores no período de agosto a novembro e variaram entre  $150,45 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  e  $334,48 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , enquanto os menores valores nesse sistema foram observados em junho, dezembro, fevereiro e março, variando entre  $22,23 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  e  $33,70 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ . Esses resultados se devem à característica da floresta semidecídua que tem sua estação seca e chuvosa bem definida, ocorrendo assim perda da maior parte das folhas das árvores no período seco, permitindo, dessa maneira, maior entrada de luz na VN nessa estação. Já a PN obteve as maiores intensidades em janeiro, fevereiro e março de 2023, com valores de  $1640,93 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $1430,10 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  e  $1480 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , e os menores nos meses de maio, junho e julho  $723,23 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $632,20 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  e  $794,98 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ .

#### 4.1.3.2 Produção e decomposição da serapilheira do componente florestal

Observaram-se variações mensais na deposição da serapilheira nos diferentes pontos de amostragem do SP (Figura 6). Em P1, foram obtidos valores médios de deposição de serapilheira de  $5,85 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Já em P2 e P3, a deposição média anual foi de  $5,20$  e  $4,17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente. A deposição aumentou nos meses de março e maio de 2022 e janeiro e fevereiro de 2023, enquanto, no período de junho a dezembro de 2022, houve redução do aporte de serapilheira em os pontos avaliados.

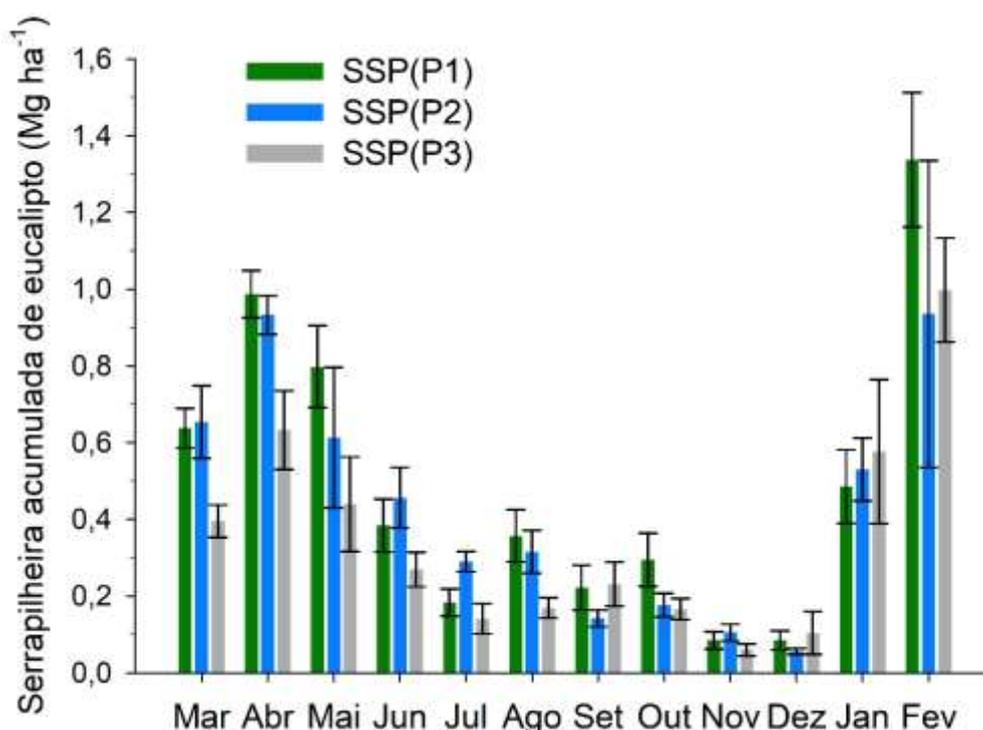


Figura 6. Produção mensal de serapilheira do eucalipto, em sistema integrado de produção agropecuária na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá,

Minas Gerais. SSP(P1): ponto entre as árvores do renque; SSP(P2): ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; e SSP(P3): ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Os valores apresentados referem-se à média ( $n=5$ )  $\pm$  erro-padrão.

Resultado semelhante foi encontrado por Ribeiro *et al.*, (2022), em estudo realizado em SP com menos três anos de idade, no qual foi avaliada a deposição da serapilheira, no renque e no centro da aleia, sendo observados maiores valores para o ponto entre as árvores de eucalipto. A distância do componente florestal é um dos principais fatores que influenciam a deposição de serapilheira e, neste estudo, foram observados aportes semelhantes entre P1 e P2, resultados explicados pela ramificação do componente arbóreo, o que aumentou o aporte de serapilheira no P2. O espaçamento afeta, entre outros fatores, a quantidade e a qualidade da serapilheira que cai dos ramos do eucalipto, quanto mais próximo à árvore maior deposição de resíduos. Portanto a disposição e o espaçamento das linhas de plantio em sistemas consorciados favorecem o ciclo dos nutrientes da serapilheira (Ribeiro *et al.*, 2022).

Em relação à composição do material vegetal acumulado, também houve padrão sazonal quanto às frações Folhas, Caule, Material Reprodutivo (MR) e Material Amorfo (MA) (Figura 7). A fração Folhas apresentou contribuição em massa de serapilheira no total DE 69,20%, seguida do caule, MR e MA, com valores 27,86%, 1,81% e 1,13%, respectivamente.

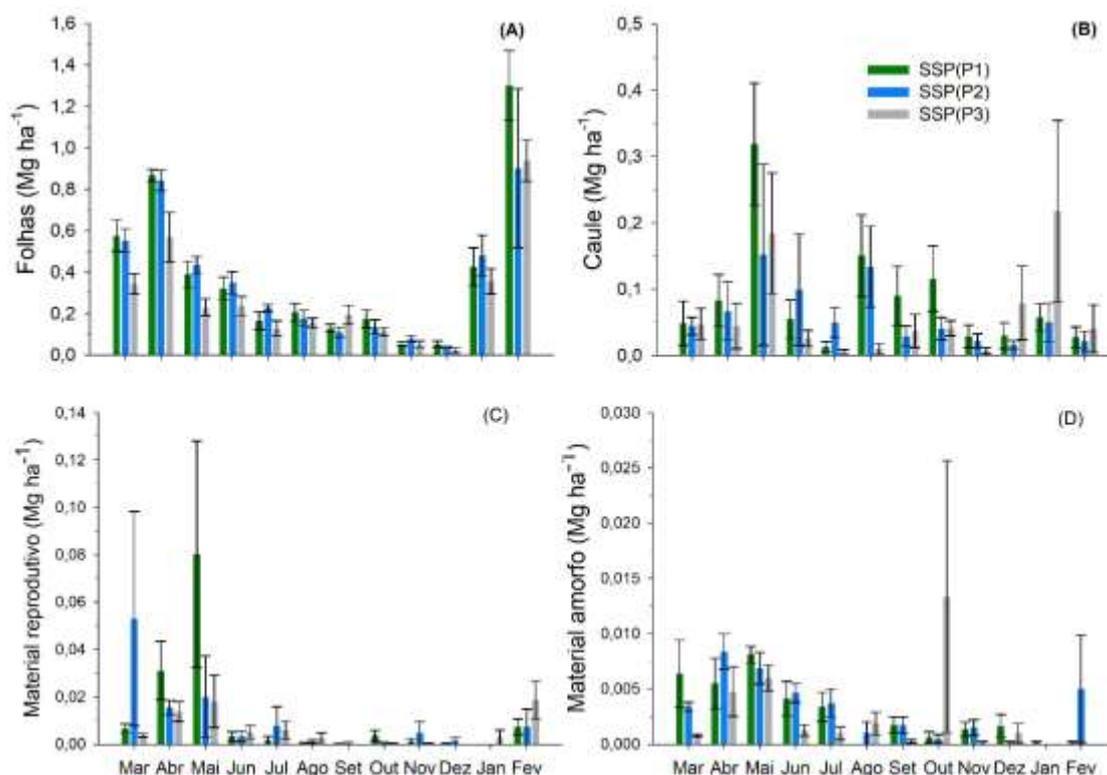


Figura 7. Produção mensal de serapilheira (A: Folhas; B: Caule; C: Material reprodutivo; e D: Material amorfo), em sistema integrado de produção agropecuária, na área experimental da Fazenda da Barra, no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. P1: ponto entre as árvores do renque; P2: ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; e P3: ponto localizado a 4 metros

de distância das árvores do renque. Os valores apresentados referem-se à média ( $n=5$ )  $\pm$  erro-padrão.

A análise de componentes principais explicou 90% da variação dos dados com os dois primeiros componentes (Figura 8). O ponto que apresentou maiores índices de deposição foi o P1. A fração Folhas acompanhou a mesma tendência que a serapilheira acumulada, com maiores valores tanto para o período seco, quanto para o período chuvoso. Já as frações Caule, MR e MA foram maiores no período mais seco, de março a setembro. O P3 não apresentou diferenças para os diferentes períodos e o P2 seguiu a mesma tendência do P1. Com a maior idade do povoamento e do crescimento do eucalipto, há diminuição da luminosidade no sistema que favorece a poda natural (Valadão *et al.*, 2021) e contribui para explicar os maiores volumes das frações Caule e Folhas em P1. O SP tem aporte intensivo de serapilheira pela deposição de galhos finos e folhas, principalmente na estação seca, permitindo maior acúmulo de MO e ativação da microbiota do solo (Almeida *et al.*, 2021). Adicionalmente, a falta de manejo das árvores influenciou no aporte de serapilheira, pois a desrama foi conduzida apenas nos três anos iniciais, gerando maior ramificação das árvores e, conseqüentemente, maior deposição até o P2.

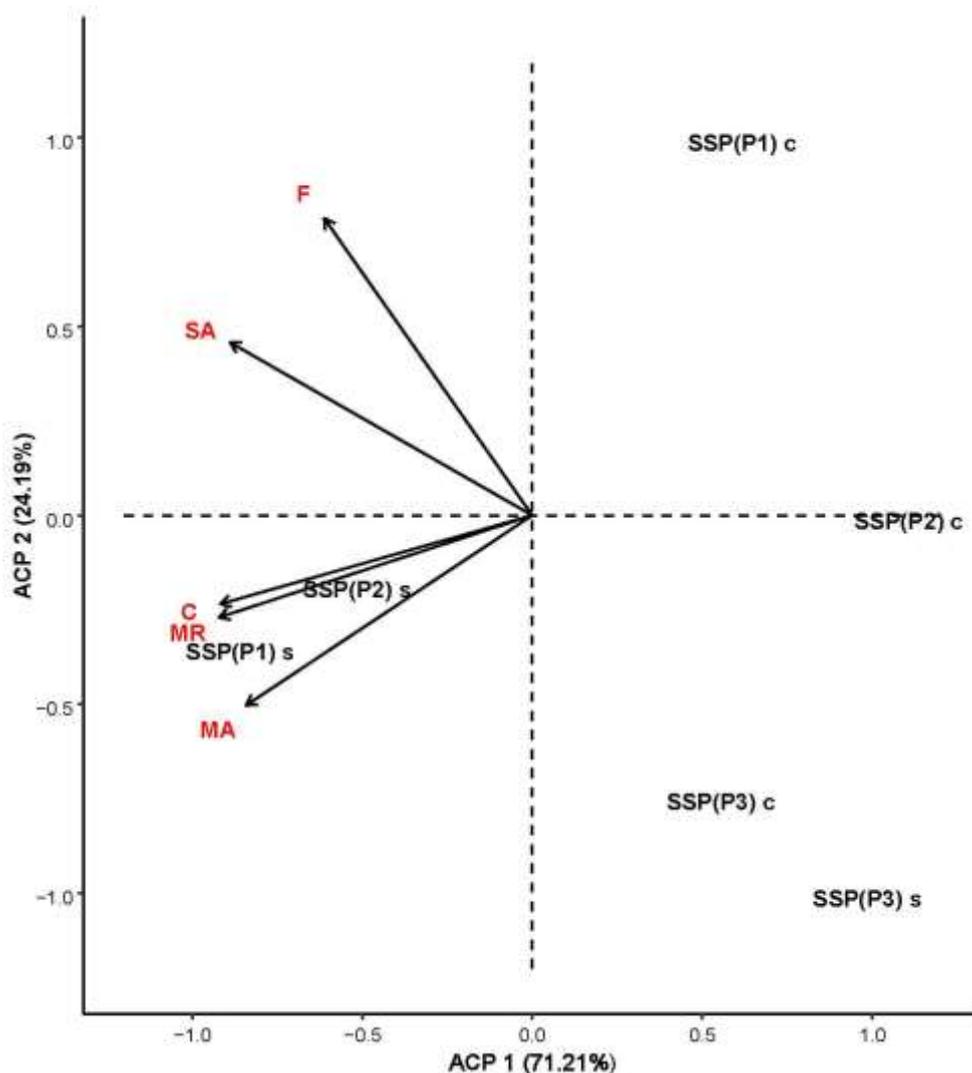


Figura 8. Análise de componentes principais, considerando o total de serapilheira acumulada (SA) e partição em folhas (F), caule (C), material reprodutivo (MR) e material amorfo (MA), em sistema integrado de produção agropecuária, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. C representa o período chuvoso e S o período seco; P1: ponto entre as árvores do renque; P2: ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; e P3: ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque.

Em relação à decomposição da serapilheira, foi acompanhado o padrão de redução de biomassa (% massa remanescente), dentro dos *litterbags*, ao longo do ano de avaliação (Figura 9). Os pontos 3 e 1 apresentaram maiores velocidades de decomposição, com massa final de aproximadamente 28,71% e 32,33%, respectivamente. O ponto 2 teve padrão de decomposição mais lenta, uma vez que, ao final do ano de avaliação, foi observada massa remanescente de 40,44% nos *litterbags*. Esse resultado pode ser explicado pela presença dos animais em P2, uma vez que, nesse ponto, tem boa oferta de forragem e fica mais sombreado que o P3. Sendo assim, o pisoteio animal aumenta a compactação do solo, dificultando a atividade microbiológica. Pode-se verificar pela massa remanescente de serapilheira que a decomposição, influenciada pelas variáveis ambientais, com maior intensidade de decomposição no período chuvoso (Figura 4), favoreceu a ação dos microrganismos do solo.

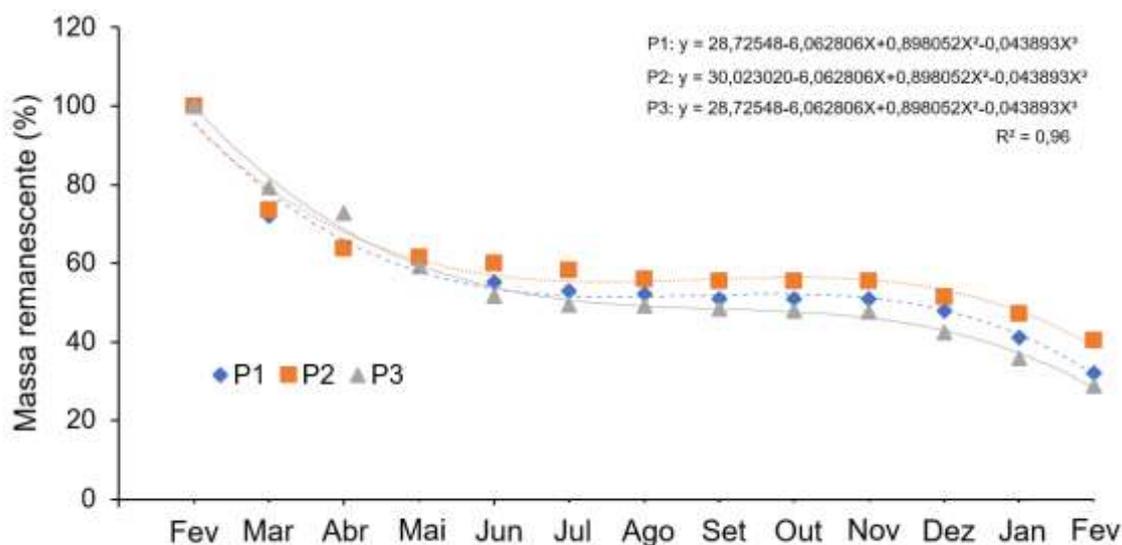


Figura 9. Curva de decomposição de serapilheira, em sistema integrado de produção agropecuária, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais. P1: ponto entre os eucaliptos, no renque; P2: ponto localizado a 1 m de distância do renque e; P3: ponto localizado a 4 m de distância do renque.

No P1 observou-se grande deposição de serapilheira (Figura 6) e também foi observado maior teor umidade do solo. Esses fatores contribuem para a decomposição do material vegetal. O ponto 3 tem a maior intensidade luminosa e temperatura do solo e isso tem influência direta na decomposição, pois favorece a atividade microbiológica (Ribeiro *et al.* 2022). As taxas de

decomposição (K) foram semelhantes entre os pontos 1 e 3, com valores de 0,00309 e 0,00342 g g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, com tempo necessário de meia vida para decomposição (T<sub>0,5</sub>) de 224 dias para o ponto P1 e 203 dias para o ponto P3. Já o ponto P2 apresentou menor valor da constante K (0,00248 g g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>) e maior tempo de meia-vida para decomposição do material (279 dias).

É comum que a decomposição da serapilheira seja mais lenta, em áreas com a presença do eucalipto, uma vez que há, em sua composição, a presença de pequenos galhos, material que possui mais lignina em sua composição bioquímica. A lignina é formada por compostos de degradação mais difícil com a maior complexidade e arranjo da molécula sendo considerada um composto fenólico. Isso favorece o acúmulo de MO sobre o solo, elevando os estoques de nutrientes na serapilheira, o que proporciona maior eficácia na ciclagem dos nutrientes. Além disso, maior conteúdo de MOS favorece também a capacidade de absorção e retenção de água e nutrientes, melhorando a saúde do solo (Carvalho *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020).

#### 4.1.3.3 Efluxos de CO<sub>2</sub> do solo

No sistema silvipastoril, os maiores efluxos de CO<sub>2</sub> do solo foram observados em ponto P1 (Figura 10A), nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com valores de 4,735 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 6,798 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e 3,778 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente. Em P2 os maiores efluxos de CO<sub>2</sub> foram no período chuvoso (novembro a janeiro), sendo observados, respectivamente, 2,521 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 3,629 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e 3,994 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>. Padrão similar de resposta foi encontrado também em P3. A VN apresentou os maiores efluxos de CO<sub>2</sub> entre os meses de novembro e fevereiro (3,316 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 4,371 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; 9,424 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e 4,106 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente), enquanto, na PN, os maiores valores foram encontrados entre novembro e janeiro (Figura 10B).

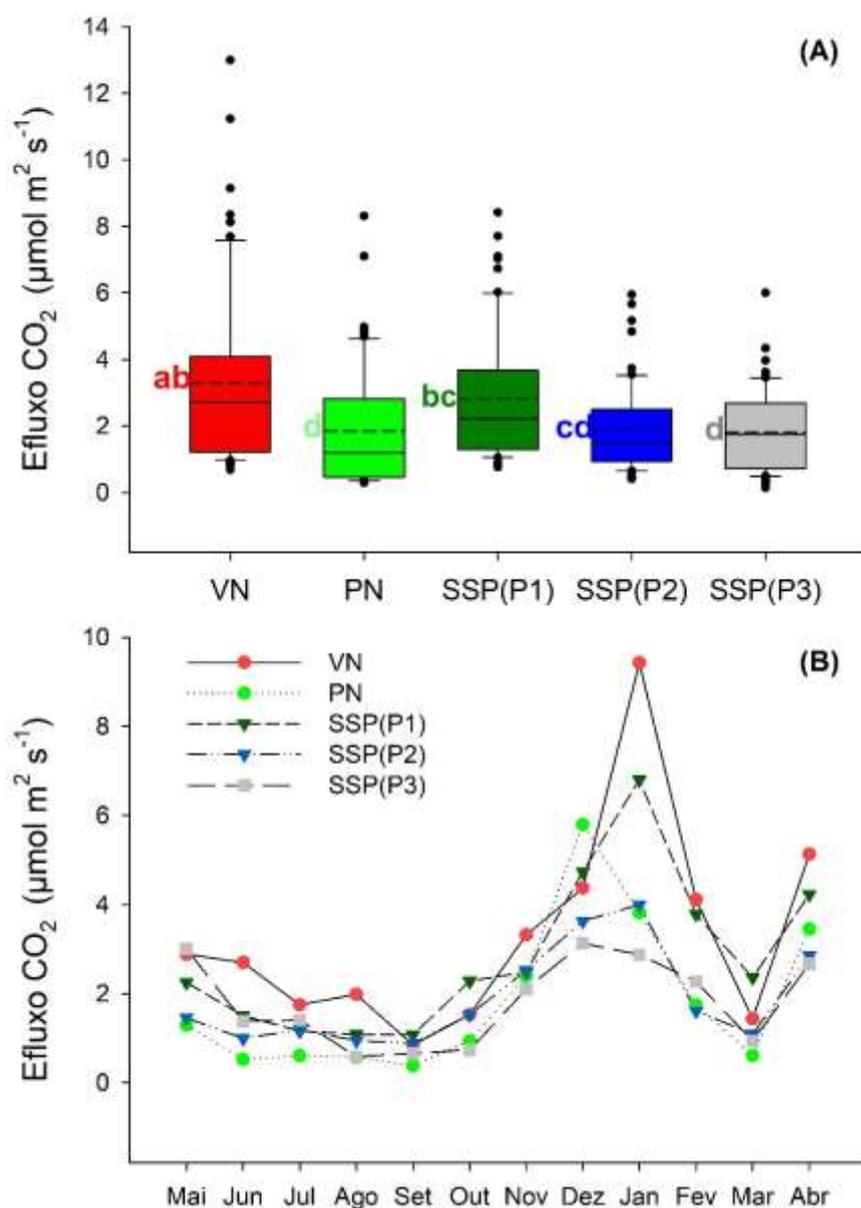


Figura 10. BoxPlot (A) e série temporal (B) do efluxo de CO<sub>2</sub> entre os sistemas de manejo avaliados, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no Município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. NV: Vegetação nativa; NP: Pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril (P1): ponto localizado entre as árvores do renque; (P2): ponto localizado a 1 metro de distância das árvores do renque; (P3): ponto localizado a 4 metros de distância das árvores do renque. Tratamentos com letras diferentes foram estatisticamente distintos pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn-Bonferroni ao nível de significância de 5%. Linhas tracejadas, ao lado das letras do teste de médias no Boxplot, representam as médias.

Os efluxos de CO<sub>2</sub> foram maiores, no período chuvoso, para todos tratamentos avaliados. Em P1, as árvores de eucalipto estão próximas, com maior influência do sombreamento sobre o solo, maior conteúdo radicular e deposição de resíduos (Figura 6). Os valores obtidos em P2 e P3

foram semelhantes à PN, uma vez que, nesses pontos, há menos influência do sombreamento. A presença de material vegetal sobre o solo favorece a manutenção da umidade e da temperatura do solo (Shvaleva *et al.*, 2014). Esse fato explica os maiores efluxos de CO<sub>2</sub> em VN e em P1, uma vez que possuem mais resíduos na cobertura do solo e também de raízes finas e grossas. Essa biomassa das raízes desempenha papel importante, na redução da emissão dos GEE, na conservação do solo, na ciclagem de nutrientes e nos estoques de carbono (Silva *et al.*, 2020). Fatores bióticos e abióticos influenciam o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, principalmente temperatura, umidade do solo, biomassa de raízes e manejo, pois favorecem a decomposição da matéria orgânica, por meio da atividade dos microrganismos do solo (Koncz *et al.*, 2015; Sun e Chang, 2019; Sanna *et al.*, 2021).

Os fluxos de água e a temperatura do solo mensurados com o IRGA foram similares entre os três pontos avaliados, dentro do sistema integrado, ao longo do ano, com maiores valores de umidade nos meses de outubro, novembro e dezembro, com temperatura do solo constante (Figura 11).

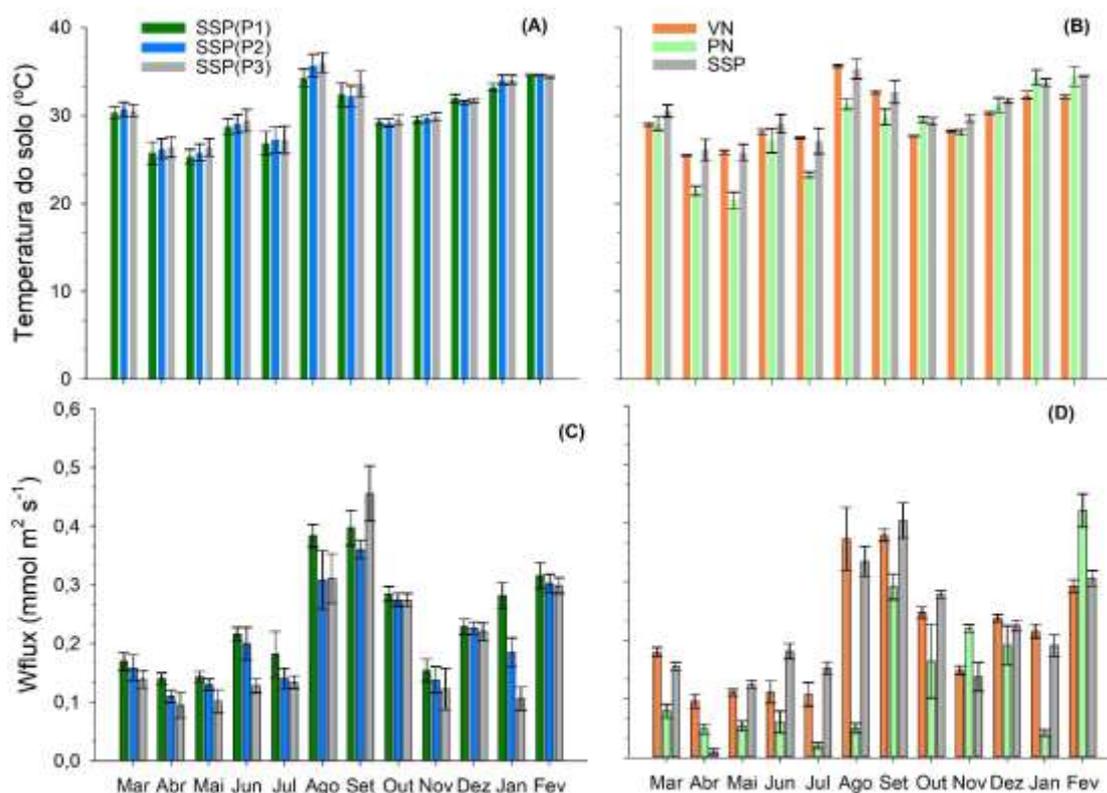


Figura 11. Temperatura do solo e fluxo de água (Wflux), nos pontos de amostragem do sistema silvipastoril (A; C) e nos diferentes usos do solo (B; D), respectivamente, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais. VN: vegetação nativa; PN: pastagem nominal e SSP: sistema silvipastoril (P1: entre as árvores de eucalipto; P2: a 1m de distância da árvore de eucalipto e P3: a 4m de distância da árvore de eucalipto), Os valores apresentados referem-se à média (n=5)  $\pm$  erro-padrão.

Ao comparar a temperatura e o Wflux entre os sistemas, PN apresentou valores inferiores ao sistema silvipastoril e a VN (Figura 12). Os meses com maior umidade foram aqueles com maiores efluxos de CO<sub>2</sub>. Esses resultados corroboram com os obtidos por Shvaleva *et al.*, (2014); Santos *et al.*, (2018) e Sanna *et al.*, (2021). Para esses autores, a umidade do solo foi o principal fator de influência no efluxo de CO<sub>2</sub>, o que também foi observado neste estudo. Os microrganismos decompõem a matéria orgânica do solo, liberando CO<sub>2</sub> como subproduto. O ambiente mais úmido proporciona condições favoráveis, para o crescimento e atividade microbiana e de raízes, culminando em aumento das emissões de CO<sub>2</sub>.

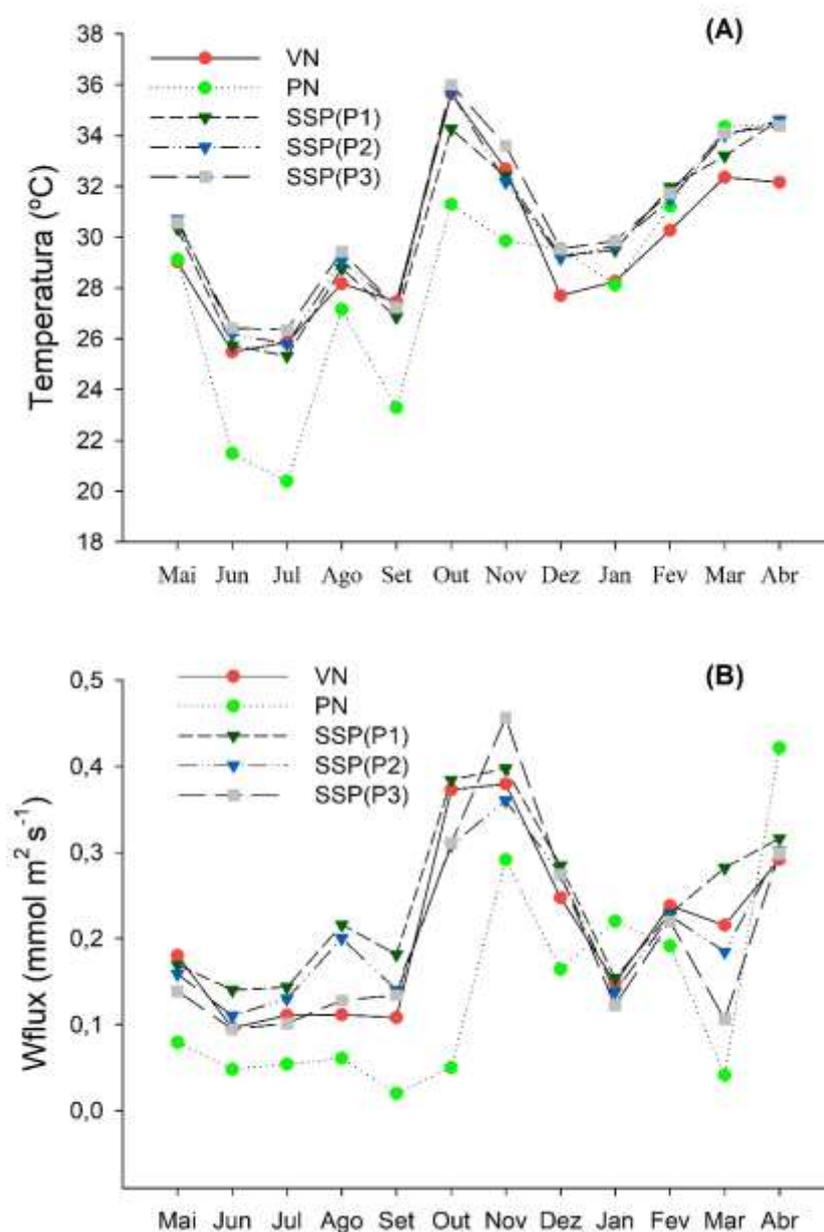


Figura 12. Temperatura e fluxo de água (Wflux) mensal, nos pontos de amostragem do sistema silvipastoril (A; C) e nos diferentes usos do solo (B; D), respectivamente, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. Na PN: pastagem

nominal; VN: vegetação Nativa e no sistema silvipastoril (P1: ponto entre os eucaliptos, no renque; P2: ponto localizado a 1 m de distância do renque e; P3: ponto localizado a 4 m de distância do renque).

#### 4.1.3.4 Atributos de fertilidade e densidade do solo

Os resultados dos teores de nutrientes e densidade do solo podem ser visualizados na Tabela 2. A análise dos componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2) explicaram mais de 80% da variabilidade dos atributos de solo para todas as camadas avaliadas (Figura 13). Para os teores de Ca, C, N e CTC, maiores teores foram apresentados para a VN, em todas as profundidades, visto que essas foram as variáveis com maior contribuição para a análise do solo (Tabela 2, Figura 13). A densidade também influenciou diretamente nos resultados obtidos, exceto na camada de 5-10 cm de profundidade (Figura 13B), única camada que não teve correlação negativa desse atributo com Ca, C, N e CTC. Esses resultados permitiram inferir que o aumento da densidade do solo reduz a sua fertilidade. Em relação aos teores de Mg e V (%), os maiores valores também foram observados na VN, resultado influenciado pela falta de adubação e reposição de nutrientes em SP e PN. Os teores de Al, P e K foram maiores, nas duas primeiras camadas do solo, para o ponto P3 e, nas duas camadas mais profundas para o P1. A entrada de nutrientes via serapilheira (Tabela A.1) contribuiu com esses resultados. A densidade do solo apresentou valores diferentes de acordo com a camada amostrada. Na camada de 0-5 cm (Figura 13A) e na camada de 20-30 (Figura 13D) cm, foram encontrados maiores valores para o P2 e para a pastagem, enquanto, na camada de 10-20 cm, a densidade foi maior para o P3.

A densidade foi maior no ponto P2 para a camada de 0-5 cm de profundidade (Figura 13A). Esse resultado pode ser explicado pelo maior pisoteio dos animais nesse ponto, uma vez que possui maior oferta de forragem e sombra promovida pelo eucalipto. Diniz *et al.*, (2021) avaliaram o comportamento animal e constataram que as vacas preferem locais sombreados, de forma que a frequência das vacas, em pleno sol, foi 62% menor que aquelas que escolheram as áreas sombreadas do sistema.

Tabela 2. Densidade e atributos químicos de um Cambissolo Háplico eutrófico, sob diferentes usos do solo, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.

Uso do solo	Prof (cm)	Ds g cm <sup>-3</sup>	pH	P -- mg dm <sup>-3</sup> --	K	Ca	Mg	Al	t	V	M.O.
VN	0-5	1,1±0,1	5,5±0,1	2,8±0,4	0,6±0,2	7,1±1,1	1,7±0,6	0,0±0,0	9,4±1,7	76,6±7,0	4,8±0,6
VN	5-10	1,4±0,1	5,7±0,1	1,3±0,1	0,5±0,2	5,2±0,6	1,6±0,4	0,0±0,0	7,4±1,1	69,6±4,4	4,5±1,4
VN	10-20	1,4±0,1	5,8±0,2	0,8±0,1	0,5±0,1	4,5±1,0	1,4±0,4	0,1±0,1	6,5±1,1	64,1±7,0	3,3±0,5
VN	20-30	1,3±0,0	5,8±0,1	0,6±0,2	0,4±0,1	3,6±1,0	1,1±0,2	0,2±0,2	5,4±1,0	63,3±3,4	2,4±0,6
PN	0-5	1,5±0,0	5,4±0,1	1,7±0,4	0,5±0,2	4,2±0,4	1,1±0,3	0,0±0,0	5,9±1,0	69,4±5,0	3,3±0,7
PN	5-10	1,5±0,0	5,4±0,1	1,0±0,2	0,4±0,2	3,7±0,2	1,1±0,1	0,0±0,1	5,2±0,2	65,6±4,5	2,7±0,4
PN	10-20	1,5±0,0	5,5±0,1	0,9±0,2	0,4±0,2	3,7±0,6	0,9±0,2	0,1±0,1	5,0±0,3	61,5±6,0	2,2±0,2
PN	20-30	1,5±0,0	5,5±0,1	0,9±0,4	0,3±0,2	3,2±0,4	0,6±0,3	0,1±0,1	4,2±0,5	58,5±8,3	1,6±0,4
SPP1	0-5	1,5±0,0	5,7±0,3	1,9±0,5	0,7±0,2	4,3±0,6	1,5±0,3	0,0±0,0	6,5±0,6	72,0±3,0	3,4±0,4
SPP1	5-10	1,5±0,0	5,7±0,2	1,6±0,2	0,7±0,2	3,6±1,0	0,9±0,3	0,1±0,1	5,2±1,0	63,6±6,3	2,7±0,4
SPP1	10-20	1,5±0,0	5,8±0,2	1,4±0,2	0,7±0,2	3,3±1,1	0,7±0,2	0,2±0,2	4,8±1,1	59,6±9,6	2,2±0,4
SPP1	20-30	1,5±0,1	5,9±0,2	1,5±0,7	0,5±0,1	3,0±1,2	0,5±0,2	0,3±0,5	4,5±1,6	57,0±11,3	1,8±0,5
SPP2	0-5	1,5±0,1	5,4±0,2	3,3±0,4	0,7±0,2	4,5±0,6	1,1±0,4	0,0±0,0	6,3±1,1	66,1±8,6	2,9±0,3
SPP2	5-10	1,5±0,0	5,5±0,1	2,1±0,6	0,6±0,2	3,9±1,0	0,7±0,2	0,1±0,1	5,3±1,0	58,4±6,0	2,1±0,3
SPP2	10-20	1,5±0,0	5,6±0,1	1,4±0,6	0,4±0,2	4,2±1,1	0,4±0,1	0,1±0,1	5,1±1,0	60,4±8,0	1,9±0,4
SPP2	20-30	1,5±0,0	5,5±0,2	1,2±0,5	0,4±0,2	3,5±1,0	0,6±0,1	0,1±0,2	4,6±1,0	57,3±12,2	1,3±0,2
SPP3	0-5	1,5±0,0	5,2±0,1	3,7±1,0	0,9±0,3	4,4±1,2	1,0±0,7	0,1±0,2	6,3±2,0	67,1±14,8	3,0±0,5
SPP3	5-10	1,5±0,0	5,2±0,1	3,3±1,3	0,9±0,4	4,1±1,1	0,7±0,4	0,1±0,2	5,7±1,3	61,7±13,1	2,5±0,2
SPP3	10-20	1,5±0,0	5,3±0,1	1,3±0,3	0,7±0,3	4,0±1,1	0,7±0,3	0,1±0,1	5,5±1,4	60,8±11,7	2,2±0,2
SPP3	20-30	1,5±0,0	5,4±0,0	0,8±0,3	0,4±0,2	3,6±1,1	0,5±0,3	0,2±0,2	4,6±1,1	58,4±14,3	1,5±0,3

VN = Vegetação Nativa; PN= Pastagem nominal SPP1= ponto entre as árvores de eucalipto; SPP2 = ponto a 1m de distância da árvore de eucalipto; SPP3 = ponto a 4 m de distância da árvore de eucalipto. Caracterização química realizada de acordo com a metodologia proposta por Embrapa (2017). P: Fósforo (mg dm<sup>-3</sup>); Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; Al: Alumínio trocável; t: CTC efetiva; V%: porcentagem de Saturação por Bases da CTC a pH 7.0.

Vásquez *et al.*, (2021), em estudo comparando os atributos do solo (CTC, V%, pH, P, K, C e MO), em diferentes sistemas integrados, constataram que os solos com a presença do componente florestal apresentaram melhoria na fertilidade do solo. Assim, o componente florestal fornece mais matéria orgânica ao solo, e a decomposição lenta desse material, ao longo do tempo, adiciona nutrientes ao solo (Tabela 1), melhorando sua fertilidade e o sequestro de C, assemelhando-se ao que acontece em um ambiente de vegetação nativa. Neste estudo, a falta de manejo e reposição de nutrientes, no sistema integrado desde 2014, impactou diretamente os resultados obtidos. De acordo com Lecegui *et al.*, (2022), os sistemas silvipastoris são benéficos para o solo e ecossistemas desde que acompanhados por tratamentos silviculturais e manejo adequados do componente arbóreo e da pastagem.

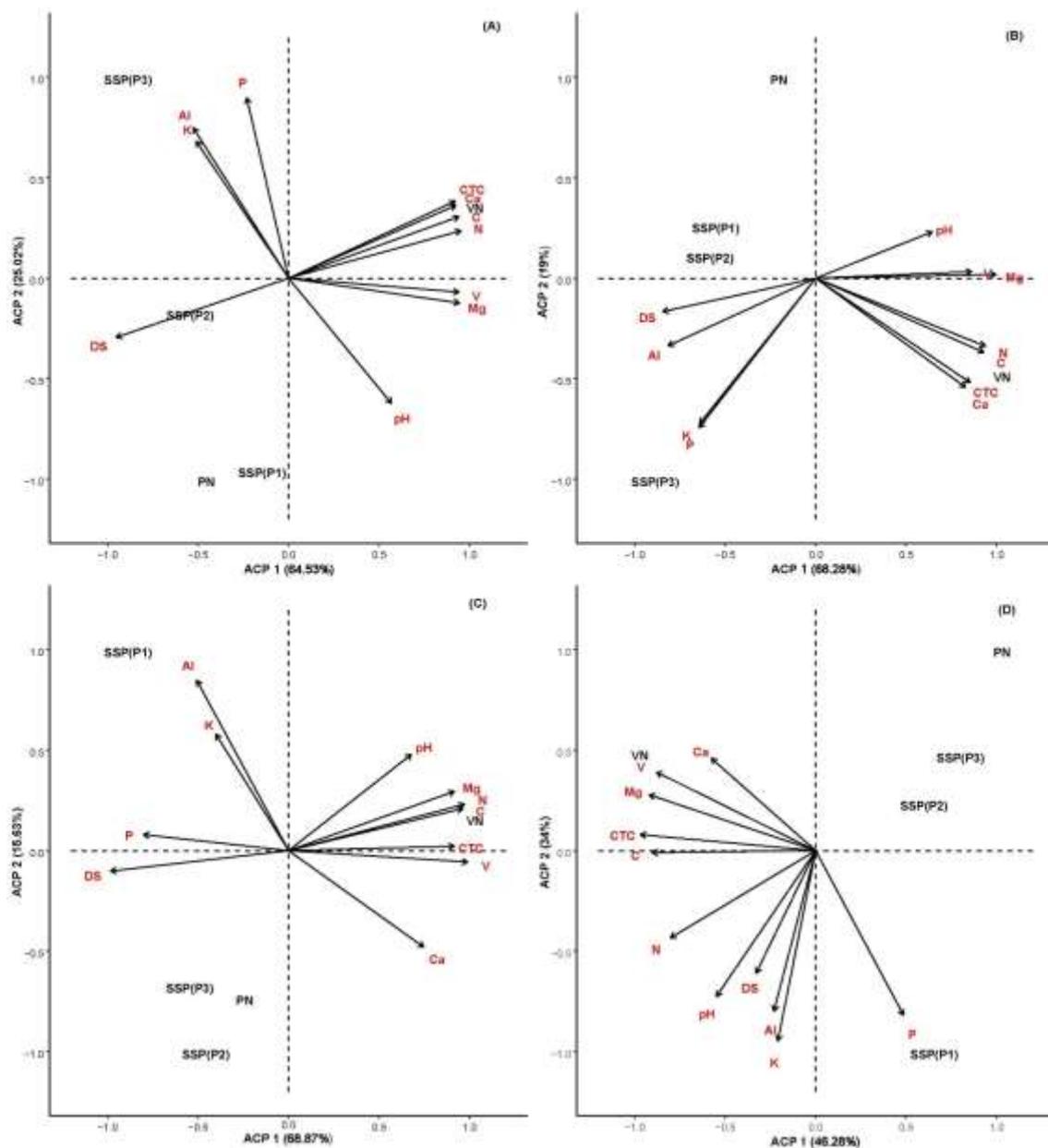


Figura 13. Análise dos componentes principais, considerando os atributos do solo avaliados nas camadas de 0-5 (A), 5-10 (B), 10-20 (C) e 20-30 (D) cm de profundidade, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. PN: pastagem nominal; VN: vegetação nativa e SSP: sistema silvipastoril (P1: ponto entre os eucaliptos, no renque; P2: ponto localizado a 1 m de distância do renque e; P3: ponto localizado a 4 m de distância do renque).

Os resultados encontrados evidenciaram que o sistema silvipastoril, mesmo sem as intervenções de manejo, na fase de produção da pastagem e maior crescimento arbóreo, apresentou maiores teores de P e K, quando comparado com a pastagem nominal, que apresentou maior densidade (Tabela 2), e esse resultado pode ser explicado pela entrada de nutrientes via serapilheira (Tabela 1). Silva-Olaya *et al.*, (2021), após avaliação de sistema silvipastoril com 15 anos de idade, também constataram que os sistemas integrados geraram benefícios à qualidade do

solo, com melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos. Isso mostra que os benefícios desses sistemas podem ficar mais evidentes, em longo prazo, se bem conduzidos e manejados, tornando-se uma importante estratégia para restaurar pastagens degradadas e recuperar a fertilidade do solo.

#### 4.1.3.5 Teores e estoques de Carbono e Nitrogênio do solo

Os teores de C do solo não evidenciaram diferenças entre os pontos de amostragem do sistema integrado. Já para N, o P1 apresentou maiores teores nas camadas de 30-40 e 40-50 (Tabela 3). Adicionalmente, os teores de C e N no SSP foram semelhantes à PN e inferiores à VN. Nas camadas de 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade, não foram observadas diferenças entre os tratamentos avaliados (Tabela 4).

Tabela 3. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá. Minas Gerais. Brasil

Tratamento	Profundidade (cm)						
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	40-50
..... Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) .....							
SSP(P1)	22,1	16,8	15,0	11,7	10,1	8,4	14,0
SSP(P2)	22,1	17,0	15,0	12,0	8,2	7,8	13,7
SSP(P3)	21,9	17,7	14,2	10,3	8,3	7,3	13,3
CV (%)	25,3	15,4	23,6	26,2	19,1	21,8	17,2
..... Teor de N (g kg <sup>-1</sup> ) .....							
SSP(P1)	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1a	1,1a	1,4
SSP(P2)	1,9	1,6	1,4	1,2	0,9b	0,9b	1,3
SSP(P3)	1,8	1,5	1,4	1,1	1,0ab	1,0ab	1,3
CV (%)	23,7	13,9	20,4	14,6	8,9	8,9	11,5

SSP = sistema silvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 7 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Os teores de C e N do solo, em todos os tratamentos avaliados, diminuíram em profundidade. Maiores valores de C, encontrados nas camadas superficiais, são esperados por causa da maior quantidade de MO na superfície do solo, a qual contribui para aumentar a infiltração e armazenamento de água no solo, porosidade e aeração. Almeida *et al.*, (2021), em estudo realizado nessa mesma área, mas com quatro anos de idade de SSP, verificaram incremento de C, no sistema silvipastoril, quando comparado com o estrato regenerante. No entanto a ausência de manejo do sistema silvipastoril e o reestabelecimento da pastagem no estrato regenerante, com maiores volumes de precipitação, nos últimos dois anos, igualou os valores de C e N nesses dois usos da terra. Como a PN foi reestabelecida, realizando a cobertura do solo, o potencial C da biomassa das gramíneas foi aumentado, porque elas possuem sistemas radiculares extensos e

constantemente renovados, enquanto, no sistema integrado, foi observada presença de solo exposto em alguns locais de pastejo intensivo.

Tabela 4. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá. Minas Gerais. Brasil

Tratamento	Profundidade (cm)						
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	40-50
..... Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) .....							
VN	39,6a	27,2a	21,5a	14,1	9,2	7,4	19,8a
PN	22,9b	17,4b	16,9ab	11,3	8,4	6,9	14,0b
SSP	22,0b	17,2b	14,7b	11,3	8,9	7,8	13,7b
CV (%)	14,9	12,9	18,7	19,5	19,3	18,8	10,3
..... Teor de N (g kg <sup>-1</sup> ) .....							
VN	2,1a	1,8a	2,7a	1,8a	1,3	1,5a	1,9a
PN	1,8ab	1,6b	2,2b	1,6ab	1,2	1,0b	1,5b
SSP	1,6b	1,2c	1,4c	1,1b	1,0	0,9b	1,3b
CV (%)	15,8	9,2	14,6	26,4	32,5	20,7	5,6

VN = Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; SSP = sistema silvipastoril. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Os estoques de C e N apresentaram similaridades entre os sistemas avaliados e entre os pontos amostrados (P1, P2 e P3) no SSP (Figura 14A e 14C; Tabela Suplementar 1), exceto na camada de 30-40 cm de profundidade em que o estoque de N foi maior em P1. Os estoques de C e N na camada de 0-50 cm encontrados no ponto P1 foram (93,2 Mg ha<sup>-1</sup> e 9,3 Mg ha<sup>-1</sup>), seguido pelo P2 (89,9 Mg ha<sup>-1</sup> e 8,8 Mg ha<sup>-1</sup>) e P3 (86,6 Mg ha<sup>-1</sup> e 8,7 Mg ha<sup>-1</sup>) (Tabela suplementar 1). Quando comparados os três usos do solo (Figuras 14B e 14D; Tabela suplementar 2), o estoque de C e N na camada de 0-50 cm de profundidade foi maior em VN (115,4 Mg ha<sup>-1</sup> e 11,3 Mg ha<sup>-1</sup>) e similares na PN e SSP com (92,4 Mg ha<sup>-1</sup> e 8,7 Mg ha<sup>-1</sup>) (89,9 Mg ha<sup>-1</sup> e 8,9 Mg ha<sup>-1</sup>), respectivamente.

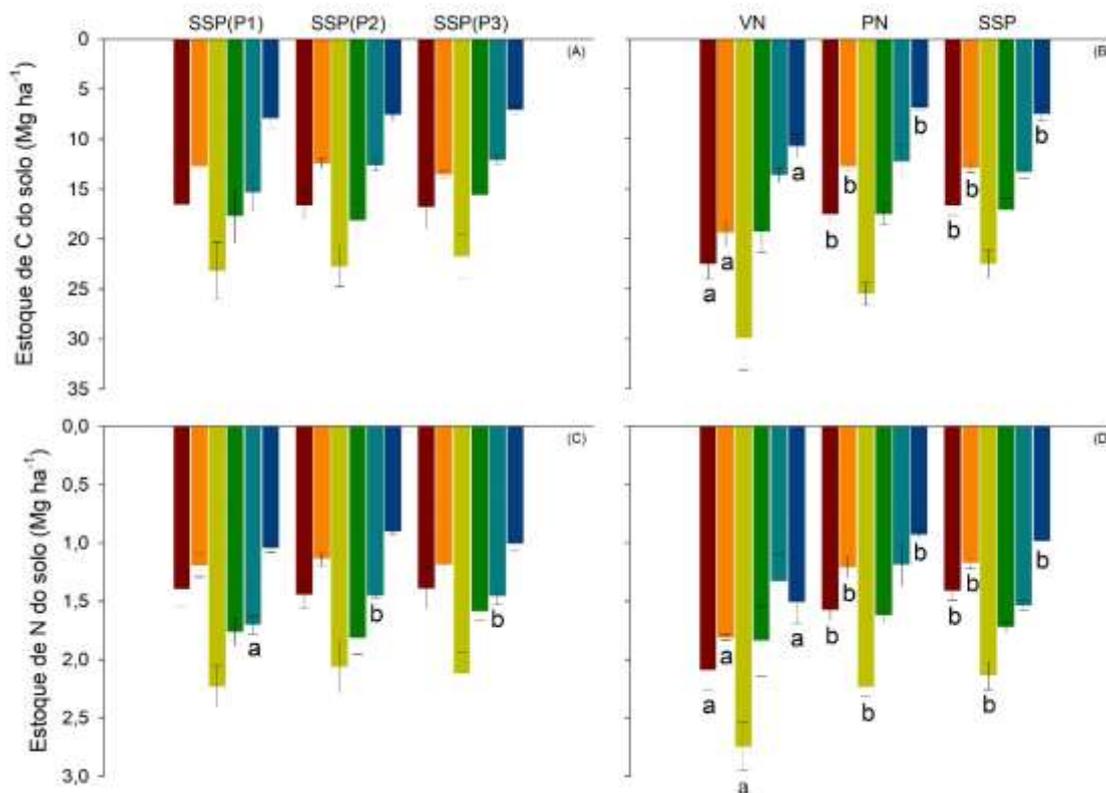


Figura 14. Estoques de carbono (EC) e nitrogênio total (NT) do solo, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. VN: vegetação nativa; PN: pastagem nominal; SSP: sistema silvipastoril (P1: entre às árvores de eucalipto; P2: a 1m de distância da árvore de eucalipto e P3: a 4m de distância da árvore de eucalipto). Barras seguidas de mesma letra ou sem letras para a mesma profundidade não apresentam diferença estatística para o teste t (LSD) a 5% de probabilidade.

Os sistemas de integração são promissores em aumentar os estoques de C e N do solo, principalmente quando tem a presença do componente arbóreo, pois ocorre aumento da produção de serapilheira (Conceição *et al.*, 2017). As diferentes espécies que compõem o sistema silvipastoril contribuem para o maior aporte de matéria orgânica no sistema, melhoram o microclima do solo, aumentam a resistência e resiliência do solo, promovem aumento no estoque de C orgânico, melhorando a qualidade do solo (Oliveira *et al.*, 2016, Guillot *et al.*, 2019, Oliveira *et al.*, 2021). Isso pode ficar mais evidente, em longo prazo, pois, conforme a idade do eucalipto aumenta, há um aumento da disponibilidade de resíduos (Valadão *et al.*, 2021) e aumento do volume de raízes, culminando no aumento dos estoques de C e N no solo (Shvaleva *et al.*, 2014). Adicionalmente, o C que fica sequestrado no fuste do componente arbóreo é responsável pelo sequestro do CO<sub>2</sub> atmosférico (Jacovine *et al.*, 2008). A importância da mudança de uso do solo de áreas de pastagem degradada, para sistemas silvipastoris, pode aumentar os estoques de C do solo, bem como melhorar seus atributos químicos e físicos (Freitas *et al.*, 2022), desde que sejam bem manejados (Varela *et al.*, 2022). Pelo fato da falta de manejo e tratos culturais, a área com sistema integrado

do presente estudo foi sobrecarregada pelo pastejo constante, não aumentando os estoques de C em relação à pastagem nominal. Mudanças no manejo dos componentes, com reposição de nutrientes e tratos culturais, poderão acarretar respostas mais rápidas quanto ao acúmulo de C no solo ao longo do tempo.

#### 4.1.4. Conclusões

A decomposição da serapilheira, proveniente do componente arbóreo do sistema silvipastoril, mesmo sem condução e aplicação contínua de fertilizantes, ao longo do tempo, contribuiu com o aumento dos teores de P e K quando comparado com a pastagem nominal.

A umidade do solo e os efluxos de CO<sub>2</sub> no renque de eucaliptos (P1) do sistema silvipastoril foram maiores, em relação a pastagem e semelhantes à vegetação nativa, o que teve relação direta com a decomposição de serapilheira pela microbiota do solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes.

Os estoques de C e N foram semelhantes entre o sistema silvipastoril e a pastagem nominal, evidenciando que o aumento desses estoques, em sistemas de integração, é diretamente influenciado pelas operações de manejo e condução dos seus componentes.

#### 4.1.5 Referências

Almeida, L.L. de S., Frazão, L.A., Lessa, T.A.M., Fernandes, L.A., Veloso, Á.L. de C., Lana, A.M.Q., de Souza, I.A., Pegoraro, R.F., Ferreira, E.A., 2021. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Res.* 205, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>

Carvalho, H.C. de S., Ferreira, J.L.S., Calil, F.N., Silva-Neto, C.D.M. e., 2019. Estoque de nutrientes na serapilheira acumulada em quatro tipos de vegetação no Cerrado em Goiás, Brasil. *Rev. Ecol. Nutr. Florest. - ENFLO* 7, 06. <https://doi.org/10.5902/2316980x37296>

Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., 2007. *Agricultura e aquecimento global*. Embrapa, 2007. [http://www.aquecimento.cnpem.embrapa.br/bibliografia/agr\\_e\\_aquec\\_Cerri\\_2007.pdf](http://www.aquecimento.cnpem.embrapa.br/bibliografia/agr_e_aquec_Cerri_2007.pdf)

Da Conceição, M.C.G., Matos, E.S., Bidone, E.D., Rodrigues, R.A.R., Cordeiro, R.C., 2017. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. *Region. Agricultural Science* 8, 904–913. <https://doi.org/10.4236/as.2017.89066>

De Costa, W.A.J.M., Atapattu, A.M.L.K., 2001. *Agrofor. Syst.* 51, 201–211. <https://doi.org/10.1023/a:1010772209966>

Deniz, M.; Sousa, K. T.F.; Moro, M.F.; Do Vale, M.M.; Dittrich, J. R.; Machado Filho, L.C.P.; Hötzel, M. J. Social hierarchy influences dairy cows' use of shade in a silvopastoral system under intensive

rotational grazing. *Applied Animal Behaviour Science*, 2021, v.244, p 105467. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2021.105467>

Ellert, B.H., Bettany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75, 529–538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

Ferreira, N.C.F., Ramos, T.V., Ferreira Júnior, R.J. Carvalho, I.A., 2020. Decomposição de serapilheira em mata nativa do bioma Cerrado e *Eucalyptus urograndis* Litter. *Revista de Biotecnologia & Ciência* 9, n.1, 1–8. <https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/10047>

Freitas, I.C. de, Alves, M.A., Magalhães, J.R., Dias, R.F., Albuquerque, C.J.B., Ferreira, E.A., Fernandes, L.A., Pegoraro, R.F., Frazão, L.A., 2022. Soil carbon and nitrogen stocks under agrosilvopastoral systems with different arrangements in a transition area between Cerrado and Caatinga biomes in Brazil. *Agronomy (Basel)* 12, 2926. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122926>

Freitas, I.C. de, Ribeiro, J.M., Araújo, N.C.A., Santos, M.V., Sampaio, R.A., Fernandes, L.A., Azevedo, A.M., Feigl, B.J., Cerri, C.E.P., Frazão, L.A., 2020. Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian cerrado. *Rangeland Ecol. Manage.* 73, 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>

Guillot, E., Hinsinger, P., Dufour, L., Roy, J., Bertrand, I., 2019. With or without trees: Resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. *Soil Biol. Biochem.* 129, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.011>

Koncz, P., Balogh, J., Papp, M., Hidy, D., Pintér, K., Fóti, S., Klumpp, K., Nagy, Z., 2015. Higher soil respiration under mowing than under grazing explained by biomass differences. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 103, 201–215. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9732-3>

Lal, R., 2016. Beyond COP 21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *J. Soil Water Conserv.* 71, 20A-25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20a>

Lecegui, A., Olaizola, A.M., Varela, E., 2022. Disentangling the role of management practices on ecosystem services delivery in Mediterranean silvopastoral systems: Synergies and trade-offs through expert-based assessment. *For. Ecol. Manage.* 517, 120273. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120273>

Moraes, J.F.L., Volkoff, B., Cerri, C.C., Bernoux, M., 1996. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* 70, 63–81. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0).

Moreira, E.D.S., Gontijo Neto, M.M., Lana, Â.M.Q., Borghi, E., Santos, C.A. dos, Alvarenga, R.C., Viana, M.C.M., 2018. Production efficiency and agronomic attributes of corn in an integrated crop-livestock-forestry system. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 53, 419–426. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000400003>

Moreira, G.M., Neves, J.C.L., Magalhães, C.A. de S., Farias Neto, A.L. de, Sauer, G., Silva, J.F.V., Fernandes, R.B.A., 2018. Soil chemical attributes in response to tree distance and sun-exposed faces after the implantation of an integrated crop-livestock-forestry system. *Rev. Árvore* 42. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400005>

Olaya-Montes, A., Llanos-Cabrera, M.P., Cherubin, M.R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F.A., Silva-Olaya, A.M., 2021. Restoring soil carbon and chemical properties through silvopastoral adoption in the Colombian Amazon region. *Land Degrad. Dev.* 32, 3720–3730. <https://doi.org/10.1002/ldr.3832>

Oliveira, J. de C. de, Azevedo, A.M., Ribeiro, J.M., Freitas, I.C., Dias, R.F., Duarte, A.C.S., Melo, P.F., Veloso, Á.L., Frazão, L.A., 2021. Sampling representativeness of soil carbon and physiological parameters of marandu palisadegrass in a tropical silvopastoral system. *Sci. Agric.* 78. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0176>

Oliveira, W.R.D. de, Ramos, M.L.G., Carvalho, A.M. de, Coser, T.R., Silva, A.M.M., Lacerda, M.M., Souza, K.W., Marchão, R.L., Vilela, L., Pulrolnik, K., 2016. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 51, 1501–1510. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900049>

Pardo, F., Gil, L., Pardos, J.A., 1997. Field study of beech (*Fagus sylvatica* L.) and melojo oak (*Quercus pyrenaica* Willd) leaf litter decomposition in the centre of the Iberian Peninsula. *Plant and Soil* 191, n. 1, 89–100. <https://www.jstor.org/stable/42948032>

R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [WWW Document], [s.d.]. URL <https://www.r-project.org/>. (acesso em 3.1.24).

Ramakrishnan, S., Kumar, S., Chaudhary, M., Govindasamy, P., Yadav, M., Prasad, M., Srivastava, R., Kumari, B., Prajapati, K., 2020. Silvopastoral system for resilience of key soil health indicators in semi-arid environment. *Arch. Acker Pflanzenbau Bodenkd.* 1–14. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1814954>

Ribeiro, F.P., Pulrolnik, K., Vilela, L., Gatto, A., 2022. Deposição, decomposição e conteúdo de nutrientes de serapilheira em área de integração lavoura-pecuária-floresta na região do Cerrado. *Pesqui. Florest. Bras.* 42. <https://doi.org/10.4336/2022.pfb.42e201902072>

Sanna, F., Campesi, G., Deligios, P., Ledda, L., Piluzza, G., Sulas, L., Re, G.A., 2021. Combined effects of microenvironment and land use on C fluxes in a Mediterranean agro-silvopastoral system. *Eur. J. Agron.* 130, 126348. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126348>

Santos, D. de C., Guimarães Júnior, R., Vilela, L., Maciel, G.A., França, A.F. de S., 2018. Implementation of silvopastoral systems in Brazil with *Eucalyptus urograndis* and *Brachiaria brizantha*: Productivity of forage and an exploratory test of the animal response. *Agric. Ecosyst. Environ.* 266, 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.017>

Sarto, M.V.M., Borges, W.L.B., Sarto, J.R.W., Pires, C.A.B., Rice, C.W., Rosolem, C.A., 2020. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Appl. Soil Ecol.* 145, 103350. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.012>

Shvaleva, A., Costa e Silva, F., Costa, J.M., Correia, A., Anderson, M., Lobo-do-Vale, R., Fangueiro, D., Bicho, C., Pereira, J.S., Chaves, M.M., Skiba, U., Cruz, C., 2014. Comparison of methane, nitrous oxide fluxes and CO<sub>2</sub> respiration rates from a Mediterranean cork oak ecosystem and improved pasture. *Plant Soil* 374, 883–898. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1923-6>

Silva-Olaya, A.M., Olaya-Montes, A., Polanía-Hincapié, K.L., Cherubin, M.R., Duran-Bautista, E.H., Ortiz-Morea, F.A., 2021. Silvopastoral systems enhance soil health in the Amazon region. *Sustainability* 14, 320. <https://doi.org/10.3390/su14010320>

Sun, S., Lei, H., Chang, S.X., 2019. Drought differentially affects autotrophic and heterotrophic soil respiration rates and their temperature sensitivity. *Biol. Fertil. Soils* 55, 275–283. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01347-w>

Tadini, A.M., Xavier, A.A.P., Milori, D.M.B.P., Oliveira, P.P.A., Pezzopane, J.R., Bernardi, A.C.C., Martin-Neto, L., 2021. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Soil Tillage Res.* 211, 105001. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105001>

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Valadão, M.B.X., Carneiro, K.M.S., Inkotte, J., Ribeiro, F.P., Rodrigues, M.I., Hodecker, B.E.R., Miguel, E.P., Gatto, A., 2021. Litter layer removal and implications on decomposition in a Eucalyptus stand in the Cerrado. *Sci. For.* 49. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.08>

Varela, E., Olaizola, A.M., Blasco, I., Capdevila, C., Lecegui, A., Casasús, I., Bernués, A., Martín-Collado, D., 2022. Unravelling opportunities, synergies, and barriers for enhancing silvopastoralism in the Mediterranean. *Land Use Policy* 118, 106140. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106140>

Vásquez, H.V., Valqui, L., Bobadilla, L.G., Arbizu, C.I., Alegre, J.C., Maicelo, J.L., 2021. Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon* 7, e07725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07725>

Wehrle, R., Coulouma, G., Pätzold, S., 2022. Portable mid-infrared spectroscopy to predict parameters related to carbon storage in vineyard soils: Model calibrations under varying geopedological conditions. *Biosyst. Eng.* 222, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.012>

WMO (World Meteorological Organization). 2018. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 14. Geneva, Switzerland: WMO.

### Tabelas Suplementares

Tabela Suplementar 1. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá. Minas Gerais. Brasil.

Tratamento	Profundidade (cm)						
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	40-50
	..... Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....						
SSP(P1)	16,5	12,7	23,2	17,6	15,3	7,9	93,2
SSP(P2)	16,6	12,4	22,7	18,1	12,6	7,5	89,9
SSP(P3)	16,7	13,5	21,7	15,5	12,4	7,1	86,6
CV (%)	25,3	15,5	23,6	26,2	19,3	21,7	17,7
	..... Estoque de N (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....						
SSP(P1)	1,4	1,2	2,2	1,8	1,7a	1,0	9,3
SSP(P2)	1,4	1,1	2,1	1,8	1,4b	0,9	8,8
SSP(P3)	1,4	1,2	2,1	1,6	1,4b	1,0	8,7
CV (%)	23,8	13,9	20,4	14,7	9,0	9,0	10,7

SSP = sistema silvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 7 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste t (LSD) ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela Suplementar 2. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental da Fazenda da Barra, localizada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil

Tratamento	Profundidade (cm)						
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	40-50
	..... Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....						
VN	22,5a	19,4a	29,9	19,3	13,6	10,7a	115,4a
PN	17,5b	12,7b	25,5	17,5	12,2	6,81b	92,4b
SSP	16,6b	12,9b	22,5	17,1	13,3	7,5b	89,9b
CV (%)	14,2	12,7	18,1	18,9	19,1	20,5	11,5
	..... Estoque de N (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....						
VN	2,1a	1,8a	2,7a	1,8	1,3	1,5a	11,3a
PN	1,6b	1,2b	2,2b	1,6	1,9	0,9b	8,7b
SSP	1,4b	1,2b	2,1b	1,7	1,5	1,0b	8,9b
CV (%)	16,4	9,4	14,0	2,6	28,6	20,9	5,6

VN = Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; SSP = sistema silvipastoril. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste t (LSD)( $p \leq 0.05$ ).

**4.2 Artigo 2 - Estoques de carbono e fertilidade do solo em diferentes arranjos produtivos de sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mineiro**

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico Geoderma Regional.

## **Artigo 2 - Estoques de carbono e fertilidade do solo em pastagens e diferentes arranjos produtivos de sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mineiro**

### **RESUMO**

O aumento da demanda global por alimentos, energia e fibras, aliado à necessidade de adaptação ou mitigação das mudanças climáticas, intensificou a busca por sistemas de produção agropecuários que minimizem os impactos ambientais e aumentem a produtividade. Nosso objetivo foi avaliar os teores e estoques de C e N e a fertilidade do solo em áreas de pastagem e sistemas de produção, integrados com diferentes arranjos, em dois experimentos localizados no Estado de Minas Gerais. Dois experimentos foram conduzidos, nos municípios de Curvelo e Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. Em cada experimento, foram avaliados sistemas integrados de produção agropecuária, pastagem e vegetação nativa (VN), sendo o último utilizado como referência da condição original do solo. Visando à representatividade amostral, dentro do sistema agrossilvipastoril (SASP), a coleta foi realizada em três pontos, de forma que contemplasse os componentes arbóreo, forrageiro e, ou com cultivo de grãos. A amostragem de solo foi realizada, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 cm, para avaliação da densidade, atributos químicos, teores e estoques C e N do solo. Em Curvelo, melhores índices de fertilidade do solo foram observados em VN, uma vez que se obtiveram maiores valores de K, Ca, Mg, SB, CTC, V e C, enquanto o SASP apresentou valores intermediários entre VN e a pastagem nominal (PN). Os teores de C, nos pontos avaliados dentro do SASP, variaram entre 7,6 g kg<sup>-1</sup> (camada 90-100 cm) e 29,1 g kg<sup>-1</sup> (camada 0-5 cm). Os estoques de C foram superiores na VN e não se diferenciaram, entre SASP e a pastagem em todas as profundidades avaliadas. Em Sete Lagoas, a pastagem bem manejada apresentou melhoria na fertilidade do solo, com maiores valores de pH, K, Ca, Mg, SB, CTC e V. Já no sistema agropastoril (SAP), obtiveram-se incrementos nos teores de P, embora também tenha sido observado aumento na densidade do solo. No perfil do solo até 30 cm, a PM apresentou estoques de C iguais à VN e ao SASP1, diferenciando-se dos demais. Já nos perfis de 0-50 e 0-100 cm, a PM e o SASP1 apresentaram estoques de C superiores à VN. O SAP obteve os menores estoques, nos perfis de 0-30, 0-50 e 0-100 cm de profundidade. Os resultados evidenciaram que os sistemas agrossilvipastoris e pastagens bem manejadas são promissoras em estocar carbono no perfil do solo, podendo superar os estoques de C e N da vegetação nativa. Sendo assim, são indicados para a recuperação de pastagens degradadas, desde que sejam bem manejados ao longo de todo o ciclo de produção.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas; qualidade do solo; sistemas agroflorestais; uso da terra.

## **Carbon stocks and soil fertility in pastures and different productive arrangements of integrated agricultural production systems in the Cerrado region of Minas Gerais**

### **ABSTRACT**

The increase in global demand for food, energy and fiber, combined with the need to adapt to or mitigate climate change, has intensified the search for agricultural production systems that minimize environmental impacts and increase productivity. Our objective was to evaluate the contents and stocks of C and N and soil fertility in pasture areas and production systems, integrated with different arrangements, in two experiments located in the State of Minas Gerais. Two experiments were conducted in the municipalities of Curvelo and Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. In each experiment, integrated systems of agricultural production, pasture and native vegetation (VN) were evaluated, with the latter being used as a reference for the original soil condition. Aiming at sample representativeness, within the agrosilvopastoral system (SASP), collection was carried out at three points, in a way that included the tree, forage and/or with grain cultivation components. Soil sampling was performed in the 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 and 90-100 cm layers to evaluate density, chemical attributes, C and N contents and stocks soil. In Curvelo, better soil fertility indices were observed in VN, since higher values of K, Ca, Mg, SB, CTC, V and C were obtained, while SASP presented intermediate values between VN and nominal pasture (PN). The C contents at the points evaluated within the SASP ranged from 7.6 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm layer) to 29.1 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm layer). The C stocks were higher in the VN and did not differ between the SASP and the pasture at all depths evaluated. In Sete Lagoas, the well-managed pasture showed improved soil fertility, with higher values of pH, K, Ca, Mg, SB, CTC and V. Already in the agropastoral system (SAP), increases in P levels were obtained, although an increase in soil density was also observed. In the soil profile up to 30 cm, PM presented C stocks equal to VN and SASP1, differing from the others. In the profiles of 0-50 and 0-100 cm, PM and SASP1 presented C stocks higher than VN. SAP obtained the lowest stocks, in the profiles of 0-30, 0-50 and 0-100 cm depth. The results evidenced that agrosilvopastoral systems and well-managed pastures are promising for storing carbon in the soil profile, and may exceed the C and N stocks of native vegetation. Therefore, they are indicated for the recovery of degraded pastures, as long as they are well managed throughout the production cycle.

**Keywords:** climate change; soil quality; agroforestry systems; land use.

### 4.2.1 Introdução

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) tem sido amplamente difundida como alternativa para a recuperação de pastagens degradadas, em várias regiões do Brasil, visando aumento da produtividade agropecuária, melhoria da qualidade do solo, conservação de recursos hídricos, com diversificação da renda das propriedades rurais. Estudos recentes têm demonstrado o potencial de armazenamento de C dos diversos arranjos produtivos da integração (Sanderman *et al.*, 2018; de Souza *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2021; Polanía-Hincapié *et al.*, 2021; Ribeiro *et al.*, 2023; Freitas *et al.*, 2024). De acordo com Polanía-Hincapié *et al.* (2021), as vantagens dos sistemas ILPF podem variar, de acordo com as condições climáticas, tipos de solo, espécies, arranjos, intensidade do pastejo animal e o manejo da pastagem, animais e das árvores ao longo dos anos.

No Brasil, as várias regiões do país oferecem diferentes condições edafoclimáticas e ambientais que podem ser aproveitadas, para implementar a ILPF e aumentar os estoques de C, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, a recuperação de áreas degradadas e o aumento da sustentabilidade da agricultura e pecuária brasileiras (Ma *et al.*, 2020). Além dos diversos arranjos possíveis da ILPF, é importante considerar a diversidade de biomas, solos e climas encontrados no Brasil, pois esses fatores podem influenciar significativamente na capacidade de armazenamento de C e N (Lustosa Filho *et al.*, 2024). Portanto é necessária a adaptação dos componentes e definição de arranjos da ILPF, em função das condições edafoclimáticas locais, para conseguir maximizar os benefícios ambientais e econômicos praticados na integração agropecuária sustentável em diferentes regiões do país.

Nesse sentido, a avaliação de sistemas integrados, considerando as diferentes composições e arranjos de espécies, o manejo empregado e o tempo de implantação, são de fundamental importância, para avaliar o incremento de C e N no solo, ao longo do tempo e o potencial de sequestro de C. Assim, o presente estudo investigou a hipótese de que a introdução de sistemas integrados de produção agropecuária, em áreas previamente ocupadas com pastagens degradadas, recupera a fertilidade do solo e aumenta os estoques de C e N no solo. O objetivo foi avaliar os teores e estoques de C e N e a fertilidade do solo em áreas de pastagem e sistemas integrados com diferentes arranjos em dois experimentos localizados do Estado de Minas Gerais, Brasil.

### 4.2.2 Material e métodos

#### 4.2.2.1 Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado em dois municípios do Estado de Minas Gerais. A primeira área está localizada na Fazenda Experimental do Moura (latitude 18° 44' 52,03" S e longitude 44° 6' 53,56" W), no município de Curvelo, Minas Gerais, Brasil (Figura 1). O solo foi classificado como Latossolo

vermelho distrófico argiloso (Santos *et al.*, 2018.), cuja caracterização química e física do solo encontra-se descrita na Tabela A1. A altitude média da área é de aproximadamente 644 m, com topografia plana e vegetação característica do bioma Cerrado e fitofisionomia Cerradão. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Aw, correspondendo a um clima de savana tropical, com chuvas concentradas no verão (outubro a abril), enquanto o inverno consiste em um período seco (maio a setembro). A temperatura média entre 2009 e 2022 foi de 24.1°C, com precipitação média de 1057.5 mm (Figura 2).

A segunda área está situada no campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil (latitude 19° 29'11" S e longitude de 44° 10' 77" 'W) (Figura 1). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo vermelho distrófico argiloso (Santos *et al.*, 2013), sendo características químicas e físicas apresentadas na Tabela A2. O relevo do local é suave ondulado, com altitude de 708 m e vegetação característica de Cerrado. O clima da região é do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen, com estação seca concentrada no inverno (maio a setembro) e chuvas no verão (outubro a abril). A temperatura média entre 2009 a 2022 foi de 21.6 °C, com precipitação média de 1265 mm (Figura 2).

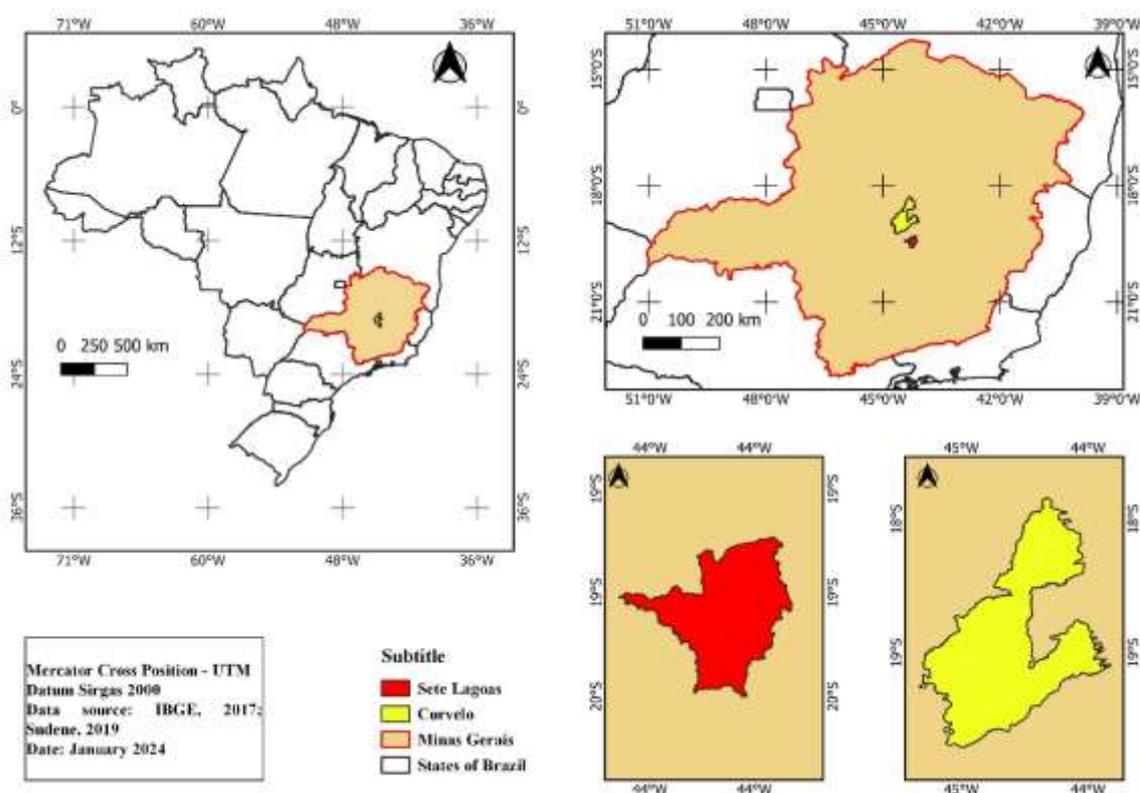


Figura 1. Localização geográfica dos municípios de Curvelo e Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

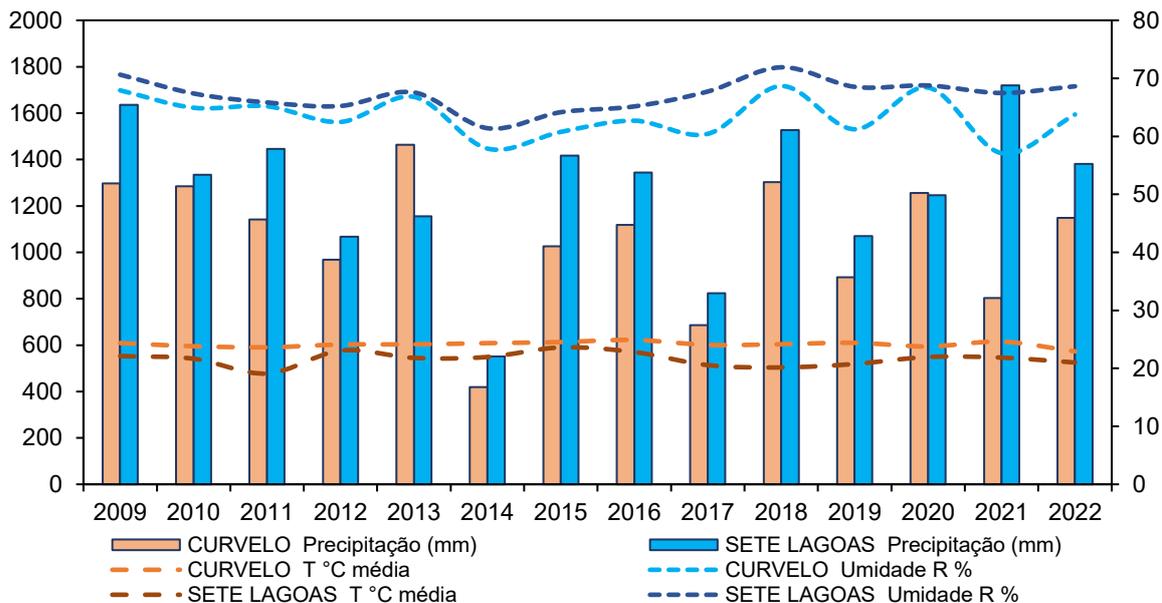


Figura 2. Dados climáticos dos locais de estudos entre 2009 e 2022. INMET (2024).

#### 4.2.2.2 Sistemas de uso do solo

Para avaliar os diferentes usos do solo, em cada local, foram selecionados sistemas integrados de produção agropecuária, pastagem e vegetação nativa (tratamento referência), com cinco repetições e quatro usos da terra.

No município de Curvelo, foram avaliados quatro tratamentos descritos como:

- Sistema agrossilvipastoril (SASP) com sete anos de idade, utilizando o híbrido eucalipto *urograndis* (*E. urophylla* x *E. grandis*) consorciado com capim-marandu (*Urochloa brizantha*).
- Pastagem reformada e bem manejada (PM) de *Urochloa brizantha*, implementada há sete anos.
- Pastagem nominal (PN), sem manejo de adubação e controle da taxa de lotação animal, cultivada com capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf) há 20 anos.
- Vegetação nativa (VN): área de referência, caracterizada por vegetação típica de Cerrado.

O SASP foi instalado em dezembro de 2014. Foram utilizadas mudas de *Eucalyptus urograndis* (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, Clone 144), com três meses de idade. O transplântio foi realizado, simultaneamente, com a semeadura de milho (*Zea mays* L. SHS híbrido 7920) e forragem (*Urochloa brizantha* cv. Marandu). No plantio de eucalipto, adotou-se o espaçamento de 12 x 3 m (278 árvores por hectare), com uma faixa de 1,5 m separando o milho consorciado e a forragem. O milho foi plantado a 1,5 m de distância das árvores, entre as linhas de eucalipto. A pastagem de capim-marandu foi consorciada com milho somente no primeiro ano de cultivo, após o qual somente a pastagem permaneceu entre as linhas das árvores.

A área de PM foi semeada com capim *Urochloa brizantha* cv. Marandu, em dezembro de 2014, em área previamente cultivada por duas décadas, com pastagem não manejada, utilizando as mesmas recomendações de plantio e tratamentos de cultivo descritos para a *U. brizantha* cv. Marandu no SASP.

A área de PN consistia em pastagem de capim-braquiária (*B. decumbens Stapf*) e era utilizada, anteriormente, para o pastejo extensivo de bovinos de leite e corte e conduzida sem manejo definido e sem adubação de manutenção por 20 anos. Nos três anos anteriores às coletas de solo, não houve pastejo contínuo na área, o que favoreceu a rebrota e o restabelecimento da gramínea, diminuindo, assim, a presença de solo exposto e infestação de plantas daninhas.

A área de VN, classificada como “Cerradão”, fica adjacente às unidades experimentais. Em pesquisa anterior, Otoni (2011) verificou que o sistema VN não havia sofrido intervenção antropogênica, característica que favoreceu o uso da área como tratamento controle. Segundo a caracterização desses autores, a área de cerrado estudada possui indivíduos tortuosos com aspectos xeromórficos e indivíduos eretos. Espécies com altura máxima de até 12 m e altura média de 4,5 m foram observadas na área, com a formação de extratos bem definidos em determinados locais. As principais espécies arbóreas observadas foram *Magonia pubescens*, *Qualea grandiflora*, *Tachigali subvelutina*, *Terminalia argentea*, *Qualea parviflora*, *Kielmeyera coriacea* e *Protium heptaphyllum*, representando 1.221 indivíduos dos 2.424 identificados em uma área amostral de 1 ha.

No município de Sete Lagoas, foram estudados seis tratamentos, descritos a seguir:

- Sistema agrossilvipastoril com 13 anos (SASP1), composto por *Eucalyptus grandis x urophylla* consorciado com capim *Urochloa brizantha* (piatã). Inicialmente, em 2009, o plantio foi realizado com 333 árvores por hectare de eucalipto (espaçamento 15x2 m). Aos cinco anos (2014), houve o desbaste em parte da área, resultando em 166 árvores por hectare (espaçamento 15x4 m).
- Sistema agrossilvipastoril com 11 anos (SASP2), estabelecido com o híbrido *Eucalyptus grandis x urophylla* em consórcio com capim *Urochloa brizantha* (Piatã). Em 2011, o plantio foi realizado com 333 árvores por hectare de eucalipto (espaçamento 15x2 m). Em 2015, com quatro anos, houve o desbaste em metade da área, que ficou com 166 árvores por hectare (espaçamento 15x4 m).
- Sistema agrossilvipastoril com nove anos (SASP3), composto por *Eucalyptus grandis x urophylla* consorciado com capim *Urochloa brizantha* (piatã). Inicialmente, em 2013, o plantio foi realizado com 333 árvores por hectare de eucalipto (espaçamento 15x2 m). Aos seis anos (2019), houve o desbaste em parte da área, ficando 166 árvores por hectare (espaçamento 15x4 m).
- Sistema agropastoril com 13 anos (SAP) conduzido com milho (*Zea mays* L. AG 8088 VT PRO) e capim Piatã (*Urochloa brizantha* cv. Piatã).
- Pastagem manejada com 13 anos (PM) cultivada com capim Piatã (*Urochloa brizantha* cv. Piatã).
- Vegetação nativa (VN), utilizada como área de referência, caracterizada por vegetação típica do Cerrado.

Os SASP foram implantados, em 2009, 2011 e 2013, em 0,9 ha cada tratamento. O plantio foi realizado com seis renques de eucaliptos (*Eucalyptus urophylla*, cultivar GG100), em sistema semimecanizado, com 100 m de comprimento. O espaçamento utilizado foi de 15 x 2 m entre plantas, com total de 333 árvores ha<sup>-1</sup>. Nos três primeiros anos, após a implantação de cada SASP

com eucalipto, também foi realizada, nas faixas entre os renques, a semeadura simultânea de milho (*Zea Mays* L. AG 8088 VT PRO) consorciado com capim braquiária (*Urochloa brizantha* cv. Piatã), com 0,70 m entre linhas, respeitando uma distância de 1 m dos renques de eucalipto. Após a colheita do milho, no terceiro ano, foi mantida apenas a pastagem entre as linhas das árvores, em sistema silvipatoril até 2019. Em 2019/2020, foi cultivada soja nas aleias e, em 2020/2021, cultivou-se milho consorciado com capim. Na Tabela A3, encontram-se informações sobre o desbaste do eucalipto, ao longo dos anos, para as três épocas de plantio.

A área PM foi implantada, em 2009, com *U. brizantha* cv. Piatã, utilizando as mesmas recomendações de plantio e tratamentos de cultivo descritos para a área entre os renques de eucalipto.

Na área de SAP houve consórcio de milho e capim Piatã adotando-se o mesmo manejo e tratamentos culturais descritos anteriormente para as áreas entre os renques de eucalipto. Esse tratamento foi implementado simultaneamente à implantação dos sistemas, em 2009, em uma área contígua a pleno sol de 400 m<sup>2</sup>.

A área de VN foi classificada como Cerrado e localizada adjacente às unidades experimentais. A VN não apresentava intervenção antrópica.

Informações sobre atividades de manejo, nas áreas de estudo, ao longo do tempo, estão descritas na Tabela A3 e também podem ser encontradas nos estudos de Freitas *et al.* (2020), Ribeiro *et al.* (2022), Moreira *et al.* (2018) e Moreira *et al.* (2022).

#### 4.2.2.3 Amostragem de solo

Em Curvelo, a coleta foi realizada em abril de 2022. A amostragem no SASP foi realizada em três pontos, em função da distância da árvore, sendo o primeiro entre as árvores de eucalipto (P1), o segundo a 3 m de distância das árvores (P2) e o terceiro a 6 m de distância das árvores (P3). Em Sete Lagoas, a coleta foi realizada em julho de 2022. O primeiro ponto foi entre as árvores de eucalipto (P1), o segundo a 3 m de distância da árvore (P2) e o terceiro a 7,5 m de distância da árvore (P3), conforme esquema apresentado na Figura 3.

Foram coletadas amostras, em trincheiras de 1 m de profundidade, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 cm, com cinco repetições, para cada ponto de amostragem nos SASP e cinco repetições, para os demais usos do solo (SAP, PM, PN e VN). Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar e passadas por peneiras de 2 mm. Foram separadas amostras até 30 cm de profundidade (0-5, 5-10, 10-20, 20-30) para análises granulométricas e dos teores de nutrientes do solo. Após o preparo inicial, as raízes de todas as amostras foram removidas e, logo depois, as amostras foram maceradas e passadas por peneiras com malha de 0,150 mm, para determinar os teores de carbono (C) e nitrogênio (N). Foi determinada a densidade do solo (Ds) para todas as profundidades avaliadas.

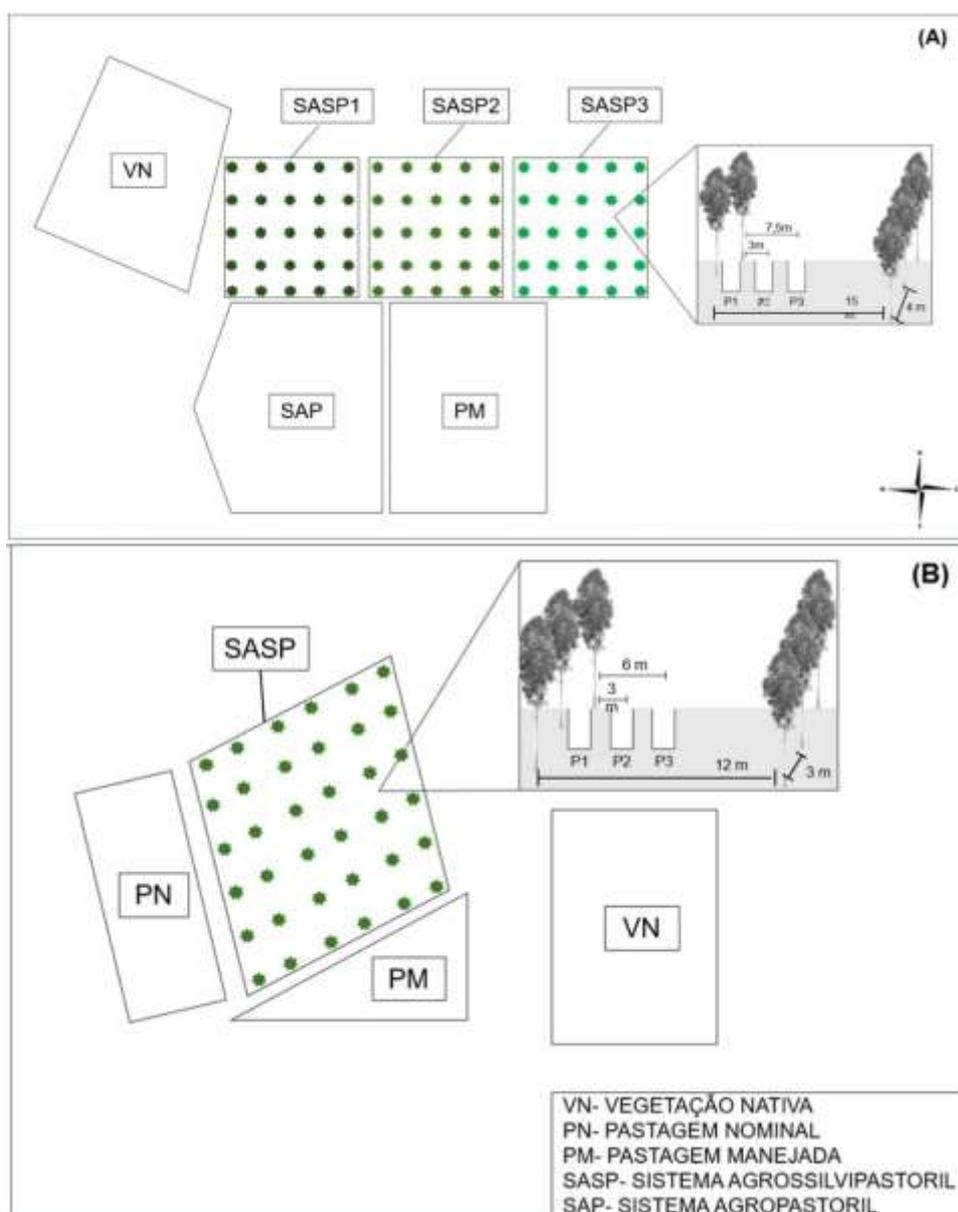


Figura 3. Esquema de coleta de solo nos dois locais de avaliação. A= Sete Lagoas; B= Curvelo.

#### 4.2.2.4 Avaliação da fertilidade, granulometria e densidade do solo

Para proceder à avaliação da fertilidade e granulometria do solo, foi utilizada a metodologia da Embrapa (Teixeira, *et al.*, 2017). A análise de textura (granulometria) foi realizada pelo método da pipeta. A densidade aparente do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (anéis de aço inoxidável  $\pm 5$  cm de diâmetro) para todas as profundidades avaliadas (Teixeira, *et al.*, 2017).

#### 4.2.2.5 Determinação dos teores e estoques de Carbono e Nitrogênio do solo

Os teores de COT, NT e relação C/N foram obtidos por combustão seca, utilizando um analisador elementar (Leco CN-2000®, St. Joseph, MI, EUA) que determina o teor de carbono por absorção de infravermelho e o nitrogênio por condutividade térmica.

Para calcular os estoques de carbono (EC) e nitrogênio (EN), em Mg ha<sup>-1</sup>, multiplicou-se o teor de COT ou NT (%) pela densidade aparente do solo (g cm<sup>-3</sup>) e pela espessura da camada de solo desejada (cm). Em seguida, os valores foram corrigidos, para a mesma massa de solo da vegetação nativa (área de referência), de acordo com a metodologia proposta por Ellert e Bettany (1996) e Moraes *et al.* (1996).

#### 4.2.2.6 Análise estatística

Para verificar o pressuposto de normalidade dos dados, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk ( $p \leq 0,05$ ). A homogeneidade de variância foi verificada pelo teste de Bartlett ( $p \leq 0,05$ ). Para comparar os diferentes sistemas de uso da terra e pontos amostrais, dentro dos sistemas integrados, foi realizada a análise de variância, com cinco repetições e delineamento inteiramente casualizado. As variáveis foram: teores de C e N, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 80-90 e 90-100 cm de profundidade e estoques de C e N, nas camadas de 0-10, 0-30, 0-50 e 0-100 cm de profundidade. As médias foram comparadas, utilizando o teste t (LSD) a 5% de significância. Para a fertilidade, foi realizada análise de componentes principais (ACP). Antes da realização da ACP, as variáveis tiveram seus valores padronizados (subtração de cada valor dividido pelo desvio-padrão, para que a média seja 0 e a variância igual a 1). As variáveis testadas foram: pH em água; P Mehlich (mg dm<sup>-3</sup>); K (mg dm<sup>-3</sup>); Ca (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); Mg (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); SB (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); CTC efetiva (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); V (%); C (g kg<sup>-1</sup>); e Densidade (g cm<sup>-3</sup>). Foram feitas ACP para a camada 0-30 cm de profundidade. Todas as análises foram realizadas usando o software R Core Team (2023).

### 4.2.3 Resultados

#### 4.2.3.1 Fertilidade e densidade do solo

Os resultados completos das análises da fertilidade do solo, para os experimentos de Curvelo e Sete Lagoas, estão nas Tabelas A1 e A2, respectivamente. Pode-se verificar que os componentes principais 1 e 2 explicaram, aproximadamente, 86 e 93% da variância total dos dados obtidos em Curvelo e Sete Lagoas (Tabela 1).

Tabela 1. Correlação entre as variáveis e os componentes principais e explicação dos componentes principais para atributos físico-químicos do solo em diferentes locais de estudo.

Atributos	Locais de estudo			
	Curvelo		Sete Lagoas	
	Componentes Principais			
	1	2	1	2
pH	-0,41	-0,84	0,98	0,11
P	0,18	-0,84	0,14	-0,95

K	-0,95	-0,19	0,89	-0,14
Ca	-0,99	-0,01	0,99	0,04
Mg	-0,94	0,21	0,98	0,08
Al	0,08	0,90	-0,81	0,56
SB	-0,99	0,03	0,99	0,03
CTC	-0,99	0,07	0,98	0,18
V	-0,79	-0,43	0,72	-0,51
C	-0,92	0,40	0,59	0,74
Ds	0,63	-0,22	0,07	-0,97
<hr/>				
Autovalor	6,83	2,71	7,22	3,03
Explicação %	62,12	24,62	65,62	27,54
Explicação acumulada %	62,12	86,74	65,62	93,17

SB = soma de bases; CTC = capacidade efetiva de troca de cátions; V = saturação por bases; C = carbono orgânico; Ds = densidade do solo.

Em relação aos sistemas avaliados em Curvelo (Figura 4A), a VN apresentou os melhores índices de fertilidade, com maiores teores de K, Ca, Mg, SB, CTC, V e C. Observaram-se menores valores para os atributos do solo citados nos sistemas PN e PM os quais apresentaram as maiores estimativas para o CP1 (Tabela 1). Nos sistemas SASP, foram observados valores intermediários entre a PN e VN para K, Ca, e V. No CP2, verificaram-se alta correlação negativa para pH e teores de P, indicando que o SASP melhorou esses atributos do solo. O CP1 indicou que a Ds (densidade do solo) foi maior em PN e menor em VN, com valores intermediários nos sistemas SASP e PM. Adicionalmente, alta correlação positiva foi verificada para Al, mostrando os sistemas PM e VN com acidez trocável mais elevada.

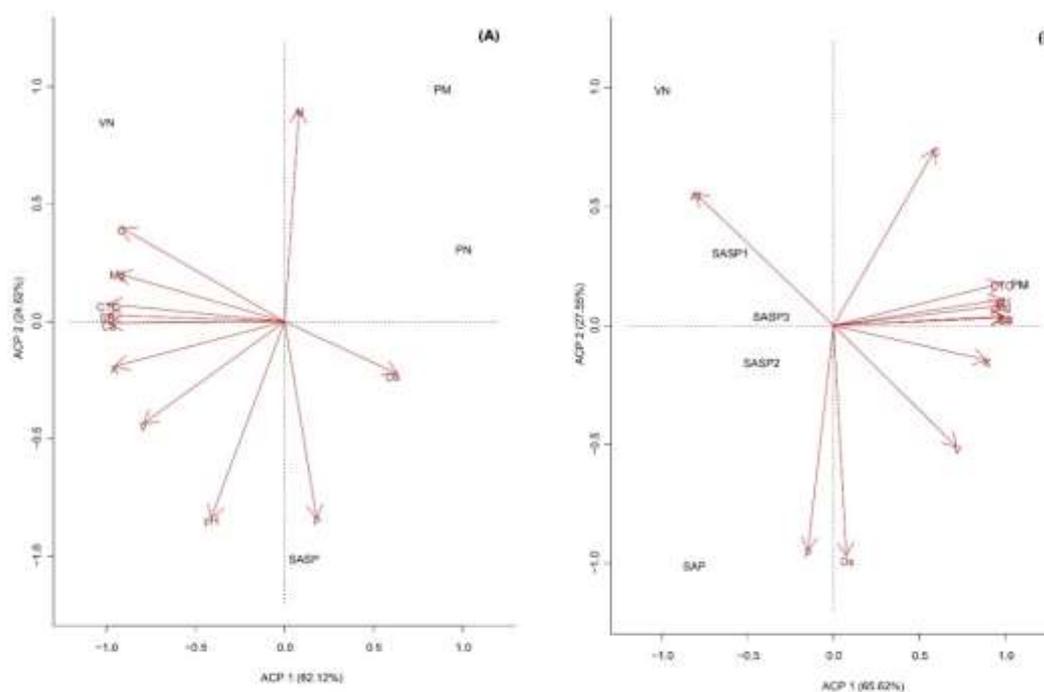


Figura 4: Análise de componentes principais dos atributos físico-químicos do solo, em diferentes locais de estudo (Curvelo-MG = A; Sete Lagoas-MG = B) e sob diferentes usos e manejos, na camada de 0–30 cm de profundidade. VN = Vegetação nativa; PN= Pastagem nominal; PM = Pastagem manejada; SAP= sistema agropastoril; SASP1= sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). SB = soma de bases; CTC = capacidade efetiva de troca de cátions; V = saturação por bases; C = carbono orgânico; Ds= densidade do solo.

Em relação aos sistemas avaliados em Sete Lagoas, o solo sob a PM obteve maiores valores de pH, K, Ca, Mg, SB, CTC e V, já que esses atributos apresentaram alta correlação positiva com o PC1 (acima de 0,70) (Tabela 1; Figura 4B). Os solos sob VN e SAP apresentaram menores valores dos atributos citados, com menores estimativas em relação ao CP1. Os teores de Al apresentaram maiores correlações negativas com o CP1, o que mostrou maior acidez trocável no sistema VN, seguido pelo SAP e demais sistemas integrados. Adicionalmente, o CP2 indicou que os atributos P e Ds foram maiores, nos solos sob SAP, intermediários nos sistemas SASP e PM e baixos em VN.

#### 4.2.3.2 Teores de Carbono e Nitrogênio

Na área experimental de Curvelo, os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, dentro do SASP, decresceram em profundidade, para os três pontos avaliados (Figura 5, Tabela A4) e oscilaram entre 29,1 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 7,6 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm), para o C e, entre 2,2 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 0,7 g kg<sup>-1</sup> (0-100 cm), para o N. Quando comparados entre os pontos de amostragem (P1, P2 e P3), não se observaram diferenças estatísticas, evidenciando que os componentes arbóreos e forrageiros não influenciaram, nos teores de C e N do solo, após sete anos de implantação dos sistemas integrados.

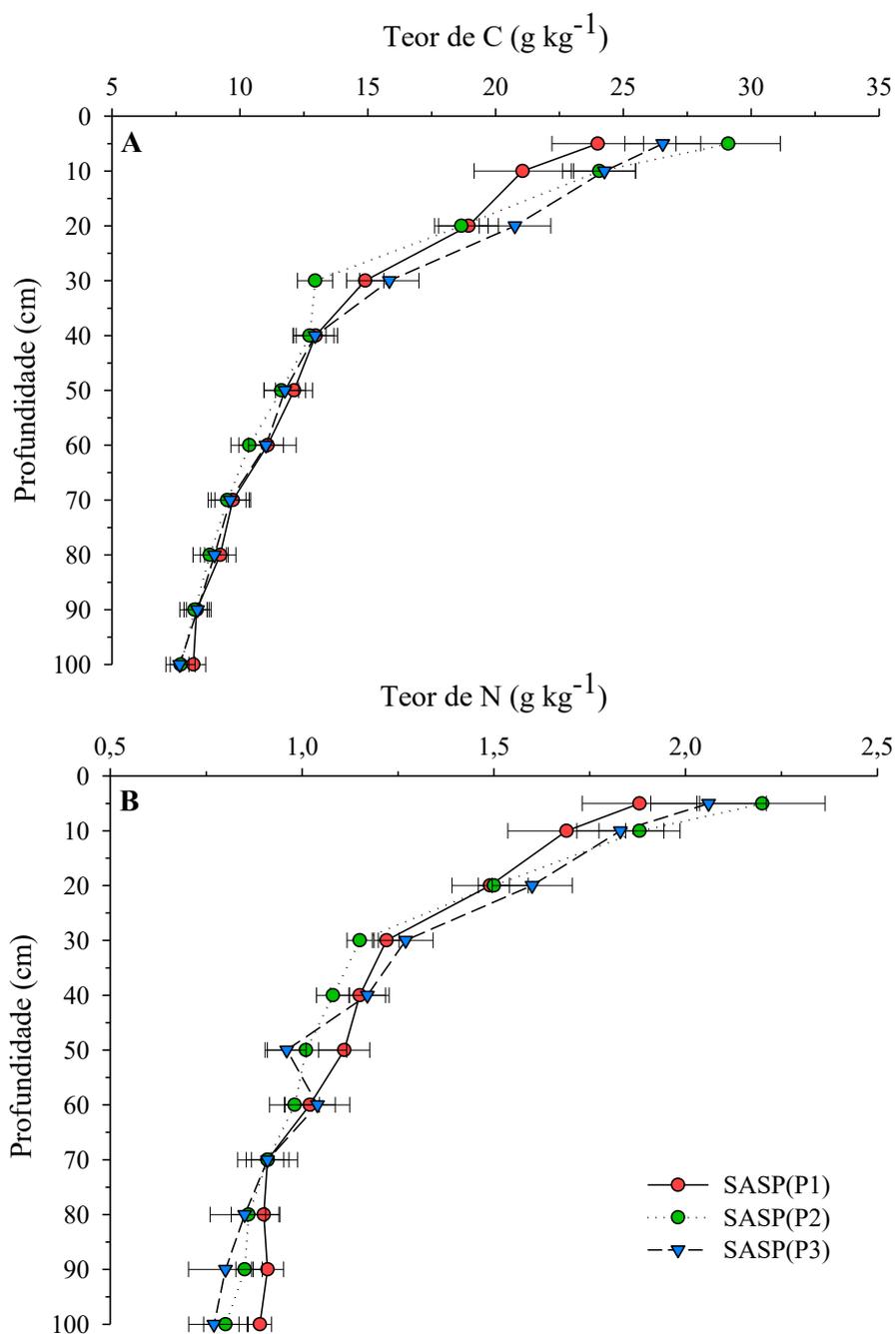


Figura 5. Teores de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção, localizado em Curvelo/MG. SASP = sistema agrossilvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 6 metros de distância da árvore de eucalipto.

Comparando os teores de C entre os diferentes sistemas avaliados (Figura 6; Tabela A5), verificaram-se maiores valores em VN até a camada de 30-40 cm, não se observaram diferenças, nas camadas de 40-50, 50-60 e 60-70 cm, enquanto houve diminuição dos teores em VN nas camadas de 70-80, 80-90 e 90-100 cm. Os teores de N do solo também foram maiores na VN até os primeiros 40 cm de profundidade (Figura 6; Tabela A5), sendo similar ao PM e ao SASP, nas camadas 10-20 e 30-40 cm, respectivamente. De 40-70 cm e de 90-100 cm de profundidade, não

houve diferença entre os tratamentos, enquanto, na profundidade de 80-90 cm, a VN apresentou valores inferiores aos demais sistemas avaliados.

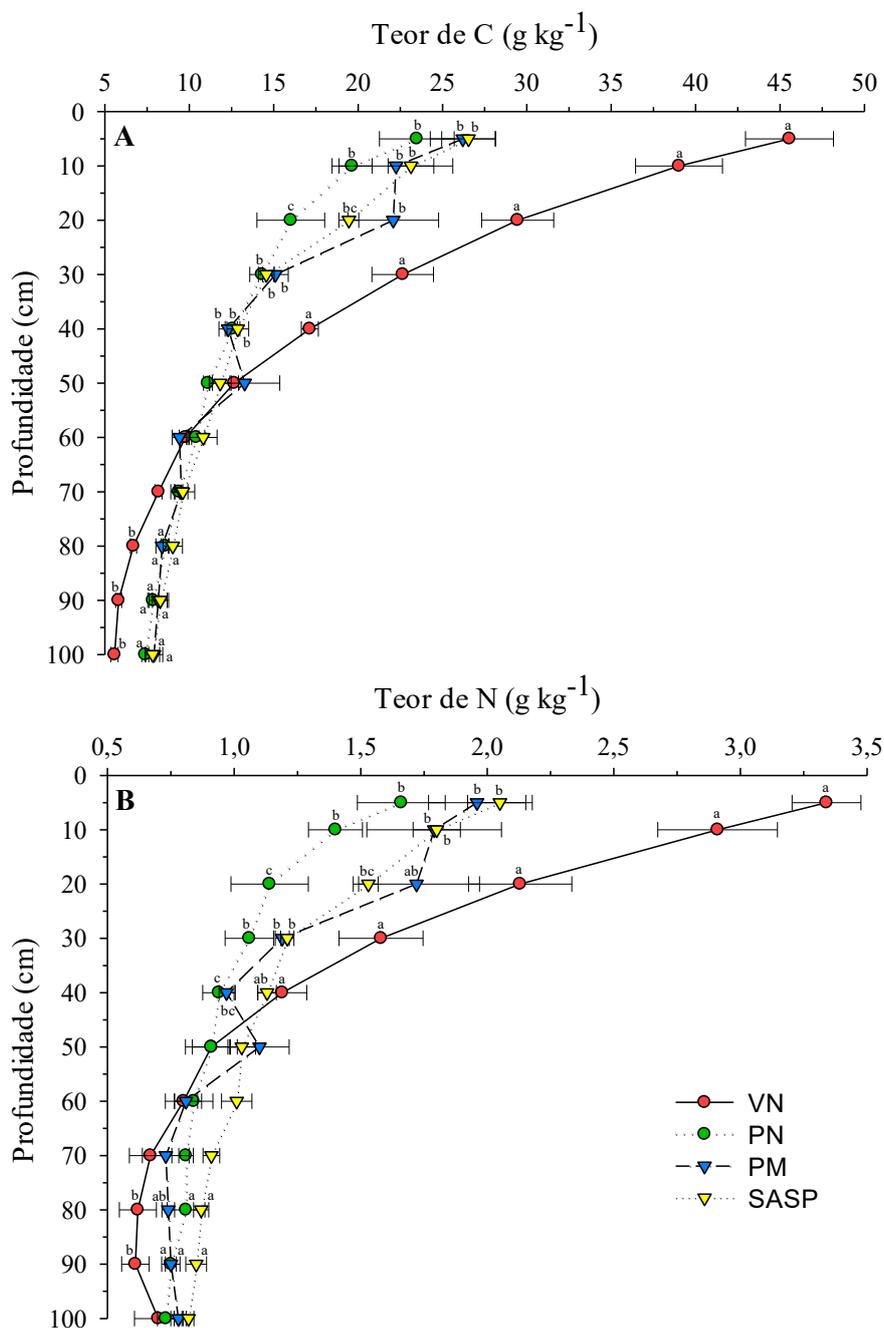


Figura 6. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Curvelo/MG. VN = Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; PM = pastagem manejada; SASP = sistema agrossilvipastoril. As barras representam o erro-padrão da média.

No experimento de Sete Lagoas, os teores de C do solo, nos pontos de coleta dentro dos sistemas integrados, apresentaram diferença apenas para o SASP1, com 13 anos idade, no qual se

observaram menores teores em P2 nas camadas de 20-30 e 30-40 cm (Figura 7, Tabela A6). Os valores oscilaram entre 51,6 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 22,8 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm) no SASP1, 45,4 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 18,9 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm) no SASP2 e entre 45,1 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 21 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm) no SASP3.

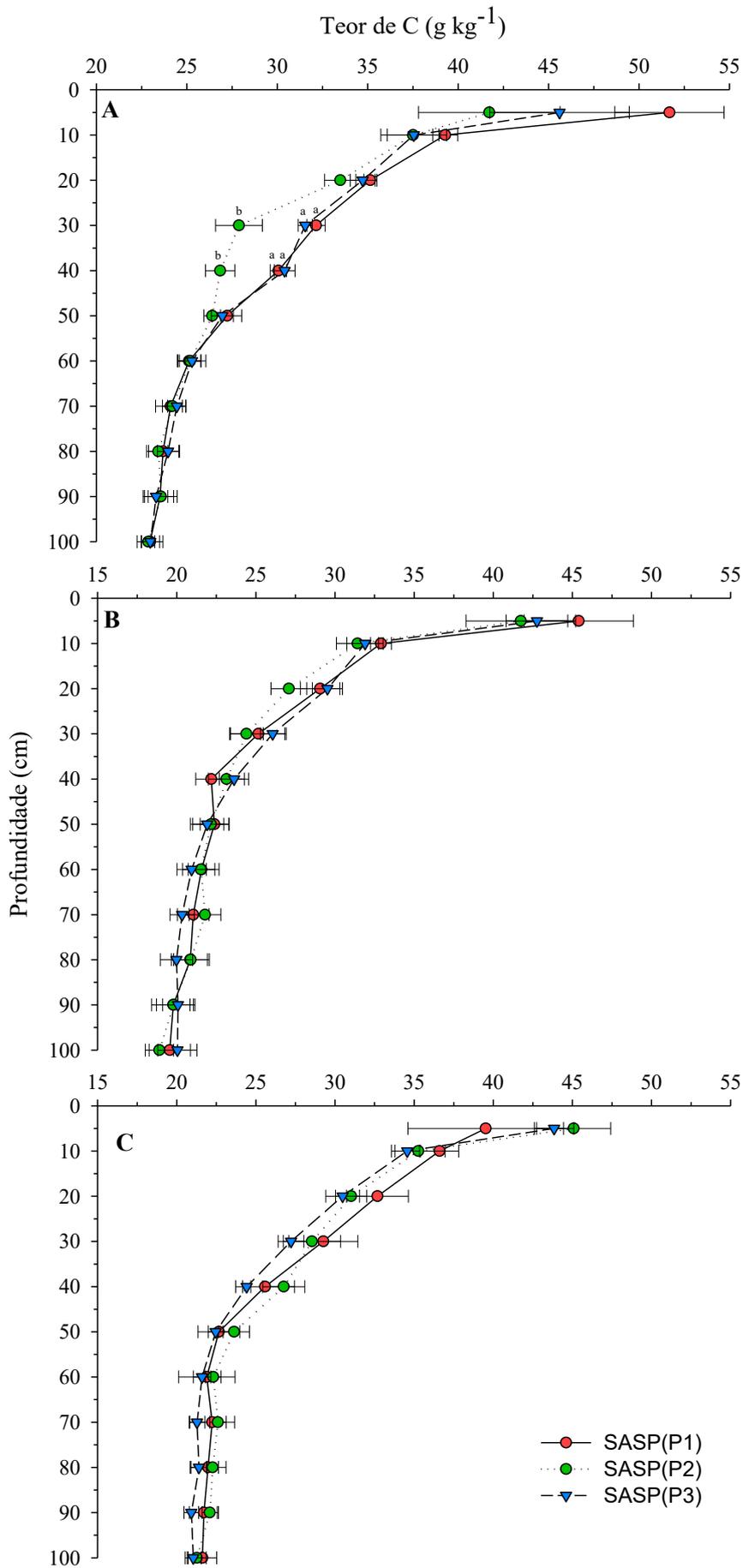


Figura 7. Teores de carbono (C) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, localizados em Sete Lagoas/MG. A= SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); B SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); C= SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. As barras representam o erro-padrão da média.

Para os teores de N do solo, apenas o SASP1 apresentou diferença entre os pontos amostrados, em que P1 obteve maiores valores, nas camadas de 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm (Figura 8, Tabela A6). Os teores de N variaram entre 3,6 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 1,4 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm) no SASP1, entre 3,1 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 1,2 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm) no SASP2 e entre 3,5 g kg<sup>-1</sup> (0-5 cm) e 1,2 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm) no SASP3.

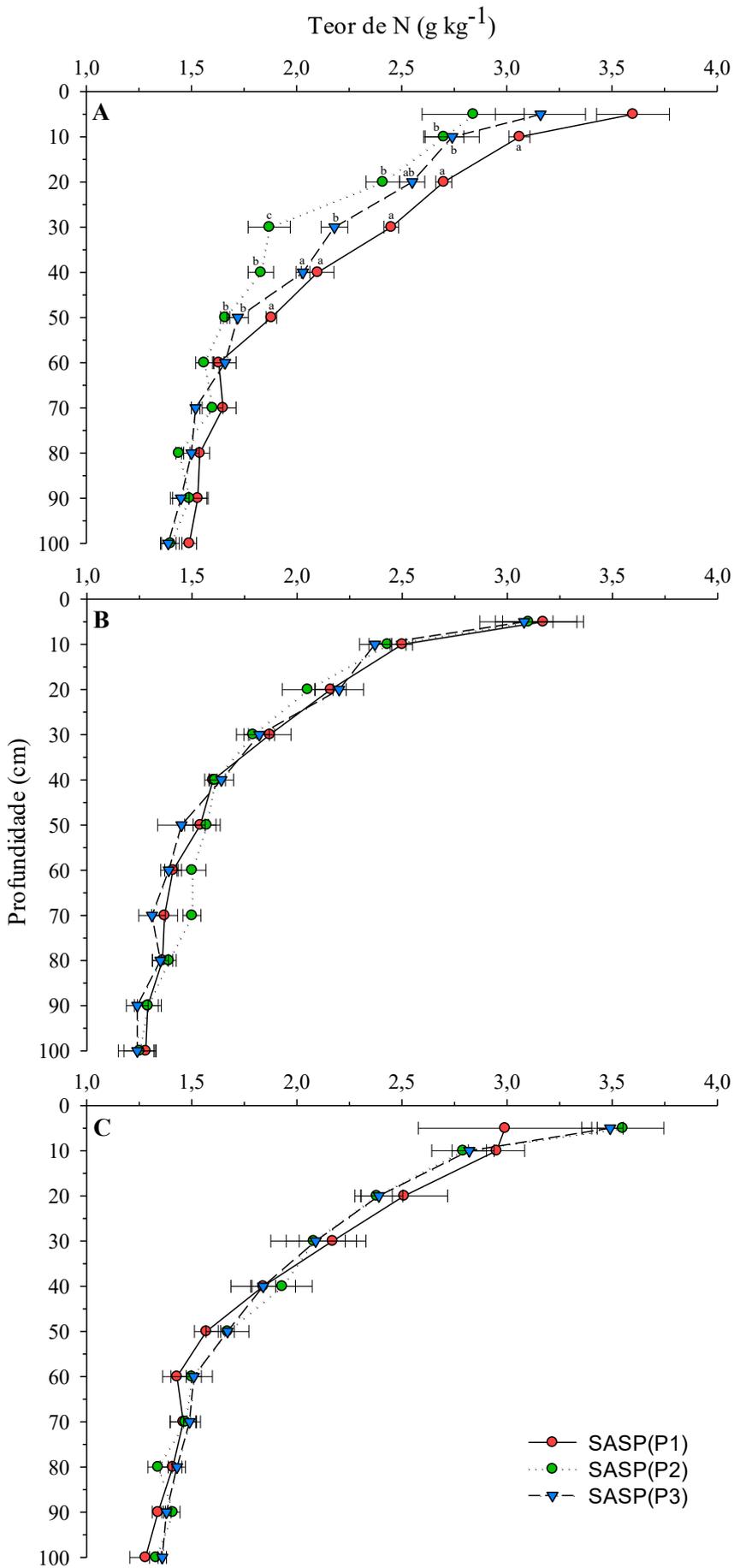


Figura 8. Teores de nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, localizados em Sete Lagoas/MG. A= SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); B SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); C= SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. As barras representam o erro-padrão da média.

Analisando os diferentes usos do solo, em Sete Lagoas (Figura 9; Tabela A7), os teores de C, para a camada de 0-5 cm, não apresentaram diferença entre os tratamentos avaliados. Na camada de 5 a 10 cm, os teores de C foram maiores em PM, VN e o SASP1 e, nas camadas subsequentes até 70 cm de profundidade, PM e SASP1 apresentaram maiores teores de C em relação aos demais sistemas de uso da terra. Já para as camadas de 70-100 cm, os teores de C entre PM, SASP1 e SASP3 foram semelhantes. Os teores de N (Figura 9, Tabela A7) não variaram com os usos da terra na camada de 0-5 cm e foram semelhantes também entre PM e VN na camada de 5-10 cm. Os teores de N do solo foram similares entre PM, VN e SASP1 nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm. Nas camadas subsequentes até 100 cm de profundidade, os teores de N foram maiores em PM, assemelhando-se à SASP1 em profundidade (60-70, 80-90 e 90-100 cm).

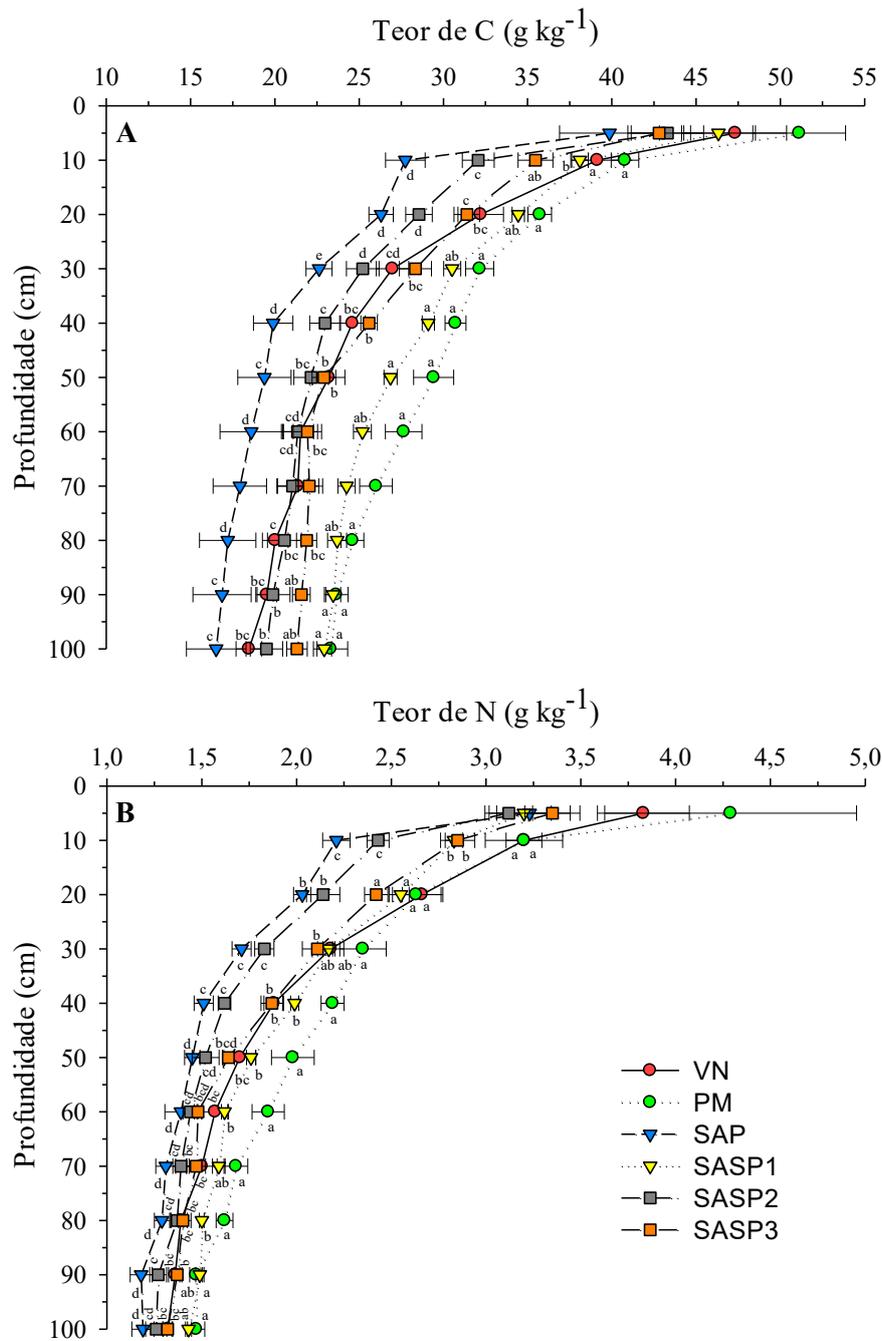


Figura 9. Teores de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Sete Lagoas/MG. VN= Vegetação nativa; PM = Pastagem manejada; SAP = sistema agropastoril; (SASP1) = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). As barras representam o erro-padrão da média.

#### **4.2.3.3 Estoques de Carbono e Nitrogênio**

Em Curvelo, os estoques de C e N do solo não diferiram entre os diferentes pontos de amostragem no SASP (Figura 10, Tabela A8). Comparando os sistemas avaliados (Figura 11, Tabela A9), os estoques de C foram superiores na VN, enquanto os demais usos da terra não diferiram entre si em todas as profundidades avaliadas. O mesmo ocorreu para os estoques de N do solo, e o sistema integrado (SASP) obteve valor semelhante à VN no perfil de solo de 0-100 cm.

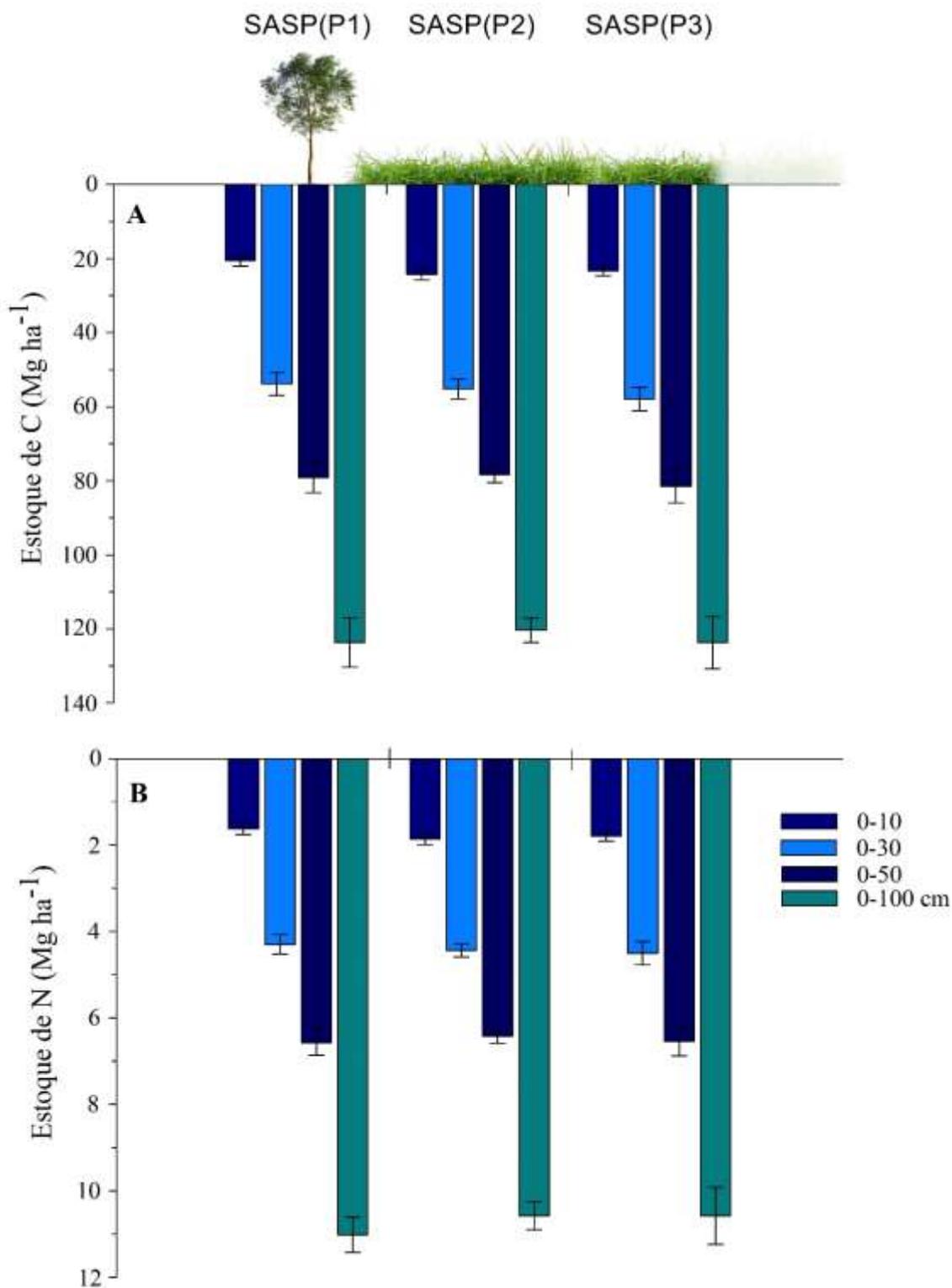


Figura 10. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema agrossilvipastoril do experimento, localizado em Curvelo/MG. P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 6 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro-padrão da média.

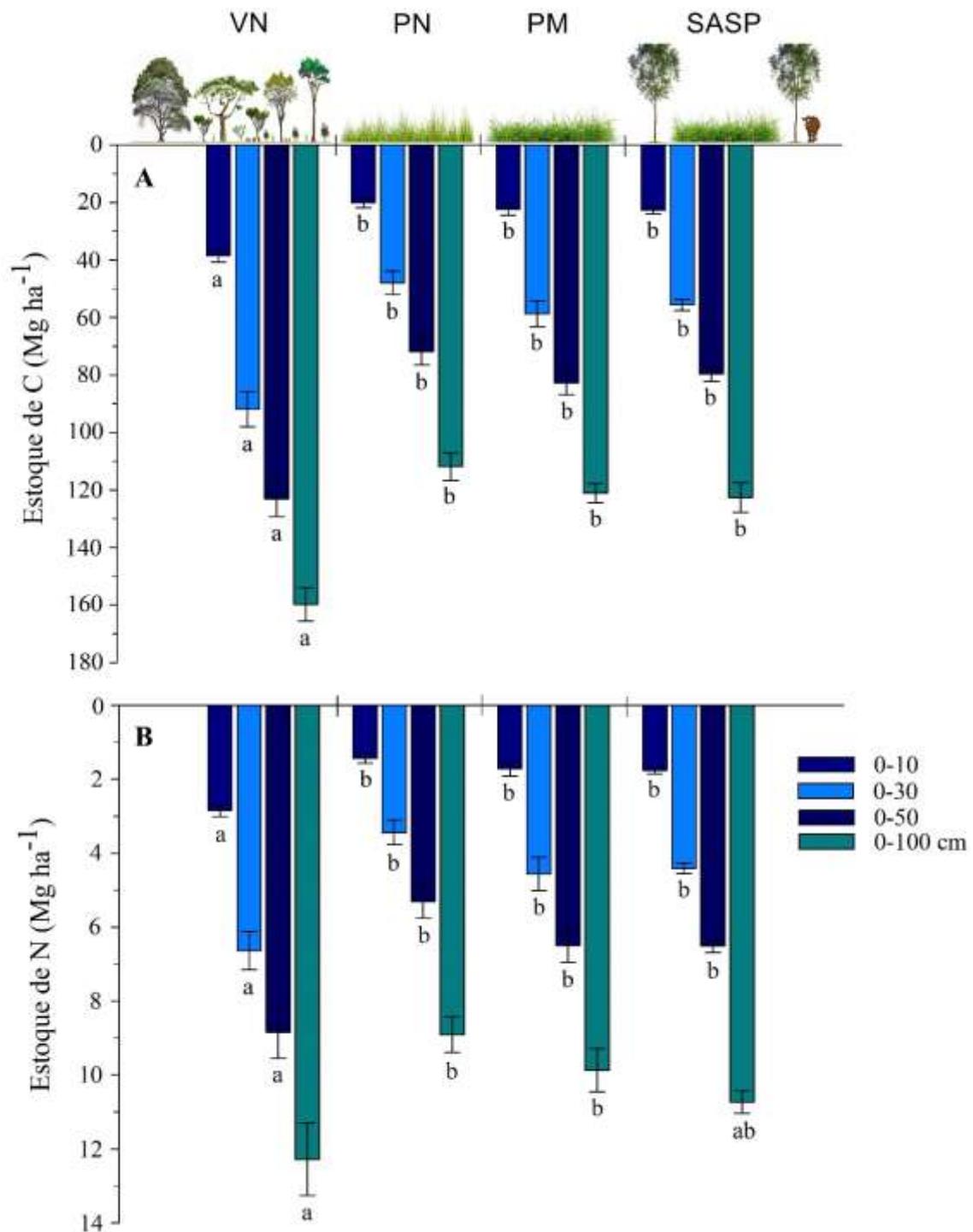


Figura 11. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Curvelo/MG. VN= Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; PM = pastagem manejada; SASP= sistema agrossilvipastoril. Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro-padrão da média.

Em Sete Lagoas, os estoques de C do SASP1 (Figura 12, Tabela A10) apresentaram diferença entre os pontos de amostragem apenas nas camadas 0-30 e 0-50 cm. Na camada de 0-30 cm, os valores foram menores em P2 (75,5 Mg ha<sup>-1</sup>), quando comparados com P1 (86,8 Mg ha<sup>-1</sup>). Já na camada de 0-50 cm, os estoques de C em P2 (120,9 Mg ha<sup>-1</sup>) foram menores em relação a P1 e P3, os quais obtiveram valores médios de estoques de 133,4 Mg ha<sup>-1</sup> e 131,1 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os estoques de N também diferiram apenas no SASP1 nas camadas de 0-30, 0-50 e 0-100 cm (Figura 12; Tabela A10). Os estoques de N, nos perfis avaliados de 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm, foram maiores próximos às árvores do sistema (P1), com valores médios de 6,6 Mg ha<sup>-1</sup> e 9,8 Mg ha<sup>-1</sup> e 16 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

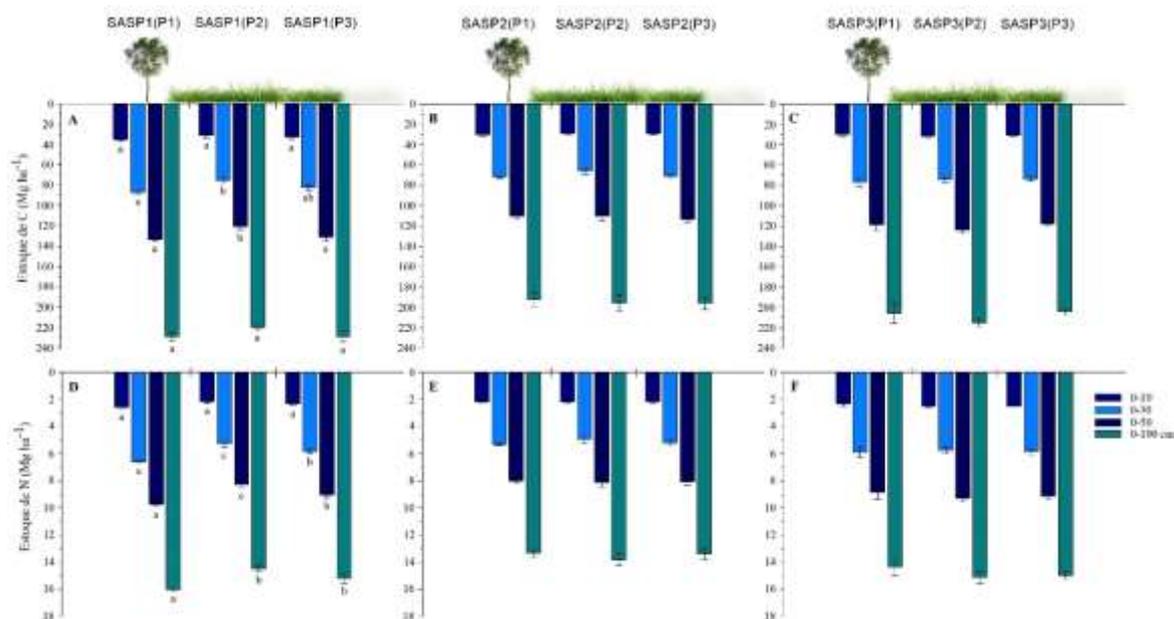


Figura 12. Estoques de carbono (A;B;C) e nitrogênio (D;E;F) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, localizados em Sete Lagoas/MG. SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (09 anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra ou sem letras, em uma mesma profundidade ou coluna e em um mesmo sistema, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0,05$ ). As barras representam o erro-padrão da média.

Comparando os diferentes sistemas avaliados (Figura 13, Tabela A11), a PM apresentou estoques de C iguais à VN e ao SASP1, diferenciando-se dos demais usos no perfil de solo até 30 cm. Já nos perfis de 0-50 e 0-100 cm, a PM e o SASP1 apresentaram estoques de C superiores à VN. O SAP obteve os menores estoques, nos perfis de 0-30, 0-50 e 0-100 cm de profundidade e foi similar à SASP2 e SASP3 na camada de 0-10 cm. Os estoques de N (Figura 13; Tabela A11) não diferiram entre os usos PM e VN, os quais apresentaram os maiores valores em relação aos demais sistemas avaliados.

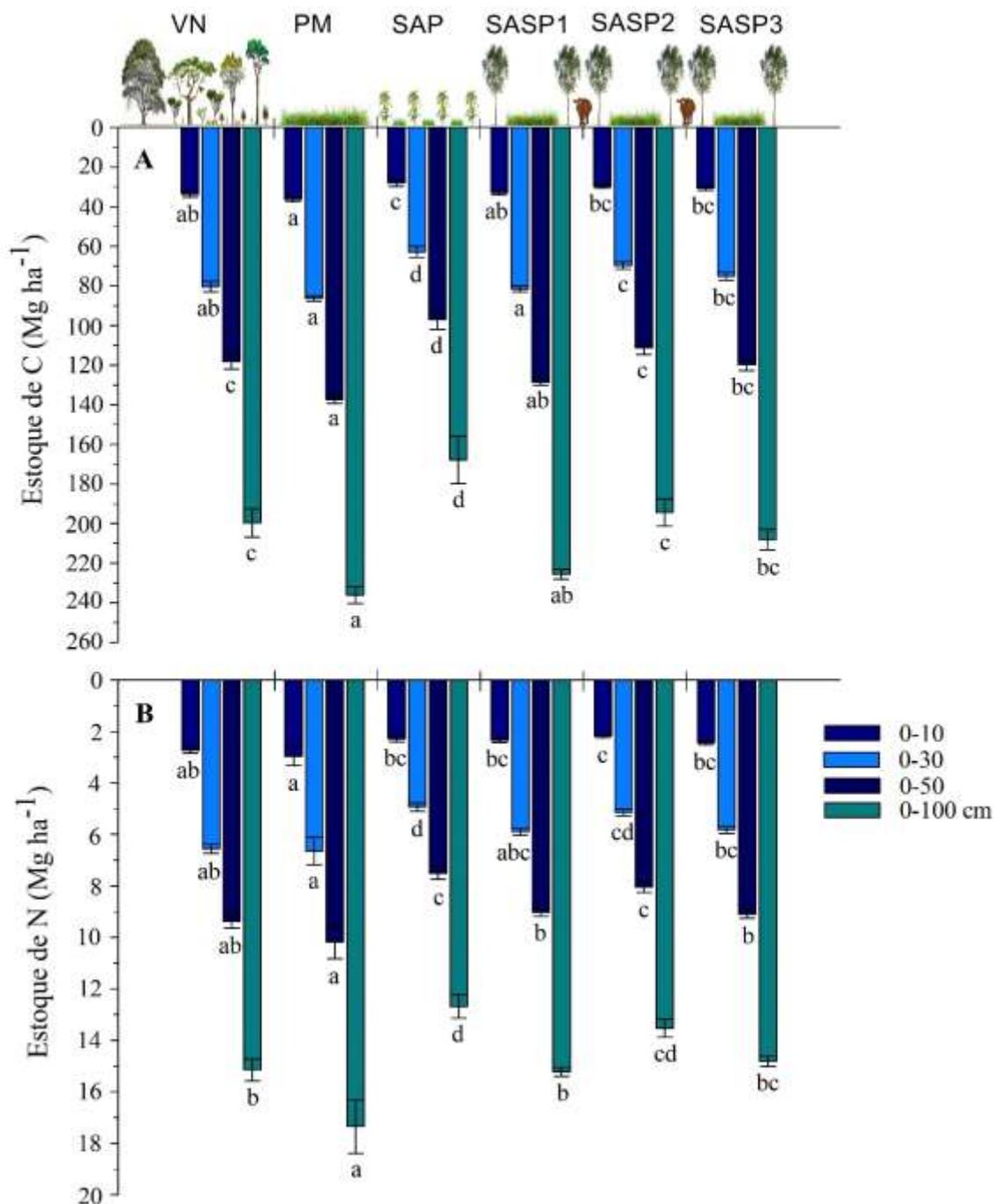


Figura 13. Estoques de carbono (A) e nitrogênio (B) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, localizados em Sete Lagoas/MG. VN = Vegetação nativa; PM = Pastagem manejada; SAP = sistema agropastoril; SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ). As barras representam o erro padrão.

#### 4.2.4 Discussão

##### 4.2.4.1 Fertilidade e densidade do solo

A densidade do solo foi mais elevada na PN em Curvelo e no SAP em Sete Lagoas (Figura 3) em razão da falta de manejo dos animais nas áreas. Nesses tratamentos, não foi definida uma taxa de lotação, ao longo do tempo, de forma que o pisoteio constante dos animais levou ao adensamento do solo. Esses fatores são a principal explicação para os resultados encontrados, uma vez que a compactação do solo observada na área é um reflexo direto do aumento da densidade (Phukubye *et al.* 2022). Isso resulta em redução da infiltração de água, possibilidade de ocorrência de erosão e diminuição da atividade biológica no solo, prejudicando o desenvolvimento das raízes das plantas, limitando a absorção de água e nutrientes. A VN apresentou a menor densidade, em todas as áreas, pela menor perturbação do solo e pela diversidade de raízes que ajudam a manter a estrutura do solo. Os sistemas agrossilvipastoris (SASP) se assemelham à vegetação nativa pela diversidade de culturas e manejo adequado das plantas e animais nas áreas (Conceição *et al.* 2017; Freitas *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024).

Os resultados encontrados, em relação aos teores de nutrientes em Curvelo, com maiores índices em VN, foi um reflexo do manejo da fertilidade dos sistemas manejados, uma vez que PM e VN não recebiam adubação desde o ano de 2015. A exportação de nutrientes, nos sistemas agrícolas, sem a devida reposição via manejo de adubação, foi responsável pela redução da fertilidade do solo ao longo do tempo. O equilíbrio foi mantido em VN, uma vez que os nutrientes são reciclados continuamente na floresta, por meio da decomposição de matéria orgânica, fixação de nitrogênio por bactérias simbióticas nas raízes e ciclagem de nutrientes entre diferentes camadas do solo (Frazão *et al.*, 2010; Cherubin *et al.*, 2016; Freitas *et al.*, 2017). O SASP foi que mais se assemelhou à VN, fato que se deve ao componente florestal fornecer mais matéria orgânica ao solo, aumentando a diversidade de material e a decomposição lenta dos resíduos florestais, com a maior quantidade de lignina, ao longo do tempo, adicionando nutrientes ao solo e melhorando sua fertilidade (Vásquez *et al.*, 2021). Esse sistema só foi adubado na época de plantio e isso influencia na perda de fertilidade, ao longo dos anos, uma vez que a coleta foi realizada sete anos após a última adubação, não havendo assim reposição dos nutrientes (Tabela A3).

Em Sete Lagoas, os maiores teores de nutrientes foram encontrados na pastagem manejada (PM), apresentando maior correlação com o CP1 (Figura 4) e intermediários nos sistemas agrossilvipastoril (SASP). Isso se deve ao manejo adequado da pastagem que é fundamental para a manutenção da fertilidade do solo. Práticas como rotação do pastejo animal, controle de erosão e uso de técnicas de conservação do solo ajudam a preservar a saúde do solo e sua capacidade de sustentar o crescimento das plantas, o que gera aumento da biomassa das gramíneas tanto sobre o solo como a radicular. A presença do componente arbóreo também aumenta a disponibilidade de matéria orgânica sobre o solo, influenciando assim a disponibilidade dos nutrientes. Nessas áreas também há maior adição de fertilizantes e manejo (Tabela A3), o que contribuiu para reposição dos nutrientes do solo (Eze *et al.* 2018).

#### 4.2.4.2 Teores e Estoque de Carbono e Nitrogênio do solo

Este estudo evidenciou que os pontos de amostragem, dentro dos sistemas integrados, não exerceram influência significativa nos resultados obtidos, para os teores e estoques e de C do solo, nas duas áreas avaliadas, exceto no sistema com maior tempo de implantação. Isso pode estar relacionado à maior estabilização da matéria orgânica do solo do sistema SASP1 em Sete Lagoas (Figuras 5 e 7). Esses resultados diferem daqueles observados em estudos prévios, realizados por vários trabalhos, nos quais o ponto próximo ao componente arbóreo obteve os maiores teores e estoques de C e N do solo, diminuindo no centro da aleia (Guillot *et al.* 2019; Abreu *et al.* 2020; Oliveira *et al.* 2021). Essa uniformidade, nos teores e estoques observados dentro do sistema, está relacionada ao manejo das culturas, com cultivos rotacionados e adubação dentro da aleia, o que aumentou a serapilheira, em todo o sistema e a biodiversidade de microrganismos, favorecendo a decomposição da matéria orgânica adicionada e aumento dos estoques de C e N ao longo do transecto avaliado (Freitas *et al.* 2020; Ngaba *et al.* 2020).

O sistema integrado com 13 anos (SASP1) apresentou diferenças, nos estoques de C e N, nos perfis de 0-30 e 0-50 cm de profundidade, com menores valores em P2 (Figura 12; Tabela A10). Essa variação espacial do C e N, no sistema com 13 anos, em Sete Lagoas (SASP1) e este resultado podem estar relacionados ao tempo e ao manejo contínuo com culturas anuais, dentro do sistema de aleias, o que não ocorreu no experimento de Curvelo, que, durante os seis anos subsequentes ao plantio, o sistema integrado foi mantido somente com a forrageira e o componente arbóreo. Borges *et al.* (2019) e Abreu *et al.* (2020) observaram, nos anos iniciais de condução do sistema integrado, maiores estoques de C e N, no ponto mais próximo à árvore (P1) e esse fato pode estar relacionado à maior deposição de resíduos do componente florestal, em superfície e subsuperfície, como folhas, caules, flores, sementes e raízes, contribuindo para o acúmulo de MOS, melhorando a ciclagem dos nutrientes, influenciando assim nos estoques de C e N no solo (Conceição *et al.* 2017). A utilização de calcário e fertilizantes, nas áreas de cultivo, na época de plantio, também, gera uma estabilidade no sistema, pois favorece o desenvolvimento das culturas e ainda os sistemas radiculares das gramíneas, que possuem alta taxa de renovação, proporcionando maior aporte de matéria orgânica e teor de carbono no solo (Eze *et al.* 2018; Ngaba *et al.*, 2020). Adicionalmente, no ponto de amostragem P2 (localizada há 3 m do componente arbóreo), as culturas de grãos e as forrageiras cultivadas também sofrem influência do sombreamento. Sendo assim, os animais adotam esse ponto como local preferencial de pastejo por proporcionar maior conforto térmico (Diniz *et al.*, 2021).

Comparando os teores de C do solo entre os sistemas de uso da terra, na área experimental de Curvelo, obtiveram-se os maiores valores em VN até 40 cm de profundidade, enquanto SASP e PM apresentaram resultados semelhantes, em todas as profundidades avaliadas e maiores que VN, nas camadas mais profundas (70-80, 80-90 e 90-100 cm) (Figura 6 e Tabela A5). Esses resultados podem ser atribuídos ao aprofundamento das raízes que podem melhorar a estabilidade do solo, aumentar a capacidade de retenção de água e nutrientes, promover a ciclagem de nutrientes,

melhorar a resiliência do sistema às condições climáticas adversas e pode aumentar a produtividade em longo prazo (Ngaba *et al.*, 2020; Cá *et al.*, 2022).

Os estoques C e N do solo em Curvelo também foram superiores na VN, porém até 1 m de profundidade (0-100 cm) os estoques de N se igualaram entre a VN e o sistema integrado (SASP) (Figura 11; Tabela A 9). Esses resultados diferem daqueles encontrados por Freitas *et al.* (2020), em amostragem realizada na mesma área experimental, em 2018, com três anos de idade, em que os estoques de C foram semelhantes entre o SASP e a VN. O manejo empregado na implantação do sistema contribuiu para aquele resultado positivo, em relação ao acúmulo de C no solo, nos anos iniciais, porém este estudo demonstrou que a ausência de intervenções de manejo na área, ao longo do tempo, culminou em perda de C no solo ao longo dos anos. Estudos prévios demonstraram que os sistemas integrados de produção são capazes de aumentar os estoques de C e N do solo, uma vez que aumentam a serapilheira sobre o solo e abaixo do solo, com a renovação radicular constante das gramíneas (Shvaleva *et al.*, 2014; Guillot *et al.* 2019; Beuschel *et al.* 2019; Freitas *et al.* 2020). Todavia precisam ser bem manejados, com práticas de manejo e adubação dos componentes de produção (Varela *et al.* 2022; Ribeiro *et al.* 2023). A falta de condução dos SASP e das pastagens (PM e PN), em Curvelo, explica os resultados encontrados e a diminuição nos estoques de C, uma vez que não ocorreu condução da pastagem e do componente arbóreo nos últimos quatro anos que antecederam a amostragem (Tabela A3).

Os resultados obtidos, na área experimental de Sete lagoas, (Figura 9; Tabela A 7) evidenciam a capacidade dos sistemas integrados e das pastagens manejadas, em aumentar os teores de C no solo, desde que esses sejam conduzidos e manejados ao longo do tempo. Os estoques de C dos SASPs foram semelhantes ao da VN e, nos perfis avaliados de 0-50 e 0-100 cm, o sistema integrado SASP1 superou a VN. Os estoques de N também foram semelhantes entre SASP1 e VN, em todas as profundidades e, no perfil de 0-100 cm, os estoques de N em PM foi superior a todos os outros tratamentos (Figura 13; Tabela A11). No SASP, a presença do componente florestal diversifica a serapilheira do solo favorecendo a biodiversidade de microorganismos (Ribeiro *et al.* 2023). As pastagens bem manejadas elevam os teores de C no solo pela quantidade de biomassa vegetal produzida, principalmente radicular. Estudos ressaltaram que sistemas integrados bem conduzidos, ao longo tempo, podem igualar ou mesmo apresentar estoques de C superiores à vegetação nativa (Moreira *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.* 2023), contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e também favorecendo a qualidade do solo (Freitas *et al.* 2022). Isso ocorre, em razão do acúmulo de matéria orgânica no solo, por meio da serapilheira, sobretudo da árvore e também da biomassa radicular, principalmente pelas gramíneas (Deng e Shangguan, 2016).

Moreira *et al.*, (2022), em trabalho realizado na mesma área, em Sete Lagoas, também encontraram maiores resultados de estoque de C e N, para o SASP1 e relacionaram esses resultados à maior idade do sistema, uma vez que o sistema mais velho tem o componente florestal mais desenvolvido, em altura e diâmetro à altura do peito (DAP), influenciando na dinâmica do C e N no solo, além da maior quantidade de dejetos animais deixados no solo por maior tempo de condução de pastejo na área. Nos sistemas mais antigos, o maior crescimento da árvore e também

o aprofundamento das raízes melhoram a ciclagem de nutrientes em profundidade, gerando maior estabilidade do sistema e deposição de serapilheira no solo, aumentando assim os estoques de C e N (Cardinael *et al.*, 2018; Cá *et al.*, 2022).

Comparando as estratégias de manejo, nos sistemas integrados dos dois locais avaliados, o experimento de Sete Lagoas está sobre constante monitoramento e condução, realizando-se assim a renovação das pastagens e a rotação de culturas dentro dos SASP. Já na área de Curvelo, não foi realizado o monitoramento e manejos contínuos, ao longo do tempo, o que explica os resultados encontrados. E, mesmo com as falhas na condução e manejo do SASP em Curvelo, verificou-se aumento, nos estoques de N no perfil de 0-100 cm, uma vez que se igualou aos estoques observados em VN.

Ao comparar as perdas, nos estoques de C do solo, nos diferentes usos agrícolas, em relação à VN em Curvelo até 100cm de profundidade, o SASP reduziu os estoques de C em 23,2%, seguido pela PM (24,2 %) e pela PN (30 %). Um fator que pode ter influenciado os resultados no SASP é o arranjo do sistema integrado de produção, uma vez que o sombreamento ocasionado pelo componente arbóreo reduz biomassa aérea e radicular, influenciando assim os estoques de C e N. Esses efeitos foram constatados por Alves *et al.* (2023), que observaram menor produção de biomassa próximo às árvores do sistema silvipastoril, evidenciando assim o impacto do sombreamento sobre a produção da biomassa.

Os estoques de C, nos sistemas SASP2 e SASP3, em Sete Lagoas, não apresentaram diferença em relação aos estoques da VN nas profundidades de 0-10, 0-50 e 0-100 cm. No entanto o SASP1 mostrou um aumento de C, nas camadas de 0-30, 0-50 e 0-100 cm, com incrementos de 1,16 Mg ha<sup>-1</sup>, 10,24 Mg ha<sup>-1</sup> e 25,91 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em comparação com a VN. Assim, foi possível observar que o manejo e o tempo de implantação do sistema agrossilvipastoril foram eficazes no acúmulo de C no solo, já que o sistema com treze anos, após a implantação, obteve ganhos significativos de C em relação à VN.

#### **4.2.5 Conclusão**

Este estudo demonstrou que os sistemas integrados de produção agropecuária, implantados no Cerrado brasileiro, são capazes de aumentar os estoques de C e N no solo, ao longo do tempo, podendo superar os estoques da vegetação nativa, desde que sejam bem conduzidos durante todo o ciclo de produção. Os resultados encontrados, na área experimental de Sete Lagoas, evidenciam a necessidade de estudo desses sistemas em longo prazo.

Tanto sistemas de pastagens solteiras quanto sistemas integrados de produção agropecuária apresentaram melhorias na fertilidade do solo e podem ser indicados para a recuperação de áreas degradadas, contribuindo com a redução das emissões dos gases de efeito estufa, desde que sejam bem manejados e conduzidos ao longo do tempo.

#### 4.2.6 Referências

- Abreu, L.H.G. de, de Freitas, I.C., Santana, P.H.L., de Almeida Barbosa, D.L., Santos, L.D.T., Santos, M.V., Sanglard, D.A., Frazão, L.A., 2020. Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. *Agrofor. Syst.* 94, 2343–2353. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00554-x>
- Almeida, L.L. de S., Frazão, L.A., Lessa, T.A.M., Fernandes, L.A., Veloso, Á.L. de C., Lana, A.M.Q., de Souza, I.A., Pegoraro, R.F., Ferreira, E.A., 2021. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Res.* 205, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>
- Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., Bol, R., Collins, C., Lal, R., Leifeld, J., Minasny, B., Pan, G., Paustian, K., Rumpel, C., Sanderman, J., van Groenigen, J.W., Mooney, S., van Wesemael, B., Wander, M., Chabbi, A., 2020. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nat. Commun.* 11, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- Araújo, N.C.A., Frazão, L.A., Freitas, I.C. de, Ferreira, E.A., Freitas, D.A., Santos, M.V., Sanglard, D.A., Fernandes, L.A., 2020. Soil chemical and microbiological attributes under integrated production system in Oxisol of degraded pasture. *Aust. J. Crop Sci.* 1772–1778. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.11.p2535>
- Beuschel, R., Piepho, H.-P., Joergensen, R.G., Wachendorf, C., 2019. Similar spatial patterns of soil quality indicators in three poplar-based silvo-arable alley cropping systems in Germany. *Biol. Fertil. Soils* 55, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1324-3>
- Borges, W.L.B., Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2019. Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. *Agrofor. Syst.* 93, 2111–2119. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0329-0>
- Bossio, D.A., Cook-Patton, S.C., Ellis, P.W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., Wood, S., Zomer, R.J., von Unger, M., Emmer, I.M., Griscom, B.W., 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nat. Sustain.* 3, 391–398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Cá, J., Lustosa Filho, J.F., da Silva, N.R., de Castro, C.R.T., de Oliveira, T.S., 2022. C and N stocks in silvopastoral systems with high and low tree diversity: Evidence from a twenty-two year old field study. *Sci. Total Environ.* 833, 155298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155298>
- Cardinael, R., Guenet, B., Chevallier, T., Dupraz, C., Cozzi, T., Chenu, C., 2018. High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system – combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences* 15, 297–317. <https://doi.org/10.5194/bg-15-297-2018>
- Cerri, C.E.P., Cerri, C.C., Maia, S.M.F., Cherubin, M.R., Feigl, B.J., Lal, R., 2018. Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the cerrado for advancing food security and mitigating climate change. *Sustainability* 10, 989. <https://doi.org/10.3390/su10040989>
- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Cerri, C.E.P., Tormena, C.A., Cerri, C.C., 2016. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80, 215–226. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>

- Damian, J.M., da Silva Matos, E., e Pedreira, B.C., de Faccio Carvalho, P.C., de Souza, A.J., Andreote, F.D., Premazzi, L.M., Cerri, C.E.P., 2021. Pastureland intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. *Appl. Soil Ecol.* 160, 103858. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103858>
- Eze, S., Palmer, S.M., Chapman, P.J., 2018. Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. *J. Environ. Manage.* 223, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.013>
- Freitas, Igor Costa de, Alves, M.A., Pena, A.N.L., Ferreira, E.A., Frazão, L.A., 2023. Changing the land use from degraded pasture into integrated farming systems enhance soil carbon stocks in the Cerrado biome. *Acta Sci. Agron.* 46, e63601. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.63601>
- Freitas, Igor C. de, Ferreira, E.A., Alves, M.A., de Oliveira, J.C., Frazão, L.A., 2023. Growth, nodulation, production, and physiology of leguminous plants in integrated production systems. *Agrosyst. Geosci. Environ.* 6. <https://doi.org/10.1002/agg2.20343>
- Guillot, E., Bertrand, I., Rumpel, C., Gomez, C., Arnal, D., Abadie, J., Hinsinger, P., 2021. Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: Comparison with a monocropping system. *Eur. J. Soil Biol.* 105, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103330>
- Guillot, E., Hinsinger, P., Dufour, L., Roy, J., Bertrand, I., 2019. With or without trees: Resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. *Soil Biol. Biochem.* 129, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.011>
- Silva, L., M. S. Oliveira, D., S. Santos, R., A. Oliveira, P., A. F. Freitas, D., R. Cherubin, M., E. P. Cerri, C., 2024. Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: A meta-analysis. *Geoderma Reg.* 36, e00761. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00761>
- Moreira, E.D.S., Gontijo Neto, M.M., Lana, Â.M.Q., Borghi, E., Santos, C.A. dos, Alvarenga, R.C., Viana, M.C.M., 2018. Production efficiency and agronomic attributes of corn in an integrated crop-livestock-forestry system. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 53, 419–426. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000400003>
- Moreira, E. D. S.; Oliveira, A. F. de; Santos, C. A. dos; Gonçalves, L. C.; Viana, M. C. M.; Marriel, I. E.; Gontijo Neto, M. M.; Alvarenga, R. C.; Lana, Â. M. Q. Soil carbon stock and biological activity in silvopastoral systems planted with. *Soil research*, v. 60, n. 7, p. 705–718, 2022. DOI 10.1071/sr21223. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1071/sr21223>.
- Ngaba, M.J.Y., Ma, X.-Q., Hu, Y.-L., 2020. Variability of soil carbon and nitrogen stocks after conversion of natural forest to plantations in Eastern China. *PeerJ* 8, e8377. <https://doi.org/10.7717/peerj.8377>

- Oliveira, A.F. de, dos Santos, C.A., Gonçalves, L.C., Viana, M.C.M., Neto, M.M.G., da Silva, E.A., Lana, Â.M.Q., 2024. Soil organic carbon stock and litter mass in silvopastoral systems with Eucalyptus. *Agrofor. Syst.* <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00960-5>
- Oliveira, J. de C. de., Azevedo, A. M., Ribeiro, J. M., Freitas, I. C., Dias, R. F., Duarte, A. C. S., Melo, P. F., Veloso, Á. L., & Frazão, L. A.. (2021). Sampling representativeness of soil carbon and physiological parameters of marandu palisadegrass in a tropical silvopastoral system. *Scientia Agricola*, 78, e20200176. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0176>
- Phukubye, K., Mutema, M., Buthelezi, N., Muchaonyerwa, P., Cerri, C., Chaplot, V., 2022. On the impact of grassland management on soil carbon stocks: a worldwide meta-analysis. *Geoderma Reg.* 28, e00479. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00479>
- Polanía-Hincapié, K.L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M.R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F.A., Silva-Olaya, A.M., 2021. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma* 386, 114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>
- Ribeiro, F.P., Pulrolnik, K., Vilela, L., Gatto, A., 2022. Deposição, decomposição e conteúdo de nutrientes de serapilheira em área de integração lavoura-pecuária-floresta na região do Cerrado. *Pesqui. Florest. Bras.* 42. <https://doi.org/10.4336/2022.pfb.42e201902072>
- Ribeiro, J.M., Freitas, I.C. de, Brito, B.G.S. e., Fernandes, L.A., Leite, L.F.C., Barbosa, D.L. de A., Santos, M.V., Cerri, C.E.P., Frazão, L.A., 2023. Agrosilvopastoral system as a potential model for increasing soil carbon stocks: a century model approach. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 47. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220136>
- Rillig, M.C., Leifheit, E., Lehmann, J., 2021. Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLoS Biol.* 19, e3001130. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001130>
- Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G.J., 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
- Santos, C.A. dos, Oliveira, A.F. de, Moreira, E.D.S., Gonçalves, L.C., Viana, M.C.M., Gontijo Neto, M.M., Lana, Â.M.Q., 2023. Influence of shade on productivity and nutritional value of *Urochloa decumbens* in silvopastoral systems using different spatial arrangements of eucalyptus cultivars. *Trop. Grassl.-Forrajes Trop.* 11, 169–182. [https://doi.org/10.17138/tgft\(11\)169-182](https://doi.org/10.17138/tgft(11)169-182)
- Santos, R.S., Zhang, Y., Cotrufo, M.F., Hong, M., Oliveira, D.M.S., Damian, J.M., Cerri, C.E.P., 2023. Simulating soil C dynamics under intensive agricultural systems and climate change scenarios in the Matopiba region, Brazil. *J. Environ. Manage.* 347, 119149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119149>
- Silva, B. de O., Moitinho, M.R., Panosso, A.R., Oliveira, D.M. da S., Montanari, R., Moraes, M.L.T. de, Milori, D.M.B.P., Bicalho, E. da S., La Scala, N., Jr, 2024. Implications of converting native forest areas to agricultural systems on the dynamics of CO<sub>2</sub> emission and carbon stock in a Cerrado soil, Brazil. *J. Environ. Manage.* 358, 120796. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120796>

- Souza, E.C. de, Salman, A.K.D., Cruz, P.G. da, Veit, H.M., Carvalho, G.A. de, Silva, F.R.F. da, Schmitt, E., 2019. Thermal comfort and grazing behavior of Girolando heifers in integrated crop-livestock (ICL) and crop-livestock-forest (ICLF) systems. *Acta Sci.* 41, 46483. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.46483>
- Vásquez, H.V., Valqui, L., Bobadilla, L.G., Arbizu, C.I., Alegre, J.C., Maicelo, J.L., 2021. Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon* 7, e07725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07725>

## Apêndice

Tabela A1 Atributos de fertilidade e densidade aparente do solo, em diferentes sistemas de uso do solo, na área experimental de Curvelo, MG.

Uso da terra	Prof	pH em água	P Mehlich (mg dm <sup>-3</sup> )	P remanescente (mg L <sup>-1</sup> )	K (mg dm <sup>-3</sup> )	Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	H + Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	t (cmolc dm <sup>-3</sup> )	T (cmolc dm <sup>-3</sup> )	V (%)	Mat. Org. (g kg <sup>-1</sup> )	Densidade
VN	0-5	5,8	6,7	17,1	95,9	5,9	1,1	0,3	5,5	7,6	12,8	56,8	45,5	0,8
VN	5_10	5,2	2,3	13,6	54,8	2,4	0,7	0,9	8,2	4,2	11,5	27,3	33,0	0,8
VN	10_20	4,8	1,3	10,8	32,9	0,9	0,3	1,9	7,5	3,1	8,7	15,2	27,1	0,8
VN	20-30	4,7	1,0	9,5	21,9	0,5	0,2	2,0	9,1	2,8	9,9	8,5	22,4	0,8
PN	0-5	7,2	15,6	20,7	241,1	9,2	2,2	0,0	1,6	12,0	13,6	88,3	45,4	0,9
PN	5_10	6,7	4,7	19,5	145,2	7,2	1,9	0,0	2,4	9,4	11,8	79,7	38,1	0,9
PN	10_20	6,2	2,2	16,6	115,1	5,0	1,5	0,0	3,5	6,8	10,3	65,9	31,2	0,9
PN	20-30	5,9	2,1	13,3	104,1	3,5	0,9	0,0	4,2	4,7	8,9	52,3	26,6	0,8
PM	0-5	5,3	31,5	20,7	175,8	4,4	1,0	0,1	2,1	6,0	7,9	72,5	40,9	1,0
PM	5_10	4,8	25,5	15,0	56,2	1,6	0,5	0,8	2,7	3,1	5,0	45,5	29,4	1,0
PM	10_20	5,0	5,8	13,2	39,9	2,0	0,5	0,6	2,4	3,2	5,0	49,7	27,1	0,9
PM	20-30	5,2	6,6	11,9	36,2	2,2	0,5	0,4	2,3	3,2	5,1	53,1	22,9	0,9
SASP1P1	0-5	5,5	7,3	20,6	72,5	5,6	1,0	0,0	2,4	6,9	9,2	71,8	48,2	0,8
SASP1P1	5_10	5,3	3,4	14,7	38,0	2,4	0,7	0,7	2,6	3,9	5,7	54,2	36,5	0,9
SASP1P1	10_20	4,9	2,8	13,6	27,2	1,5	0,5	1,1	2,4	3,1	4,5	44,7	33,7	0,9
SASP1P1	20-30	4,8	1,9	11,2	19,9	1,0	0,4	1,4	2,9	2,8	4,4	33,0	35,6	0,9
SASP1P2	0-5	6,2	10,4	19,5	53,0	6,4	1,2	0,1	1,7	7,9	9,5	79,5	39,5	0,9
SASP1P2	5_10	5,6	5,8	14,4	39,7	3,7	0,8	0,5	2,2	5,1	6,8	64,1	34,9	1,0
SASP1P2	10_20	5,4	3,0	13,0	48,6	2,6	0,6	0,8	2,0	4,1	5,4	54,6	29,6	0,9
SASP1P2	20-30	5,1	1,2	9,2	24,3	1,0	0,4	1,2	2,2	2,7	3,6	38,1	24,8	0,9

SASP1P3	0-5	6,1	13,7	17,1	67,0	7,2	1,5	0,1	1,5	9,0	10,4	82,9	46,8	0,9
SASP1P3	5_10	5,4	8,1	11,9	36,2	2,9	0,8	0,6	2,1	4,4	5,9	61,9	36,3	0,9
SASP1P3	10_20	5,0	2,4	9,2	23,6	1,0	0,4	1,4	2,3	2,9	3,7	37,8	34,2	0,9
SASP1P3	20-30	4,9	1,7	8,7	19,9	0,8	0,3	1,6	2,3	2,7	3,4	33,0	31,7	0,9
SASP2P1	0-5	5,6	10,2	15,4	100,9	5,4	0,9	0,1	2,2	6,7	8,8	73,4	48,9	0,8
SASP2P1	5_10	5,3	6,5	10,0	56,0	2,6	0,5	0,5	2,3	3,8	5,5	58,1	36,3	0,9
SASP2P1	10_20	5,2	7,9	8,8	44,9	1,7	0,5	0,7	2,2	2,9	4,4	51,5	31,4	0,9
SASP2P1	20-30	5,3	8,1	8,0	35,5	1,5	0,5	0,6	1,9	2,6	3,9	52,6	28,4	0,9
SASP2P2	0-5	6,4	22,6	14,8	72,0	8,8	1,2	0,0	1,3	10,2	11,5	88,6	42,2	0,9
SASP2P2	5_10	5,8	6,9	11,0	33,6	4,0	0,6	0,2	2,1	4,9	6,8	67,4	30,7	1,0
SASP2P2	10_20	5,4	2,6	8,6	22,4	2,0	0,6	0,6	2,3	3,2	4,9	53,3	25,9	0,9
SASP2P2	20-30	5,1	1,8	6,7	16,0	1,2	0,4	0,9	2,7	2,6	4,3	38,2	20,4	0,9
SASP2P3	0-5	6,5	12,9	17,0	100,0	8,1	1,5	0,0	1,3	9,9	11,2	87,9	45,5	0,9
SASP2P3	5_10	5,7	9,7	11,8	48,3	3,8	0,7	0,2	2,1	4,7	6,6	67,6	34,6	0,9
SASP2P3	10_20	5,4	3,6	10,7	31,7	2,1	0,5	0,6	2,3	3,2	4,9	52,0	30,5	0,9
SASP2P3	20-30	5,2	2,0	8,3	21,7	1,5	0,4	0,8	2,3	2,8	4,3	42,6	27,3	0,9
SASP3P1	0-5	5,7	15,3	15,7	118,3	5,9	1,2	0,1	4,4	7,4	11,7	62,5	40,9	0,8
SASP3P1	5_10	5,3	14,1	11,6	78,3	3,4	0,8	0,5	5,6	4,8	9,9	43,4	34,2	0,9
SASP3P1	10_20	5,1	8,5	9,4	50,0	1,8	0,4	1,0	5,4	3,4	7,7	30,6	31,6	0,9
SASP3P1	20-30	5,0	5,6	8,8	48,3	1,3	0,5	1,1	6,2	3,0	8,1	23,2	26,4	0,9
SASP3P2	0-5	6,5	15,2	22,1	187,6	8,4	1,7	0,0	2,6	10,6	13,1	80,0	41,8	0,9
SASP3P2	5_10	5,6	14,5	21,2	88,1	3,8	0,8	0,5	4,9	5,3	9,8	49,3	33,3	1,0
SASP3P2	10_20	5,3	8,8	13,2	47,5	2,2	0,5	0,9	5,3	3,7	8,1	34,0	29,8	0,9
SASP3P2	20-30	5,2	6,4	12,2	33,9	1,8	0,4	0,9	5,2	3,1	7,4	30,0	28,0	0,9
SASP3P3	0-5	6,7	11,1	17,6	117,9	9,4	1,7	0,0	2,7	11,4	14,1	80,4	44,5	0,9
SASP3P3	5_10	5,3	10,9	12,1	48,2	3,5	0,8	0,6	8,2	5,0	12,7	34,6	36,0	0,9
SASP3P3	10_20	5,1	5,9	10,8	37,5	1,9	1,1	1,0	9,9	4,0	12,9	23,4	30,7	0,9
SASP3P3	20-30	5,0	5,1	10,3	29,5	1,4	0,6	1,2	9,9	3,2	11,9	17,0	27,1	0,9

VN = Vegetação nativa; PN= pastagem nominal; PM = pastagem bem manejada; SASP= sistema agrossilvipastoril. P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 7 metros de distância da árvore de eucalipto.

Tabela A2. Atributos de fertilidade e densidade aparente do solo, em diferentes sistemas de uso do solo, na área experimental de Sete Lagoas, MG.

Uso da terra	Prof	pH em água	P Mehlich (mg dm-3)	P remanescente (mg L-1)	K (mg dm-3)	Ca (cmolc dm-3)	Mg (cmolc dm-3)	Al (cmolc dm-3)	H + Al (cmolc dm-3)	t (cmolc dm-3)	T (cmolc dm-3)	V (%)	Mat. Org. (g kg-1)	Densidade
VN	0-5	5,7	1,6	24,4	133,1	8,2	2,2	0,1	3,4	10,9	14,1	74,1	65,9	1,0
VN	5_10	5,8	0,8	22,7	129,0	6,9	1,9	0,3	3,2	9,4	12,4	70,7	57,3	0,9
VN	10_20	5,8	0,2	19,7	104,0	4,8	1,2	0,5	3,8	6,7	10,0	57,7	45,6	1,0
VN	20-30	5,6	0,4	17,7	74,9	3,1	1,0	0,8	3,0	5,1	7,3	50,9	36,5	1,0
PN	0-5	5,5	1,3	21,0	120,6	3,1	1,3	0,1	2,1	4,8	6,8	67,8	41,1	1,2
PN	5_10	5,6	0,9	18,6	87,4	2,4	1,0	0,3	2,7	3,9	6,3	55,8	33,6	1,2
PN	10_20	5,5	0,7	15,3	49,9	1,5	0,8	0,4	2,8	2,9	5,3	43,2	27,1	1,1
PN	20-30	5,5	0,4	14,5	37,4	1,2	0,6	0,5	2,6	2,4	4,5	40,5	24,7	1,1
SAP	0-5	5,5	1,6	18,8	94,2	2,9	0,9	0,5	6,8	4,5	10,8	37,5	37,8	1,0
SAP	5_10	5,6	1,6	17,3	72,8	2,8	0,9	0,5	6,5	4,3	10,4	37,2	35,4	1,0
SAP	10_20	5,6	1,8	16,7	47,1	3,2	0,6	0,5	5,6	4,5	9,6	38,5	30,6	1,0
SAP	20-30	5,6	1,4	14,0	34,2	2,5	0,7	0,5	4,8	3,8	8,1	40,6	26,6	1,0
SASP1P1	0-5	6,0	2,3	21,0	113,7	4,6	1,0	0,3	4,1	6,1	9,9	57,3	31,7	1,0
SASP1P1	5_10	6,0	1,7	18,4	100,6	4,0	0,8	0,4	5,1	5,4	10,1	49,2	28,2	1,0
SASP1P1	10_20	6,1	1,5	18,0	87,0	4,4	0,9	0,2	3,8	5,7	9,3	57,2	27,4	1,0
SASP1P1	20-30	6,0	0,7	17,8	65,2	3,2	0,9	0,2	3,6	4,5	7,9	53,4	23,1	1,0
SASP1P2	0-5	6,2	6,1	17,9	185,6	4,9	1,3	0,2	2,9	6,8	9,5	66,9	37,3	1,0
SASP1P2	5_10	6,2	2,1	15,5	114,2	4,3	1,1	0,5	3,7	6,1	9,4	56,9	31,7	1,1
SASP1P2	10_20	6,3	1,2	13,9	80,9	4,2	1,1	0,3	2,2	5,7	7,6	65,7	24,2	1,0

SASP1P2	20-30	6,3	0,6	11,7	52,4	3,3	1,0	0,2	1,8	4,5	6,1	68,6	18,6	1,0
SASP1P3	0-5	6,2	2,8	16,0	114,2	4,1	1,3	0,2	3,9	5,9	9,6	59,0	33,6	1,1
SASP1P3	5_10	6,2	5,4	16,9	95,2	4,6	1,0	0,3	3,6	6,2	9,6	60,0	33,0	1,1
SASP1P3	10_20	6,2	1,6	15,3	49,5	4,4	0,8	0,3	2,9	5,6	8,2	61,6	30,4	1,0
SASP1P3	20-30	6,1	0,7	13,9	42,8	3,4	0,8	0,3	2,6	4,6	6,9	60,7	23,4	1,0

---

VN = Vegetação nativa; PM = Pastagem bem manejada; SAP = sistema agropastoril; SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto.

Tabela A3 Descrição do manejo realizado nas áreas de estudo nos municípios de Curvelo e Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

Local de estudo	Curvelo	Sete Lagoas
<p>Descrição inicial</p>	<p>Pastagem de capim-braquiária (<i>Brachiaria decumbens Stapf</i>), que por 20 anos foi utilizada sem práticas definidas de manejo e sem taxa de lotação definida. O local foi caracterizado por solo exposto e presença de plantas daninhas.</p>	<p>Área nativa de Cerrado convertida em área agrícola por corte e queima em 1970. Cultivada com milho e sorgo para silagem até 2002. Área em pousio de 2002 a 2009.</p>
<p>Classificação e caracterização do solo</p>	<p>O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico com textura argilosa, com composição granulométrica nas profundidades de 0-30 cm de 94,8 g kg<sup>-1</sup>, 249,2 g kg<sup>-1</sup> e 656,0 g kg<sup>-1</sup> para areia, silte e argila, respectivamente (Embrapa, 2017). Conforme Araújo <i>et al.</i> (2020), a classificação deste solo apresentou baixo valor de pH (de 5,32), valores médios de Al<sup>3+</sup> (de 0,67 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), soma de bases de 2,30 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, acidez potencial de 2,88 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, capacidade de troca de cátions efetiva de 2,97 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, saturação por base de 41,08%, P Mehlich 1 de 0.47 mg dm<sup>-3</sup>, K de 0.16 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Ca de 1.54 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Mg de 0.59 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e saturação de alumínio 27,95%.</p>	<p>O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, com textura argilosa (SouzaTava <i>et al.</i>, 2013). O solo da área experimental apresentou 111 g kg<sup>-1</sup> de areia, 84 g kg<sup>-1</sup> de silte e 805 g kg<sup>-1</sup> de argila, e os seguintes atributos químicos na camada de 0-20 cm: pH (H<sub>2</sub>O) 5,5, 6,94 cmol<sub>c</sub> cm<sup>-3</sup> de H+Al, 18,1 mg dm<sup>-3</sup> de P Mehlich 1, 34,2 g kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica, 0,39 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> Al, 3,16 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca, 0,35 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Mg, 68 mg dm<sup>-3</sup> de K, soma de bases de 3,68 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, capacidade de troca catiônica de 10,62 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, saturação de bases de 35% e saturação de alumínio de 9,57% (Moreira <i>et al.</i> 2018).</p>
<p>Correção</p>	<p>Foi aplicado calcário, aproximadamente 90 dias antes da implementação do experimento, utilizando como referência a caracterização química do solo obtida anteriormente. Após a aplicação do calcário, o preparo convencional do solo foi realizado com aração e gradagem até 30 cm de profundidade.</p>	<p>Em maio de 2009, foram distribuídos 3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, em toda a área, na qual seriam implantados os sistemas agrossilvipastoris em 2009 (SASP1), 2011 (SASP2) e 2013 (SASP3), incluindo a área adjacente em que foi implantado o sistema agropastoril em 2009.</p> <p>Em setembro de 2011, foram aplicados 2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico na área experimental.</p>

		<p>Em agosto de 2014, foi distribuído a lanço em todos os sistemas 2 Mg ha<sup>-1</sup> calcário e 2 Mg ha<sup>-1</sup> gesso agrícola em superfície. Em novembro de 2014, foi realizada a adubação de cobertura distribuindo, a lanço, 250 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 250 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio.</p> <p>Em 2019, foi realizada a distribuição em superfície de 3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário + 2 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola.</p>
<p>Manejo das culturas</p>	<p>No plantio do eucalipto, foi utilizada adubação com 56 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato reativo e 35 kg ha<sup>-1</sup> de NPK (8-28-16). A adubação de cobertura foi aplicada 60 dias após o transplante e com 35 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, 14 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de amônio, 3 kg ha<sup>-1</sup> de borato de sódio e 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de zinco.</p>	<p>Os sistemas agrossilvipastoris foram implantados, em 2009, 2011 e 2013, em acordo com as seguintes práticas de manejo: o eucalipto foi plantado em sulcos com 200 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 120 g planta<sup>-1</sup> de fertilizante comercial NPK (06-30-06) + 0,5% de boro e 1,5% de zinco. A adubação de cobertura foi realizada sob projeção da copa com 120 g de NPK (20-00-20) planta<sup>-1</sup> uma semana após o plantio e com 200 g planta<sup>-1</sup> em 2012. Depois, em fevereiro do ano seguinte à implantação, 15 g de bórico ácido foram aplicados por planta sob a projeção da copa de cada árvore.</p>
	<p>O milho foi plantado com sete sementes m<sup>-1</sup> linear e espaçamento de 0,8 m entre linhas, totalizando 12 linhas de milho entre 2 linhas de eucalipto. As sementes de forragem foram misturadas com adubo de plantio e consorciadas com milho, utilizando 4 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis e espaçamento de 0,4 m entre linhas. Na adubação dessas culturas, durante o plantio, foram utilizados 400 kg ha<sup>-1</sup> de NPK (8-28-16)</p>	<p>No ano de implantação dos sistemas SASP e nas duas safras seguintes, foi semeado milho consorciado com capim piatã nas faixas entre os renques de eucalipto. Utilizou-se semeadora-adubadora de plantio direto, para semear sementes de milho simultaneamente, com 4 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis de <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã. O milho foi cultivado a 1 m das fileiras de</p>

	<p>e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (ureia e sulfato de amônio) para a adubação de cobertura.</p>	<p>eucalipto. Nos três ciclos agrícolas, a fertilização do milho foi realizada com 400 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante comercial NPK (28-08:-6) e a adubação de cobertura foi de 250 kg ha<sup>-1</sup> de ureia. As sementes das gramíneas foram tratadas com 5 g ha<sup>-1</sup> de fipronil.</p> <p>As mesmas recomendações de corretivos, insumos e práticas, para o cultivo do milho consorciado com o capim piatã, foram utilizadas na área agropastoril (SAP) implantada em 2009.</p> <p>Após a colheita do milho, na terceira safra dos sistemas SASP1, SASP2, SASP3 e SAP, as pastagens com o capim piatã ficaram estabelecidas e passaram a ser manejadas conforme a disponibilidade de forragem e avaliadas até outubro de 2019.</p> <p>Na safra 2019/2020, a área dos três sistemas SASP foram cultivadas com soja em que foram aplicados 400 kg ha<sup>-1</sup> de NPK (04-30-16). Em 2020/2021, cultivou-se milho consorciado com capim piatã com aplicação de 400 kg ha<sup>-1</sup> de 08-28-16 e 250 kg ha<sup>-1</sup> de ureia.</p> <p>Após a colheita do milho, a área permaneceu com a pastagem de piatã estabelecida e manejada com pastejo intermitente, em acordo com a oferta de forragem até o momento da realização das amostragens de solo.</p>
<p>Manejo das pastagens</p>	<p>Para a pastagem bem manejada de B. brizantha cv. Marandu, utilizaram-se as mesmas recomendações de plantio e tratamentos de cultivo descritos anteriormente para gramíneas forrageiras no SASP.</p>	<p>A pastagem bem manejada (PM) consistiu de uma gleba de 5,5 ha com pastagem do capim piatã de primeiro ano, após implantação, que integra um sistema de integração</p>

		<p>lavoura-pecuária (SAP) em que são rotacionados anualmente em quatro glebas os cultivos de soja / milho + capim / pastagem de capim 1º ano / pastagem de capim 2º ano. Esse sistema ILP foi implantado e segue sendo conduzido com alguma variação na sequência de cultivos desde 2005.</p>
--	--	---

Tabela A4 Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção na área experimental de Curvelo, MG.

Sistema	Profundidade (cm)										
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
..... Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) .....											
SASPP1	24,00	21,06	18,94	14,90	12,96	12,12	11,08	9,72	9,23	8,31	8,18
SASPP2	29,10	24,06	18,66	12,94	12,72	11,62	10,37	9,50	8,82	8,22	7,68
SASPP3	26,54	24,26	20,76	15,84	12,94	11,76	11,02	9,62	9,00	8,34	7,64
CV%	15,04	14,91	13,98	13,59	13,10	13,98	17,86	16,94	15,02	13,64	13,65
..... Teor de N (g kg <sup>-1</sup> ) .....											
SASPP1	1,88	1,69	1,49	1,22	1,15	1,11	1,02	0,91	0,90	0,91	0,89
SASPP2	2,20	1,88	1,50	1,15	1,08	1,01	0,98	0,91	0,86	0,85	0,80
SASPP3	2,06	1,83	1,60	1,27	1,17	0,96	1,04	0,91	0,85	0,80	0,77
CV%	16,87	15,62	12,60	9,10	11,35	17,05	16,07	14,92	16,07	16,43	14,37

SASP = sistema agrossilvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 7 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A5. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental de Curvelo, MG.

Sistema	Profundidade (cm)										
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
..... Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) .....											
VN	45,56 a	39,02 a	29,46 a	22,64 a	17,14 a	12,66	9,77	8,18	6,69 b	5,81 b	5,57 b
PN	23,48 b	19,64 b	16,01 c	14,30 b	12,56 b	11,10	10,41	9,38	8,56 a	7,85 a	7,39 a
PM	26,20 b	22,24 b	22,08 b	15,10 b	12,30 b	13,28	9,41	9,52	8,39 a	8,16 a	7,90 a
SASP	26,55 b	23,13 b	19,45 bc	14,56 b	12,87 b	11,83	10,82	9,61	9,02 a	8,29 a	7,83 a
CV%	15,56	19,81	20,64	14,46	8,76	20,18	12,36	10,58	10,25	11,90	11,34
..... Teor de N (g kg <sup>-1</sup> ) .....											
VN	3,34 a	2,91 a	2,13 a	1,58 a	1,19 a	0,91	0,80	0,67	0,62 b	0,61 b	0,70
PN	1,66 b	1,40 b	1,14 c	1,06 b	0,94 c	0,91	0,84	0,81	0,81 a	0,75 a	0,73
PM	1,96 b	1,79 b	1,72 ab	1,19 b	0,97 bc	1,10	0,81	0,73	0,74 ab	0,75 a	0,78
SASP	2,05 b	1,80 b	1,53 bc	1,21 b	1,13 ab	1,03	1,01	0,91	0,87 a	0,85 a	0,82
CV%	15,75	21,71	24,65	17,34	13,26	20,53	16,58	18,8	16,25	12,12	15,52

VN= Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; PM = pastagem bem manejada; SASP = sistema agrossilvipastoril. Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A6. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, na área experimental de Sete Lagoas, MG.

Sistema	Profundidade (cm)										
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
..... Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) .....											
SASP1P1	51,68	39,28	35,14	32,14 a	30,06 a	27,22	25,12	24,10	23,68	23,52	22,96
SASP1P2	41,72	37,50	33,48	27,88 b	26,84 b	26,40	25,18	24,20	23,42	23,56	22,86
SASP1P3	45,60	37,54	34,72	31,54 a	30,40 a	26,96	25,28	24,44	23,96	23,30	22,98
CV%	17,46	8,16	4,34	6,10	4,85	5,35	6,01	5,99	6,62	7,39	5,35
SASP2P1	45,40	32,90	29,06	25,16	22,18	22,38	21,56	21,04	20,86	19,78	19,56
SASP2P2	41,74	31,42	27,08	24,40	23,14	22,16	21,52	21,78	20,88	19,78	18,90
SASP2P3	42,76	31,90	29,52	26,06	23,62	21,92	20,94	20,34	19,98	20,08	20,04
CV%	15,69	7,55	8,72	11,24	9,93	10,52	10,30	9,89	11,95	12,89	13,27
SASP3P1	39,52	36,60	32,68	29,26	25,58	22,66	21,90	22,24	21,98	21,72	21,62
SASP3P2	45,08	35,26	31,02	28,54	26,76	23,62	22,30	22,60	22,26	22,08	21,26
SASP3P3	43,84	34,56	30,48	27,22	24,42	22,46	21,60	21,28	21,40	20,92	21,04
CV%	16,84	8,11	10,03	13,44	11,59	9,59	11,37	9,30	7,59	6,77	7,24
..... Teor de N (g kg <sup>-1</sup> ) .....											
SASP1P1	3,60	3,06 a	2,70 a	2,45 a	2,10 a	1,88 a	1,63	1,65	1,54	1,53	1,49
SASP1P2	2,84	2,70 b	2,41 b	1,87 c	1,83 b	1,66 b	1,56	1,60	1,44	1,49	1,40
SASP1P3	3,16	2,74 b	2,55 ab	2,18 b	2,03 a	1,72 b	1,66	1,52	1,50	1,45	1,39
CV%	14,86	7,66	5,34	7,37	6,75	4,43	5,64	6,68	5,30	9,29	5,89
SASP2P1	3,17	2,50	2,16	1,87	1,60	1,54	1,41	1,37	1,36	1,29	1,28
SASP2P2	3,10	2,43	2,05	1,79	1,61	1,57	1,50	1,50	1,39	1,29	1,25
SASP2P3	3,08	2,37	2,20	1,82	1,64	1,45	1,39	1,31	1,35	1,24	1,24
CV%	13,71	6,63	11,10	10,36	6,21	12,74	7,76	9,19	6,71	9,70	12,51
SASP3P1	2,99	2,95	2,51	2,17	1,84	1,57	1,43	1,46	1,41	1,34	1,28
SASP3P2	3,55	2,79	2,38	2,08	1,93	1,67	1,50	1,47	1,34	1,41	1,33
SASP3P3	3,49	2,82	2,39	2,09	1,84	1,67	1,51	1,49	1,43	1,38	1,36
CV%	17,74	9,81	13,17	17,87	15,04	9,56	10,86	8,74	7,49	4,66	8,05

SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra ou sem letras, em uma mesma profundidade ou coluna e em um mesmo sistema, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A7. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental de Sete Lagoas, MG.

Sistema	Profundidade (cm)										
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
	Teor de C (g kg <sup>-1</sup> )										
VN	47,32	39,14a	32,22bc	26,98cd	24,60bc	23,20b	21,52cd	21,36bc	20,02b	19,52bc	18,46bc
PM	51,12	40,78a	35,72a	32,16a	30,72a	29,42a	27,64a	26,00a	24,60a	23,64a	23,30a
SAP	39,86	27,74d	26,30d	22,62e	19,90d	19,38c	18,60d	17,92d	17,20c	16,86c	16,52c
SASP1	46,33	38,11ab	34,45ab	30,52ab	29,10a	26,86a	25,19ab	24,25ab	23,69a	23,46a	22,93a
SASP2	43,30	32,07c	28,55d	25,21d	22,98c	22,15bc	21,34cd	21,05c	20,57b	19,88b	19,50b
SASP3	42,81	35,47b	31,39c	28,34bc	25,59b	22,91b	21,93bc	22,04bc	21,88ab	21,57ab	21,31ab
CV%	12,56	6,65	5,94	6,87	6,73	9,72	11,03	10,68	10,06	10,11	11,20
	Teor de N (g kg <sup>-1</sup> )										
VN	3,83	3,20a	2,66a	2,18ab	1,88b	1,70bc	1,57bc	1,50bc	1,39bc	1,36c	1,32bc
PM	4,29	3,20a	2,63a	2,35a	2,19a	1,98a	1,85a	1,68a	1,62a	1,47ab	1,47a
SAP	3,23	2,21c	2,03b	1,71c	1,51c	1,45d	1,39d	1,31d	1,29d	1,18d	1,19d
SASP1	3,20	2,83b	2,55a	2,17ab	1,99b	1,76b	1,62b	1,59ab	1,50b	1,49a	1,43ab
SASP2	3,12	2,43c	2,14b	1,83c	1,62c	1,52cd	1,44cd	1,39cd	1,37cd	1,27cd	1,26cd
SASP3	3,35	2,85b	2,42a	2,11b	1,87b	1,64bcd	1,48bcd	1,47bc	1,40bc	1,37bc	1,32bc
CV%	20,25	8,61	8,16	7,97	5,77	9,17	8,54	8,37	5,77	6,19	6,95

VN= Vegetação nativa; PM = Pastagem bem manejada; SAP = sistema agropastoril; SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A8. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistema integrado de produção, na área experimental de Curvelo, MG.

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-10	0-30	0-50	0-100
..... Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
SASPP1	20,52	53,88	79,07	123,66
SASPP2	24,23	55,21	78,28	120,40
SASPP3	23,36	57,97	81,47	123,70
CV%	14,66	11,92	10,54	10,76
..... Estoque de N (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
SASPP1	1,62	4,30	6,57	11,02
SASPP2	1,86	4,44	6,42	10,58
SASPP3	1,79	4,50	6,54	10,58
CV%	16,00	11,15	9,46	10,08

SASP = sistema agrossilvipastoril; P1 = ponto entre as linhas de eucalipto (renque); P2 = ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = ponto a 7 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias sem letras, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A9. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental de Curvelo, MG.

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-10	0-30	0-50	0-100
..... Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
VN	38,56 a	91,95 a	123,05 a	159,77 a
PN	20,14 b	47,95 b	71,84 b	111,80 b
PM	22,34 b	58,78 b	82,68 b	121,06 b
SASP	22,70 b	55,68 b	79,60 b	122,58 b
CV%	16,27	15,32	11,41	8,43
..... Estoque de N (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
VN	2,85 a	6,64 a	8,84 a	12,28 a
PN	1,43 b	3,44 b	5,31 b	8,91 b
PM	1,72 b	4,56 b	6,50 b	9,87 b
SASP	1,76 b	4,41 b	6,51 b	10,73 ab
CV%	17,40	18,21	15,96	13,67

VN = Vegetação nativa; PN = pastagem nominal; PM = pastagem bem manejada; SASP = sistema agrossilvipastoril. Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A10. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes pontos de amostragem, em sistemas integrados de produção, na área experimental de Sete Lagoas, MG.

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-10	0-30	0-50	0-100
..... Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
SASP1P1	35,38 a	86,85 a	133,39 a	228,59 a
SASP1P2	31,09 a	75,50 b	120,88 b	219,23 a
SASP1P3	32,70 a	82,05 ab	131,10 a	228,84 a
CV%	13,23	6,81	5,00	4,28
SASP2P1	30,46	72,09	110,03	192,02
SASP2P2	29,22	66,05	110,28	195,16
SASP2P3	29,52	71,02	113,21	195,78
CV%	11,20	7,23	7,44	8,17
SASP3P1	29,59	77,04	118,21	205,49
SASP3P2	31,97	74,44	123,71	214,83
SASP3P3	30,91	73,95	117,56	204,08
CV%	10,74	8,43	7,41	6,93
..... Estoque de N (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
SASP1P1	2,59 a	6,59 a	9,77 a	16,01 a
SASP1P2	2,16 a	5,29 c	8,27 c	14,46 b
SASP1P3	2,31 a	5,86 b	9,07 b	15,20 b
CV%	11,45	6,42	4,71	3,76
SASP2P1	2,20	5,31	7,99	13,35
SASP2P2	2,20	4,96	8,10	13,83
SASP2P3	2,15	5,18	8,06	13,37
CV%	9,71	8,16	6,92	6,24
SASP3P1	2,31	5,90	8,83	14,35
SASP3P2	2,52	5,73	9,30	15,12
SASP3P3	2,48	5,83	9,12	14,96
CV%	11,27	10,68	8,93	6,93

SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade); P1 = ponto entre as árvores de eucalipto; P2= ponto a 3 metros de distância da árvore de eucalipto; P3 = a 7,5 metros de distância da árvore de eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra ou sem letras, em uma mesma profundidade ou coluna e em um mesmo sistema, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

Tabela A11. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, em diferentes sistemas de uso da terra, na área experimental de Sete Lagoas, MG.

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-10	0-30	0-50	0-100
..... Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
VN	33,62 ab	80,31 ab	118,22 c	199,64 c
PM	36,29 a	86,30 a	137,30 a	235,98 a
SAP	28,09 c	62,79 d	96,97 d	167,87 d
SASP1	33,05 ab	81,46 a	128,46 ab	225,55 ab
SASP2	29,73 bc	69,72 c	111,18 c	194,32 c
SASP3	30,82 bc	75,15 bc	119,83 bc	208,14 bc
CV%	9,61	6,15	6,25	7,56
..... Estoque de N (Mg ha <sup>-1</sup> ) .....				
VN	2,73 ab	6,55 ab	9,38 ab	15,14 b
PM	2,97 a	6,64 a	10,18 a	17,34 a
SAP	2,27 bc	4,93 d	7,51 c	12,68 d
SASP1	2,35 bc	5,89 abc	9,03 b	15,22 b
SASP2	2,18 c	5,15 cd	8,05 c	13,52 cd
SASP3	2,44 bc	5,82 bc	9,09 b	14,81 bc
CV%	15,59	9,9	8,21	7,93

VN = Vegetação nativa; PM = Pastagem manejada; SAP = sistema agropastoril; SASP1 = sistema agrossilvipastoril 1 (13 anos de idade); SASP2 = sistema agrossilvipastoril 2 (11 anos de idade); SASP3 = sistema agrossilvipastoril 3 (nove anos de idade). Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma profundidade ou coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de t ( $p \leq 0.05$ ).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou primeiramente a influência do componente arbóreo dos sistemas silvipastoris na entrada e decomposição de serapilheira, efluxo de CO<sub>2</sub> e fertilidade do solo. Os resultados indicaram que o arranjo (disposição e espaçamento das árvores) afetou a dinâmica da serapilheira, nos renques e aleias do sistema integrado de produção, com maiores entradas de resíduos vegetais e decomposição mais acelerada próxima ao renque de árvores do sistema. Nossos resultados reforçam a importância do manejo adequado do sistema integrado, durante todo o ciclo de produção, para que efetivamente contribua para o aumento dos estoques de C e N ao longo do tempo.

Adicionalmente, este estudo constatou que introdução de sistemas integrados de produção agropecuária, em áreas previamente ocupadas com pastagens degradadas, recuperam a fertilidade do solo e aumentam os estoques de C e N no solo. De acordo com o tempo de condução e manejo do sistema, demonstrou-se que os estoques de C, em sistema agrossilvipatoril bem conduzido, igualam-se àqueles obtidos em pastagens bem manejadas e podem superar os estoques da vegetação nativa. Já o sistema sem condução adequada, ao longo do tempo, como, por exemplo, a adoção de rotação de culturas, reseedura da pastagem e desbaste do eucalipto, não incrementam carbono em níveis próximos à vegetação nativa.

Os resultados encontrados neste estudo poderão ser úteis, para calcular o sequestro de carbono, resultante das mudanças no uso do solo para sistemas integrados de produção agropecuária. Foi possível, por exemplo, observar ganho de até 25,91 Mg ha<sup>-1</sup> de C com a implantação de sistema agrossilvipatoril treze anos após implantação. Assim, os sistemas integrados constituem estratégias de manejo sustentáveis para viabilizar uma agricultura de baixa emissão de carbono.