

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Igor Costa de Freitas

**Estoques de carbono do solo e fisiologia de feijão-caupi e guandu em sistemas integrados de
produção**

**Montes Claros
2022**

Igor Costa de Freitas

Estoques de carbono do solo e fisiologia de feijão-caupi e guandu em sistemas integrados de produção

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 Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Leidivan Almeida Frazão

Coorientador: Prof. Dr. Evander Alves Ferreira

Montes Claros

Abril de 2022

Freitas, Igor Costa de.

F866e
2022

Estoques de carbono do solo e fisiologia de feijão-caupi e guandu em sistemas integrados de produção[manuscrito]/ Igor Costa de Freitas. Montes Claros, 2022.
76 f.:il.

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

Orientadora: Leidivan Almeida Frazão

Banca examinadora: Rodinei Facco Pegoraro, Carlos Juliano Albuquerque, Ivan Carlos Carreiro Almeida, Danúbia Aparecida Costa Nobre, Evander Alves Ferreira.

Inclui referências: 27-32; 52-55; 73-75.

1. Feijão-caupi -- Teses. 2. Guandu -- Teses. 3. Capim buffel -- Teses. 4. Eucalipto -- Teses. 5. Agrosilvicultura -- Teses. 6. Matéria orgânica -- Teses. 7. Solos -- Teor de carbono -- Teses. 8. Solos -- Teor de nitrogênio -- Teses I. Frazão, Leidivan Almeida . II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFMG
Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 27 dias do mês de abril de 2022, às 14:00 horas, sob a Presidência da Professora Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (Orientadora - ICA/UFMG), com a participação do Pesquisador Evander Alves Ferreira, D. Sc. (Coorientador - ICA/UFMG) e dos Professores Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (ICA/UFMG), Carlos Juliano Brant Albuquerque, D. Sc. (ICA/UFMG), Danúbia Aparecida Costa Nobre, D. Sc. (UFVJM), e Ivan Carlos Carreiro Almeida, D. Sc. (IFNMG), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Tese de **Igor Costa de Freitas**, aluno do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. Como resultado da defesa de tese intitulada "**Estoques de carbono do solo e fisiologia de feijão-caupi e andu em sistemas integrados de produção**", o aluno foi considerado **APROVADO**. 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.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do **ARTIGO 68** do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau de doutor, 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, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros/MG, 27 de abril de 2022.

Leidivan Almeida Frazão
Orientadora

Evander Alves Ferreira
Coorientador

Rodinei Facco Pegoraro
Membro

Carlos Juliano Brant Albuquerque
Membro

Danúbia Aparecida Costa Nobre
Membro

Ivan Carlos Carreiro Almeida
Membro



Documento assinado eletronicamente por **Leidivan Almeida Frazão, Professora do Magistério Superior**, em 27/04/2022, às 20:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Juliano Brant Albuquerque, Professor do Magistério Superior**, em 27/04/2022, às 21:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Evander Alves Ferreira, Professor do Magistério Superior Visitante**, em 27/04/2022, às 21:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danúbia Aparecida Costa Nobre, Usuário Externo**, em 28/04/2022, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodinei Facco Pegoraro, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2022, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Carlos Carreiro Almeida, Usuário Externo**, em 28/04/2022, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1411702** e o código CRC **CC2AB323**.

Igor Costa de Freitas

Estoques de carbono do solo e fisiologia de feijão-caupi e guandu em sistemas integrados de produção

Aprovado pela banca examinadora constituída pelos professores:

Evander Alves Ferreira (Coorientador – ICA/UFMG)

Rodinei Facco Pegoraro (Professor – ICA/UFMG)

Carlos Juliano Albuquerque (Professor – ICA/UFMG)

Ivan Carlos Carreiro Almeida (Professor – IFNMG)

Danúbia Aparecida Costa Nobre (Professora – UFVJM)



Leidivan Almeida Frazão (Orientador – ICA/ UFMG)

Montes Claros, 27 de Abril de 2022

*Aos meus pais Edi de Freitas Cardoso e
Maria Eufêmia Costa de Freitas,
que sempre dedicaram muito amor e
sabedoria em minha vida,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, inspiração e direcionamento que possibilitaram todas as vitórias alcançadas e possibilitará muitas outras conquistas.

Ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais – ICA/UFMG, por possibilitar a realização do doutorado.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Leidivan Almeida Frazão, pelo excelente trabalho de orientação, pela paciência e amizade ao longo do curso.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Evander Alves Ferreira, pela amizade, orientação e presteza em auxiliar na execução deste estudo.

Aos professores da banca examinadora, pela participação e sugestões prestadas.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, pelos ensinamentos transmitidos e apoio fornecido.

Aos técnicos de laboratório e todos os funcionários do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais – ICA/UFMG, pelo auxílio e orientação na condução deste trabalho.

Ao grupo de estudos em Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais – ICA/UFMG, que prestou todo o auxílio necessário em campo e laboratório para realização desta pesquisa.

Aos órgãos de fomento FAPEMIG, CNPq e CAPES, pelo apoio financeiro fundamental para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

Aos colegas e amigos(as) Jaílson, Iago, Matheus, Nicson, Jaqueline, Ismael, Juliana, Ana Clara, Kamila, Paula, Demerson, Rafael, Gabriel, Sávio, Grazielle, André, Alex, Elora e todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

Ao meu filho Pedro Gonçalves Costa, que me inspirou e motivou com seu nascimento na etapa final deste trabalho.

À Laís Gonçalves Martins, pelo companheirismo vivido no dia a dia, pela paciência em ocasiões difíceis, por estar presente nos momentos mais felizes e pelos incontáveis auxílios prestados ao longo desta pesquisa.

Aos meus pais Maria Eufêmia e Edi, pelo fundamental e constante apoio na vida e nos estudos.

Aos meus irmãos Heberth e Edi, pelo carinho e incentivo.

Muito Obrigado!

Sozinhos, pouco podemos fazer; juntos, podemos fazer muito.

Helen Keller

ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO E FISIOLOGIA DE FEIJÃO-CAUPI E GUANDU EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO

RESUMO

Sistemas integrados de produção agropecuária podem elevar os estoques de carbono orgânico do solo ao longo do tempo e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas. Contudo, a escolha de espécies adequadas para cultivo em sistemas integrados é um fator crítico limitante para a produção de grãos e forragem, interferindo também na dinâmica da matéria orgânica do solo. Neste contexto, objetivou-se avaliar variáveis de crescimento, nodulação, produção e fisiologia de feijão-caupi e guandu e os estoques e as taxas de acúmulo de carbono e nitrogênio total do solo em sistemas integrados implantados sobre pastagem de baixa produtividade no bioma Cerrado. Para avaliação das leguminosas, foram realizados dois experimentos, simultaneamente, ambos em esquema fatorial 2 x 4. O primeiro fator consistiu na utilização de dois sistemas integrados e o segundo na avaliação das leguminosas em quatro distâncias (2, 4, 6 e 8 m) das linhas de plantio de eucalipto. No primeiro experimento, foram avaliados os sistemas silviagrícola (eucalipto e feijão-caupi) e agrossilvipastoril (eucalipto, feijão-caupi e capim-buffel) e, no segundo, os sistemas silvipastoris IPF1 (eucalipto e feijão-guandu) e IPF2 (eucalipto, feijão-guandu e capim-buffel). Após o cultivo das leguminosas, amostras de solo foram coletadas para determinação dos atributos do solo, sendo avaliados, além dos tratamentos citados, os sistemas: eucalipto consorciado com capim-buffel; eucalipto (sem cultivo nas entrelinhas, mas com histórico de cultivos em consórcio); e uma pastagem de baixa produtividade. Foi constatada redução do número e da massa seca de nódulos no feijão-guandu com o distanciamento das árvores. Maior crescimento, produção de biomassa e atividade fotossintética de feijão-caupi e guandu foram observados com o distanciamento das linhas de plantio de eucalipto. Contudo, o feijão-caupi apresentou aumento no peso de 100 grãos nas distâncias de 2 e 4 m. Além disso, foi observado que o capim-buffel não alterou a produtividade das leguminosas. Adicionalmente, a integração de eucalipto com leguminosas ou capim-buffel aumentou o teor de carbono lábil na camada superficial do solo. Os sistemas integrados também elevaram os teores e estoques de carbono orgânico e nitrogênio total, de carbono não lábil e do carbono nas frações químicas e apresentaram acúmulo de 5,22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 0,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de carbono orgânico e nitrogênio total, respectivamente, na camada de 0-40 cm.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*; *Cajanus cajan*; *Cenchrus ciliaries*; eucalipto; sombreamento; agrossilvipastoril; matéria orgânica do solo.

SOIL CARBON STOCKS AND PHYSIOLOGY OF COWPEA AND PIGEON PEA IN INTEGRATED PRODUCTION SYSTEMS

ABSTRACT

Integrated agricultural production systems can increase soil organic carbon stocks over time and contribute to climate change mitigation. However, the choice of species suitable for cultivation in integrated systems is a critical limiting factor for grain and forage production, also interfering in the dynamics of soil organic matter. In this context, the objective was to evaluate variables of growth, nodulation, production and physiology of cowpea and pigeon pea and the stocks and accumulation rates of carbon and total nitrogen in the soil in integrated systems implemented on low productivity pasture in the Cerrado biome. To evaluate the legumes, two experiments were carried out simultaneously, both in a 2 x 4 factorial scheme. The first factor consists in the use of two integrated systems and the second in the evaluation of legumes at four distances (2, 4, 6 and 8 m) from the eucalyptus plantation lines. In the first experiment, the forestry systems (eucalyptus and cowpea) and agrosilvopastoral (eucalyptus, cowpea and buffel grass) were evaluated and, in the second, the silvopastoral systems IPF1 (eucalyptus and pigeon pea) and IPF2 (eucalyptus, pigeon pea and buffel grass). After the legume cultivation, soil samples were collected to determine the soil attributes, being evaluated, in addition to the mentioned treatments, the systems: eucalyptus intercropped with buffel grass; eucalyptus (no cultivation between the lines, but with a history of intercropping); and a low-productivity pasture. A reduction in the number and dry mass of nodules was observed in pigeon pea with distance from the trees. Higher growth, biomass production and photosynthetic activity of cowpea and pigeon pea were observed with distance from eucalyptus planting lines. However, cowpea showed an increase in the weight of 100 grains at distances of 2 and 4 m. In addition, it was observed that buffel grass did not change the productivity of legumes. Additionally, the integration of eucalyptus with legumes or buffel grass increased the labile carbon content in the soil surface layer. The integrated systems also increased the contents and stocks of organic carbon and total nitrogen, non-labile carbon and carbon in the chemical fractions and showed accumulation of 5.22 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ and 0.23 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ of organic carbon and total nitrogen, respectively, in the layer from 0-40 cm.

Keywords: *Vigna unguiculata*; *Cajanus cajan*; *Cenchrus ciliaries*; eucalyptus; shading; agrosilvopastoral; soil organic matter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Artigo 1 - Crescimento, nodulação, produção e fisiologia de leguminosas em sistemas integrados de produção

Figura 1 - Temperaturas máxima e mínima, umidade relativa e precipitação mensal no município de Montes Claros – MG entre dezembro de 2019 e maio de 2020.36

Figura 2 - Espaçamento entre linhas de plantio (20 m) e árvores de eucalipto (3 m), área ocupada por parcela (10 x 3 m) e distâncias (2, 4, 6 e 8 m) das linhas de plantio de eucalipto utilizadas na avaliação do feijão-caupi e guandu.37

Figura 3 - Comprimento da haste principal (A), número de folhas (B) e nódulos (C), massa seca de nódulos (D), caule (E), folha (F), raiz (G) e massa seca total (H) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.41

Figura 4 - Número de vagens (A), peso de vagens (B), peso de 100 sementes (C) e produtividade efetiva de grãos (D) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.43

Figura 5 - Carbono interno (Ci) (A), condutância estomática (Gs) (B) e taxa fotossintética (A) (C) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.45

Figura 6 - Comprimento da haste principal (A), diâmetro do caule (B), diâmetro das hastes (C), folhas (D) e nódulos (E), massa seca de caule (F), folha (G), raiz (H), nódulos (I) e produtividade efetiva de massa seca (J) de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.47

Figura 7 - CO₂ consumido (ΔC) (A), Carbono interno (Ci) (B) e condutância estomática (Gs) (C) de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.50

Artigo 2 – A mudança do uso da terra para sistemas integrados de produção eleva os estoques de carbono do solo no bioma Cerrado

Figura 1 - Carbono orgânico total (COT) (A), nitrogênio total (NT) (B), relação C/N (C), estoque de COT (D) e NT (E), carbono lábil (CL) (F) e não lábil (CNL) (G) do solo em diferentes sistemas de uso da terra no bioma Cerrado.63

Figura 2 - Análise de componentes principais (PCA) para atributos da matéria orgânica do solo de diferentes sistemas de uso da terra no bioma Cerrado.66

LISTA DE TABELAS

Artigo 1 – Crescimento, nodulação, produção e fisiologia de leguminosas em sistemas integrados de produção

Tabela 1 - Resumo da análise de variância para variáveis de crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-caupi em diferentes sistemas com eucalipto (S) e em diferentes distâncias (D) das linhas de plantio de eucalipto.39

Tabela 2 - Resumo da análise de variância para variáveis de crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-guandu em diferentes sistemas com eucalipto (S) e em diferentes distâncias (D) das linhas de plantio de eucalipto.40

Tabela 3 - CO₂ consumido (ΔC) e taxa transpiratória (E) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.44

Tabela 4 - Número de hastes de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.48

Tabela 5 - Taxa transpiratória (E) e taxa fotossintética (A) de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.51

Artigo 2 - A mudança do uso da terra para sistemas integrados de produção eleva os estoques de carbono do solo no bioma Cerrado

Tabela 01 - Caracterização física e química do solo¹ das áreas experimentais na profundidade de 0-20 cm.59

Tabela 02 - Histórico de espécies forrageiras e culturas de grãos cultivadas com eucalipto em área experimental de integração lavoura-pecuária-floresta localizada em Montes Claros - MG, Brasil.60

Tabela 03 - Taxa de acúmulo de COT e NT do solo em sistemas ILPF com 11 anos de implantação no bioma Cerrado.64

Tabela 04 - Carbono nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM) e relação C-AH/C-AF e ¹EA/C-HUM em diferentes sistemas de uso da terra no bioma Cerrado.65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa fotossintética
ACP	Análise de componentes principais
C-AF	Carbono da fração ácido fúlvico
C-AH	Carbono da fração ácido húmico
C-HUM	Carbono da fração humina
Ci	Carbono interno
CL	Carbono lábil
CNL	Carbono não lábil
CO ₂	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgânico total
DAS	Dias após a semeadura
E	Taxa transpiratória
EA	Extrato alcalino
Gs	Condutância estomática
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
IRGA	<i>Infrared gas analyser</i>
MOS	Matéria orgânica do solo
NT	Nitrogênio total
ΔC	CO ₂ consumido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi	17
3.2 Aspectos gerais da cultura do feijão-guandu	17
3.3 Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)	18
3.4 Características agrônômicas e fisiológicas de leguminosas cultivadas em sistemas integrados de produção.....	20
3.5 Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção	23
3.6 Referências	27
4 ARTIGOS	32
4.1 Artigo 1 – Crescimento, nodulação, produção e fisiologia de leguminosas em sistemas integrados de produção.....	33
4.1.1 INTRODUÇÃO	35
4.1.2 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1.3.1 Crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-caupi	40
4.1.3.2 Crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-guandu	46
4.1.4 CONCLUSÕES	52
4.1.5 REFERÊNCIAS	52
4.2 Artigo 2 – A mudança do uso da terra para sistemas integrados de produção eleva os estoques de carbono do solo no bioma Cerrado.	56
4.2.1 INTRODUÇÃO	58
4.2.2 MATERIAL E MÉTODOS	59
4.2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	59
4.2.2.2 Histórico da área de estudo	59
4.2.2.3 Desenho experimental e tratamentos	61
4.2.2.4 Amostragem de solo.....	61
4.2.2.5 Análises laboratoriais	61

4.2.2.6 Análise estatística.....	62
4.2.3 RESULTADOS	62
4.2.3.1 Armazenamento de carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) e relação C/N do solo	62
4.2.3.2 Carbono lábil (CL) e não lábil (CNL)	64
4.2.3.3 Carbono nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM)	64
4.2.3.4 Estatística multivariada	66
4.2.4 DISCUSSÃO	67
4.2.4.1 Armazenamento de carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) e relação C/N do solo	67
4.2.4.2 Carbono lábil (CL) e não lábil (CNL)	69
4.2.4.3 Carbono nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM)	70
4.2.4.4 Estatística multivariada	72
4.2.5 CONCLUSÕES	72
4.2.6 REFERÊNCIAS	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de adoção de práticas sustentáveis na agricultura, pecuária e silvicultura tem sido amplamente relatada e buscada nos dias atuais, em virtude da degradação de terras e da constatação de desequilíbrios nos diversos ecossistemas terrestres. Portanto, práticas alternativas aos sistemas convencionais de produção devem ser consideradas para viabilizar produções agrícolas de caráter sustentável.

A integração de diferentes componentes de produção em uma mesma área tem sido apontada como estratégia de produção conservacionista e de intensificação sustentável do uso da terra. De acordo com Yadav *et al.* (2021), sistemas integrados de produção podem auxiliar no sequestro de CO₂. Benefícios como o aumento da biodiversidade em sistemas integrados foram destacados por Freitas *et al.* (2020), além de melhorias na fertilidade, no armazenamento de matéria orgânica e na qualidade biológica do solo, conforme indicado por Damian *et al.* (2021). Adicionalmente, Muchane *et al.* (2020) verificaram maior qualidade física do solo sob sistemas integrados de produção.

Diferentes atributos, como teores, estoques e acúmulo de carbono e nitrogênio do solo, assim como o conteúdo de carbono lábil e das frações húmicas da matéria orgânica do solo, têm sido utilizados como indicadores de qualidade do solo e, portanto, são variáveis importantes na determinação da sustentabilidade de diferentes sistemas de manejo e uso da terra. Estudos realizados nos últimos anos demonstraram melhorias nos atributos citados a partir da adoção de sistemas integrados de produção (COSER *et al.*, 2018; FREITAS *et al.*, 2020; MA *et al.*, 2020; ALMEIDA *et al.*, 2021; FRAZÃO *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2021; YADAV *et al.*, 2021). Entretanto, variáveis como aporte de serapilheira, biomassa radicular, taxa de decomposição, espécies de plantas, condições edafoclimáticas e composição química da serapilheira interferem na dinâmica da matéria orgânica e podem alterar o conteúdo de carbono entre sistemas integrados (YADAV *et al.*, 2021).

Apesar das melhorias verificadas na qualidade do solo sob sistemas integrados de produção, o componente arbóreo pode diminuir a intensidade luminosa no sub-bosque e reduzir o desenvolvimento e produtividade de grãos e forragem das culturas em consórcio. Segundo Mwamlima; Cheruiyot; Ouma (2020), o sombreamento pode ocasionar a redução da taxa fotossintética e diminuir a produção de fotoassimilados utilizados no desenvolvimento e produtividade das plantas. No entanto, Angadi *et al.* (2022) relataram que alterações no desenvolvimento e na produtividade varia com a espécie cultivada.

Neste contexto, mais experimentos envolvendo diferentes sistemas integrados de produção devem ser realizados para validação dos acúmulos e melhoria da qualidade da matéria orgânica do solo, assim como para identificar culturas com maior capacidade de produção de grãos e forragem em consórcios com árvores. Portanto, este estudo apresenta as respostas do crescimento, nodulação, produção e fisiologia de feijão-caupi e feijão-guandu e os estoques e as taxas de acúmulo de carbono e nitrogênio total do solo em sistemas integrados de produção no bioma Cerrado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o crescimento, a nodulação, a produção e a fisiologia de feijão-caupi e feijão-guandu, e os estoques e as taxas de acúmulo de carbono e nitrogênio total do solo em sistemas integrados de produção implantados sobre pastagem de baixa produtividade no bioma Cerrado.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência das linhas de plantio de eucalipto no crescimento, na nodulação e na produtividade de grãos de feijão-caupi.
- Avaliar o efeito das linhas de plantio de eucalipto no crescimento, na nodulação e produtividade de massa seca de feijão-guandu.
- Determinar as respostas fisiológicas do feijão-caupi e do feijão-guandu cultivado ao longo do transecto existente entre as árvores que compõem os sistemas integrados de produção.
- Avaliar a influência do consórcio com capim-buffel no crescimento, na nodulação, nas variáveis fisiológicas e na produtividade do feijão-caupi e do feijão-guandu integrado com eucalipto.
- Determinar os teores, estoques e acúmulo de carbono e nitrogênio total do solo e o teor de carbono nas frações químicas da matéria orgânica do solo sob sistemas integrados de produção após 11 anos de implantação sobre pastagem de baixa produtividade.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi

De acordo com Osipitan *et al.* (2020), o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é cultivado em diferentes tipos de solo e apresenta tolerância a condições de baixa disponibilidade hídrica. Segundo os autores, a leguminosa é cultivada principalmente em países em desenvolvimento e consiste em uma importante fonte de proteína para consumo humano e animal, além disso melhora a fertilidade do solo por meio da fixação biológica de nitrogênio e pode ser utilizada como cultura de cobertura para conservação do solo. Segundo Kebede; Bekeko (2020), a espécie possui alta capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico a partir da formação de nódulos radiculares em associação com rizóbios. Freitas; Silva; Sampaio (2012) observaram que 79% do nitrogênio acumulado em feijão-caupi cultivado no semiárido brasileiro foi proveniente fixação biológica, que correspondeu a 45 kg ha⁻¹ de N.

Alemu *et al.* (2016) destacaram que em muitos países a população consome as folhas, vagens frescas e os grãos do feijão-caupi. Os autores também reportaram que a cultura pode fornecer ração, forragem, feno e silagem para o gado e ser utilizada como adubo verde e cobertura vegetal visando a melhoria da produtividade dos solos. Adicionalmente, Kebede; Bekeko (2020) colocaram o feijão-caupi como opção de cultura que apresenta maturidade muito precoce, o que proporciona diminuir o período de produção em relação a muitas outras espécies cultivadas. Dakora; Belane (2019) observaram valores de proteína foliar em feijão-caupi variando de 23 a 40% entre diferentes genótipos e, nas sementes, teor de até 40% de proteína.

Em 2020, a produção mundial de feijão-caupi foi estimada em aproximadamente de 8,9 milhões de toneladas, com produtividade média aproximada de 591 kg ha⁻¹, tendo sido a África, Ásia, Américas e Europa responsáveis por 96,8, 2,2, 0,7 e 0,3% da produção mundial, respectivamente, onde a Nigéria (3,64 milhões de toneladas) foi o país com maior produção, seguido por Níger (2,63 milhões de toneladas) e Burkina Faso (666 mil toneladas) (FAOSTAT, 2022).

A falta de acesso a tecnologias, como variedades melhoradas, e práticas adequadas de manejo, como controle de pragas e adubação, prejudicam a produtividade do feijão-caupi em países em desenvolvimento (KEBEDE; BEKEKO, 2020). Freitas; Silva; Sampaio (2012) observaram produtividade de grãos entre 381 e 1147 kg ha⁻¹ em função da variedade utilizada no semiárido brasileiro. Souza *et al.* (2017) verificaram produtividade de 1396 kg ha⁻¹ em cultivo de feijão-caupi irrigado na região norte do Brasil, enquanto no cultivo em sequeiro foi obtida produtividade de 817 kg ha⁻¹. Matoso *et al.* (2018) observaram produtividades de cultivares de feijão-caupi geralmente acima de 800 kg ha⁻¹ quando semeadas entre fevereiro e março na região sudeste do Brasil, como cultura de segunda safra.

3.2 Aspectos gerais da cultura do feijão-guandu

O feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) é uma leguminosa cultivada principalmente em regiões tropicais e subtropicais. É uma cultura mundialmente importante, com destaque em regiões semiáridas, devido apresentar tolerância à seca (VARSHNEY *et al.*, 2010). De acordo com Venkata *et al.* (2019), o feijão-guandu possui múltiplos usos e se destaca como uma importante leguminosa alimentar na

Ásia, África e América Latina, garantido a sobrevivência, sobretudo, de pequenos agricultores. Abebe (2022) destacou o potencial de uso do feijão-guandu para alimentação humana e animal devido ao seu elevado conteúdo proteico de baixo custo de produção.

De modo geral, o teor de proteína em grãos de feijão-guandu é de 20 a 22% (VENKATA *et al.*, 2019) e de 23 a 33% na matéria seca (folhas e porções tenras dos caules) (NERES *et al.*, 2012). Em geral são consumidos grãos secos, frescos e vagens verdes. A leguminosa é também uma excelente espécie forrageira para alimentação animal (ABEBE, 2022). Além disso, o feijão-guandu pode ser consorciado com outras culturas para melhorar a qualidade da forragem. Gomes *et al.* (2020) observaram que a integração do feijão-guandu em cultivo de milho para silagem não interferiu na produtividade do milho e contribuiu para aumentar a concentração de proteína bruta do material ensilado e para aumentar a diversidade da forragem remanescente.

Conforme Sharma *et al.* (2021), o feijão-guandu apresenta sistema radicular extenso e profundo que contribui para melhorar a estrutura do solo. Além disso, de acordo com Varshney *et al.* (2010), a serapilheira gerada pela leguminosa, juntamente com o processo de fixação biológica de nitrogênio decorrente da simbiose com rizóbios, aumentam a fertilidade do solo. Adu-Gyamfi *et al.* (2007) observaram valores entre 37,5 a 117,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio proveniente da fixação biológica de N₂ em variedades de feijão-guandu, cultivadas em região semiárida da África.

Geralmente são obtidas baixas produtividades em cultivos de feijão-guandu devido ao baixo acesso a cultivares melhoradas, manejo deficiente de pragas e doenças, baixa disponibilidade hídrica, entre outros fatores (VARSHNEY *et al.*, 2010). Em 2020, a produção mundial de grãos de feijão-guandu foi estimada em cerca de 5,01 milhões de toneladas, com produtividade média aproximada de 822 kg ha⁻¹, tendo sido a Ásia, África e Américas responsáveis por 84,7, 14,2 e 1,1% da produção mundial, respectivamente, onde a Índia (3,89 milhões de toneladas) foi o país com maior produção, seguido por Malawi (424 mil toneladas) e Mianmar (339 mil toneladas) (FAOSTAT, 2022).

No Brasil, produtividade de sementes de feijão-guandu (cv. IAPAR 43 - Aratã) entre 2380 a 2828 kg ha⁻¹ foi observada por Bertolin *et al.* (2008) em avaliações com diferentes doses de nutrientes, espaçamentos e épocas de plantio na região centro-oeste. Giomo; Razera; Nakagawa (2001) avaliaram o cultivo de feijão-guandu (cv. IAC-Fava Larga) em diferentes espaçamentos e encontraram produtividade de sementes entre 778,9 a 862,7 kg ha⁻¹ no sudeste brasileiro. Adicionalmente, Cesar *et al.* (2011) observaram produtividade de sementes de variedades de feijão-guandu, cultivadas em diferentes épocas, variando de 600 a 4460 kg ha⁻¹ no centro-oeste do Brasil.

3.3 Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)

A necessidade de implementação de tecnologias que possibilitem a redução de riscos na atividade agropecuária e permitam maior agregação de valor aos produtos e, além disso, sejam capazes de fornecer serviços ambientais nas propriedades rurais tem sido constantemente relatada e buscada (GONTIJO NETO *et al.*, 2014).

Os sistemas de produção que integram os componentes agrícola, pecuário e/ou florestal destacam-se como alternativas tecnológicas para a viabilização de práticas agropecuárias de caráter sustentável, já que podem promover melhorias em parâmetros técnicos, socioeconômicos e ambientais. Conforme

Cordeiro *et al.* (2015), a produção agropecuária integrada consiste na utilização de sistemas de produção que associam as práticas agrícola, pecuária e/ou florestal em um mesmo local ou gleba. A integração pode ser realizada a partir de diferentes técnicas, adotando-se, por exemplo, a consorciação, a sucessão e/ou da rotação de culturas.

A integração das atividades agrícola, pecuária e florestal, de acordo com Gontijo Neto *et al.* (2014), pode ocorrer de diferentes formas, sendo elas: integração Lavoura-Pecuária (ILP) ou agropastoril, integração Pecuária-Floresta (IPF) ou silvipastoril, integração Lavoura-floresta (ILF) ou agroflorestal e integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou agrosilvipastoril.

Dentre os benefícios verificados com a utilização de sistemas integrados de produção têm-se o aumento de produtividade; a melhoria de atributos físicos, químicos e biológicos do solo decorrentes de acréscimos nos teores de matéria orgânica e consequente aumento dos estoques de carbono orgânico; diminuição da necessidade de desmatamento (efeito “poupa-terra”); reduções de emissões de gases de efeito estufa; maior estabilidade econômica, maior geração de renda, redução de riscos (climáticos e mercadológicos) em virtude da diversificação da produção; dentre outros benefícios (CORDEIRO *et al.*, 2015; KICHEL *et al.*, 2014; OSÓRIO; AZEVEDO, 2014; SILVA *et al.*, 2014).

Segundo Costa *et al.* (2018), melhorias alcançadas com a consorciação, rotação e sucessão por um sistema agroflorestal, provêm, dentre outros fatores, da otimização do uso de insumos (água, energia, fertilizantes e defensivos agrícolas), que resulta no uso racional da terra, melhorando a qualidade do solo, a biodiversidade e os aspectos sociais. Além disso, conforme Sanderson *et al.* (2013), os sistemas agrícolas de caráter sustentável promovem melhorias nos serviços ecossistêmicos a partir da redução da perturbação do solo, da maximização de sua cobertura e da promoção da atividade biológica no sistema.

A partir de análise da sócio-eco-eficiência de sistemas agropecuário-florestais integrados e não integrados no Cerrado brasileiro, Costa *et al.* (2018) verificaram que entre o período de 2007 a 2014 foram necessários apenas 70 ha para suprir a demanda de grãos, carne e energia para uma população de 500 brasileiros utilizando-se o sistema ILPF. Em contrapartida, os autores verificaram que sistemas convencionais de produção, para atender a mesma demanda, necessitaram de 420 ha. Tal resultado demonstra a viabilidade de crescimento da produção de alimentos para suprimento da crescente demanda global aliada à preservação de áreas florestais remanescentes, sem aumento de fronteiras agrícolas.

Com base em uma ampla abordagem do ciclo de vida de sistemas ILPF no Cerrado brasileiro, Costa *et al.* (2018) observaram também potencial de redução de 2389 t de CO₂ equivalente comparativamente a sistemas não integrados. Além disso, foi possível observar melhorias quanto à qualidade do emprego e diminuição de 54% nos custos totais de produção a partir da adoção dos sistemas ILPF.

Neste contexto, em trabalho de revisão de literatura, Silva *et al.* (2014) concluíram que os sistemas integrados de produção podem colocar as atuais práticas agropecuárias brasileiras em padrões adequados à sustentabilidade ambiental, com destaque na neutralização de gases decorrentes da atividade pecuária e da agricultura, que contribuem com o aquecimento global. Além disso, a integração de diferentes componentes de produção contribui com o aumento de renda na agropecuária e com a fixação do homem no campo, reduzindo o processo de êxodo rural.

3.4 Características agronômicas e fisiológicas de leguminosas cultivadas em sistemas integrados de produção

A existência de vida na terra depende da energia radiante proveniente do sol, que é transformada pelas espécies autotróficas (plantas, algas e determinadas bactérias) em energia química, processo complexo o qual é denominado de fotossíntese (CASTRO; GARCIA, 1996). Alterações na intensidade da energia radiante resultam em uma série de alterações em plantas buscando aumentar a interceptação da luminosidade incidente e manter taxas fotossintéticas adequadas. Diferentes espécies vegetais apresentam maior ou menor flexibilidade de adaptação mediante a diferentes níveis de sombreamento, que podem ser resultantes do cultivo consorciado.

Araújo *et al.* (2017) avaliaram o cultivo de leguminosas forrageiras tropicais em sistema silvipastoril com eucalipto (com três anos de implantação e espaçamento de 12 x 2 m) e a pleno sol no bioma Cerrado. As leguminosas utilizadas foram a estilisanthes, a kudzu tropical e a macrotiloma. Observaram-se, no estudo em questão, maior produção de massa de matéria seca no cultivo a pleno sol comparativamente ao sistema silvipastoril. No entanto, no sistema silvipastoril foram obtidos maiores teores de matéria mineral, proteína bruta e fibra em detergente neutro quando comparado ao cultivo em pleno sol. O sombreamento, conforme Araújo *et al.* (2017), promoveu, portanto, decréscimos na produção de massa de matéria seca e alteração da composição das leguminosas analisadas.

A produção de soja com *Urochloa ruziziensis* e eucalipto em um sistema de ILPF (espaçamento 14 x 4,2 m) na região sul do Brasil, durante os quatro anos iniciais de implantação, foi estudada por Franchini *et al.* (2014). Como testemunha, os autores utilizaram a mesma sucessão de culturas (soja com *Urochloa ruziziensis*) em área sem eucalipto. O estudo permitiu observar que nas duas primeiras safras de soja não houve redução de produtividade. Já nas safras seguintes foram constatadas reduções na produtividade da cultura, observando-se queda de 2,9 e 27,0% na terceira e quarta safras, respectivamente. A redução da produtividade ocorre com maior intensidade, segundo Franchini *et al.* (2014), nas plantas localizadas próximas às árvores de eucalipto.

De acordo com Jumrani; Bhatia (2020), o efeito do sombreamento sobre as culturas em sistemas consorciados deve ser considerado na busca por maiores produtividades. Os autores verificaram que a redução da intensidade luminosa (sombreamento de 35, 50 e 75%) diminuiu o peso específico da folha, a densidade estomática, a fotossíntese e o rendimento de sementes em genótipos de soja, porém a resposta ao sombreamento variou conforme o genótipo cultivado. Alterações decorrentes da redução da intensidade luminosa também foram encontrados por Wu *et al.* (2016), que observaram redução da produção de biomassa, alongamento do caule, menor massa foliar por unidade de área, menor espessura foliar, aumento no teor de clorofila e redução da razão clorofila a/b em soja consorciada com milho.

Neste contexto, Hiltz *et al.* (2019) reportaram redução do diâmetro e aumento no comprimento de entrenós e pecíolos em soja sob sombreamento, que variou de acordo com a cultivar estudada. Aumento da área foliar específica (área foliar total/biomassa foliar), menor diâmetro do caule, diminuição do número de ramos, redução da taxa fotossintética e menor produção de biomassa também foram encontrados por Wu *et al.* (2017) em soja sob sombreamento.

Mwamlima; Cheruiyot; Ouma (2020) identificaram aumento de 21,16% no teor de clorofila, redução da condutância estomática, da transpiração, da taxa fotossintética, menor interceptação da radiação

fotossinteticamente ativa, redução da nodulação radicular, diminuição do número de vagens e da produtividade de grãos de soja em sistema de consórcio com milho. Os autores observaram que a produtividade de grãos variou de acordo com o arranjo do sistema, tendo sido observadas reduções entre 42,15 a 83,85% em relação ao monocultivo. De acordo com os autores, a diminuição da taxa fotossintética reduz a produção de fotoassimilados, comprometendo o crescimento e produção das plantas.

Adicionalmente, Fan *et al.* (2019) verificaram redução da taxa fotossintética de soja em sistema consorciado, mesmo tendo ocorrido aumento no conteúdo de pigmentos fotossintéticos para maior absorção e utilização da energia luminosa. Além disso, observaram-se maior altura de plantas e comprimento do hipocótilo sob sombreamento, características que visam evitar a sombra e obter uma maior captura de luz. Portanto, de acordo com os autores, o desenvolvimento de plantas baixas em consórcios é significativamente alterado pela competição com aquelas de maior porte.

Wen *et al.* (2020) também identificaram que a soja apresenta plasticidade morfológica e fisiológica para adaptação ao sombreamento e, sob leve redução da intensidade luminosa, a planta apresenta peso de sementes semelhante ao obtido em condições normais de luminosidade, mesmo com redução da produção de biomassa. Neste sentido, Khalid *et al.* (2019) indicaram o sombreamento máximo de 25% em sistema consorciado para soja visando a obtenção de maiores produtividades.

Em estudo realizado por Rajashere *et al.* (2022), que avaliou a influência treze culturas forrageiras na produtividade e características produtivas de feijão-guandu, foram observadas menor número de vagens por planta, sementes por vagem e menor produção de sementes por planta de feijão-guandu em sistema consorciado. Os consórcios não influenciaram o número de sementes por vagem e o peso de cem sementes. O estudo mostrou maior produtividade de biomassa e de grãos em feijão-guandu solteiro (1204 kg ha^{-1}), que não se diferenciou do consórcio com grama de cavalo (1178 kg ha^{-1}). Produtividades próximas às obtidas em monocultivo foram observadas em feijão-guandu consorciado com feijão forrageiro (1106 kg ha^{-1}), seguido pelo consórcio com caupi forrageiro (1101 kg ha^{-1}). Culturas mais altas levaram a maiores perdas de produtividade devido ao sombreamento gerado sobre o feijão-guandu. Ainda segundo os autores, a máxima produtividade de biomassa e grãos no monocultivo de feijão-guandu ocorreu devido a menor competição por umidade, luz, espaço e nutrientes.

Manoj *et al.* (2019) verificaram redução da produção de biomassa e de grãos em feijão-guandu e feijão-caupi sob sombreamento (50 e 75%). Os autores também observaram diminuição da espessura de folhas e aumento no teor de clorofila foliar das leguminosas sob menor intensidade de luz, indicando tolerância ao sombreamento. Além disso, foi relatado redução da transpiração e da condutância estomática com a diminuição da luminosidade. Apesar do menor desempenho produtivo sob baixa intensidade luminosa, Manoj *et al.* (2019) identificaram viabilidade de produção em condições de sombreamento e indicaram as leguminosas estudadas para cultivo em consórcios com culturas mais altas, que geram altos níveis de sombreamento.

Maior altura, número de hastes, área foliar, produção de matéria seca, estande de plantas, número de vagens e rendimento de sementes de feijão-guandu foram obtidos com o distanciamento das linhas de plantio de neem (*Azadirachta indica*) em sistema agroflorestal estudado por Honnayya; Chittapur; Doddabasawa (2020). Plantas de feijão-guandu também absorveram mais nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) com o aumento da distância das árvores. Segundo os autores, a maior proximidade das linhas de plantio de neem levou ao aumento gradual do sombreamento e da competição, limitando o

desenvolvimento da cultura no sub-bosque. As variáveis de crescimento e produtividade do feijão-guandu integrado com neem foram semelhantes ao monocultivo de feijão-guandu somente a partir de 12,8 m das linhas do componente arbóreo.

Alam *et al.* (2018) observaram redução no crescimento e na produtividade de grãos de feijão-caupi integrado com *Dalbergia sissoo* em sistemas agrossilviculturais, que foi associada à densidade de interceptação do fluxo de fótons fotossintéticos pela copa das árvores e pelo microclima do sub-bosque. De acordo com o estudo, as alterações microclimáticas, como redução da temperatura e aumento da umidade relativa, são induzidas pela sombra das árvores. A interceptação de luz pelo componente arbóreo apresenta correlação direta e positiva com o índice de área foliar das árvores, o que exige a seleção adequada deste componente. Maior índice de área foliar resultou em uma maior interceptação de luz, reduzindo o rendimento da cultura no sub-bosque. No entanto, a menor produção pode, até certo nível, ser compensada pelas melhorias microclimáticas associadas a presença do componente arbóreo.

Conforme Alam *et al.* (2018), a diminuição do crescimento e produtividade, devido a menor densidade de fluxo de fótons fotossintéticos incidente sobre a cultura, pode ser explicada pela redução da taxa fotossintética e características associadas. Com o aumento da taxa transpiratória, condutância estomática e taxa fotossintética ocorre aumento do CO₂ consumido e redução do carbono interno (AYALEW *et al.*, 2022; COTRIM *et al.*, 2020). Em condições ideais há aumento da taxa fotossintética e consequente aumento no processamento de CO₂, que resulta na redução do carbono interno (COTRIM *et al.*, 2020).

Neste contexto, Fan *et al.* (2019) reportaram redução da taxa fotossintética em plantas de soja sob sombreamento (consórcio milho e soja), enquanto o carbono interno aumentou. Khalid *et al.* (2019) observaram que a disponibilidade ideal de luz (pleno sol ou sombreamento de até 25%) proporcionou maior taxa fotossintética e transpiratória em soja. Mwamlima; Cheruiyot; Ouma (2020) relataram redução da taxa fotossintética, transpiração e da condutância estomática em soja consorciada com milho. De acordo com os últimos autores, a redução da luminosidade sobre o dossel e consequente redução da interceptação da radiação fotossinteticamente ativa contribuiu para diminuição da condutância estomática, limitando a captura de dióxido de carbono para a fotossíntese.

Contudo, ao avaliar o crescimento e o desenvolvimento de variedades de feijão-caupi sob diferentes condições de luminosidade, Coelho *et al.* (2014) constataram que o sombreamento contribuiu para o crescimento e acúmulo de massa seca das variedades estudadas (BRS Acauã e BRS Pujante). Segundo o estudo, as plantas de feijão-caupi sob restrição da radiação solar apresentaram maior eficiência nos processos bioquímicos e morfogênicos, possivelmente, devido ao ponto de saturação de luz do aparelho fotossintético. Os autores observaram que a radiação fotossinteticamente ativa ideal foi entre 30 e 50% da radiação plena, faixa que pode ter favorecido uma maior produção de fotoassimilados. Além disso, Wen *et al.* (2020) relataram que o sombreamento leve pode diminuir a fotorrespiração. Neste contexto, Angadi *et al.* (2022) reportaram o feijão-caupi como espécie com capacidade de adaptação à luz solar reduzida e, com isso, adequada para sistemas consorciados.

Aumento nos teores de pigmentos foliares (clorofila a, b e carotenoides), redução na razão entre os teores de clorofila a e b e aumento no comprimento da haste principal e na área foliar foram observados em feijão-caupi em ambiente artificial (50% de luminosidade), indicando que a cultivar utilizada (Vinagre) apresentou plasticidade quando submetida a baixa luminosidade, conforme estudo de Santos *et al.* (2011).

De acordo com a pesquisa, não ocorreu variação na produção de massa seca entre cultivo sombreado e em pleno sol. Plantas tolerantes a redução da luminosidade podem controlar variáveis como tamanho da folha e teor de clorofila para aumentar a capacidade de interceptação da luz (ANGADI *et al.*, 2022).

Ao avaliar a massa de 1000 grãos, Silva *et al.* (2016) encontraram 219,11 g em cultivo de feijão-caupi consorciado com capim braquiária, massa superior a observada no cultivo de feijão-caupi solteiro (187,02 g). Silva *et al.* (2016) relataram ainda produtividade de grãos semelhante entre cultivo de feijão-caupi consorciado com capim braquiária e cultivo de feijão-caupi solteiro, com valores de 845 kg ha⁻¹ e 782,25 kg ha⁻¹, respectivamente, indicando que a competição resultante da consorciação nas condições estudadas não influenciou na produtividade de grãos

Namatsheve *et al.* (2020) observaram redução na produtividade de feijão-caupi em sistemas de consórcio com gramíneas, porém a produção total das associações foi significativamente maior. Os autores também compararam a fixação biológica de N₂ entre o feijão-caupi solteiro e consorciado e não observaram diferença na porcentagem de nitrogênio fixado. Jensen; Carlsson; Hauggaard-Nielsen (2020) relataram que a competição por nitrogênio em consórcios estimula uma maior a fixação biológica de nitrogênio em leguminosas. Adicionalmente, Morgado; Willey (2003) reportaram aumento do número de nódulos com o aumento da população de plantas em consórcio de milho e feijão.

Correia *et al.* (2021) constataram que o sombreamento artificial com tela preta não influenciou as variáveis número de nódulos e massa seca de nódulos de feijão-caupi em floração quando comparado ao cultivo em pleno sol. Oliveira *et al.* (2017) observaram que o feijão-caupi em consórcio com milheto apresentou massa seca de nódulos igual ao sistema em monocultivo, demonstrando que o sombreamento gerado pelo milheto não afetou a nodulação. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva *et al.* (2016) entre cultivo de feijão-caupi solteiro e consórcio de feijão-caupi e capim braquiária, enquanto Mwamlima; Cheruiyot; Ouma (2020) observaram redução da nodulação radicular de soja em consórcio com milho e associaram o menor número de nódulos à redução da produtividade de grãos no sistema consorciado.

A redução da radiação fotossinteticamente ativa em sistemas agroflorestais consiste, portanto, na limitação mais importante para a cultura no sub-bosque, que pode ser manejada aumentando a distância de plantio das árvores (SURKI *et al.*, 2020). Além disso, a competição por água e nutrientes também pode interferir no desenvolvimento das espécies consorciadas, exigindo planejamento durante a implantação e condução destes sistemas para otimização dos recursos disponíveis (RAZOUK *et al.*, 2016). Práticas como poda e plantio das árvores no sentido leste-oeste também são técnicas que contribuem para a redução do sombreamento e podem favorecer o crescimento e a produtividade da cultura no sub-bosque (HONNAYYA; CHITTAPUR; DODDABASAWA, 2020).

3.5 Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção

De acordo com Muchane *et al.* (2020), os sistemas agrossilvipastoris podem contribuir para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas e na melhoria da qualidade do solo. Os autores mostraram aumento de 21% e 13% no armazenamento de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo, respectivamente, sob sistemas integrados em comparação a monoculturas. Segundo Frazão *et al.* (2021), a redução dos estoques de COT do solo contribui com a emissão de carbono para a atmosfera. Neste contexto, diferentes estudos colocam os sistemas integrados de produção como estratégias para

recuperação e aumento dos estoques de COT e NT do solo (FREITAS *et al.*, 2020; MA *et al.*, 2020; YADAV *et al.*, 2021).

Os sistemas integrados de produção apresentam elevado potencial de estocagem e acúmulo de COT e NT do solo. Araújo *et al.* (2020) verificaram aumento no teor de matéria orgânica do solo (MOS) em sistema de ILPF logo no primeiro ano de condução no bioma Cerrado. Na mesma região, Freitas *et al.* (2020) relataram recuperação dos estoques de COT e NT em sistemas agrossilvipastoris com três anos de idade. Adicionalmente, Almeida *et al.* (2021) observaram aumento nos estoques de COT e NT do solo após quatro anos de implantação de sistemas silvipastoris implantados sobre pastagens degradadas, também localizadas no Cerrado brasileiro. A partir de estudo com sistemas agrossilviculturais de 8 anos de idade, Frazão *et al.* (2021) concluíram que os sistemas integrados aumentam os estoques de COT do solo em comparação a áreas de pastagem de baixa produtividade em região de Cerrado.

Sacramento *et al.* (2013) estudaram os estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas agrícolas convencional, silvipastoril, agrossilvipastoril no bioma Caatinga. Os autores verificaram menores perdas nos estoques de carbono e nitrogênio do solo no sistema agrossilvipastoril após 13 anos de cultivo, tendo como referência a mata nativa. Segundo Sacramento *et al.* (2013), o sistema agrícola convencional avaliado se mostrou inadequado para cultivo em região semiárida, visto que promoveu diminuição considerável dos estoques de carbono e nitrogênio do solo, respectivamente $58,87 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $9,57 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto o sistema agrossilvipastoril apresentou potencial para conservação da matéria orgânica do solo.

Siqueira *et al.* (2019) verificaram acúmulo de $2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de COT em sistema agroflorestal com 5 anos de idade, na camada de 0-20 cm de profundidade, após 5 anos de implantação. Coser *et al.* (2018) observaram acúmulo de $6,14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de COT, na profundidade de 0-40 cm, após 28 meses da conversão de pastagem de baixa produtividade em sistema agrossilvicultural. Almeida *et al.* (2021) relataram que práticas como semeadura direta, cultivo de culturas forrageiras anuais nos primeiros anos de implantação, manejo adequado do capim e das árvores contribuem para aumentar os teores de COT e NT do solo em sistemas integrados. Os autores descreveram que a menor mobilização e a boa cobertura do solo, associadas a alta taxa de renovação radicular de gramíneas e a serapilheira gerada pelo componente arbóreo, contribuem para aumentar o conteúdo de COT e NT do solo.

De acordo com Abreu *et al.* (2020), o eucalipto contribui com o aumento dos teores de COT do solo a partir da deposição de folhas, flores, sementes, caules, raízes e exsudados de folhas e raízes, com maior intensidade sob a copa das árvores. Cunha *et al.* (2021) complementam que o eucalipto produz resíduos de forma contínua durante seu ciclo, contribuindo para o aumento do COT. Neste contexto, Toru; Kibret (2019) recomendaram o cultivo de plantas perenes lenhosas em sistemas conservacionistas visando o aumento do sequestro de carbono.

O cultivo de gramíneas em sistemas integrados também favorece o aumento dos níveis de MOS, já que geralmente possuem sistemas radiculares densos com capacidade de abranger grande volume de solo (ARAÚJO *et al.*, 2020). De acordo com Cunha *et al.* (2021), os altos teores de COT obtidos em sistemas integrados podem ser resultado de elevados aportes de resíduos orgânicos de eucalipto e gramíneas. Segundo os autores, o sistema radicular das gramíneas é denso e constituído principalmente por raízes finas que apresentam rápida decomposição.

A relação entre o teor de carbono com o teor de nitrogênio (C/N) do solo também é utilizada em

estudos que envolvem a dinâmica da MOS. De acordo com Wang *et al* (2018), a relação C/N pode ser alterada pelos diferentes tipos de uso da terra. Toru; Kibret (2019) reportaram que razões C/N próximas a 10 e 12 são consideradas normais em solos minerais. A redução da relação C/N indica avanço no processo de mineralização e humificação da MOS, diminuição do conteúdo de MOS particulada e de resíduos vegetais primários de maior razão C/N (CHEN *et al.*, 2017). Em estudos envolvendo sistemas integrados no bioma Cerrado, Abreu *et al.* (2020) encontraram valores de relação C/N entre 10,98 e 14,94, semelhante aos observados por Almeida *et al.* (2021), que reportaram valores de 10,36 a 14,85.

Diferentes métodos de fracionamento são utilizados para melhor compreensão da influência dos usos e manejos da terra sobre a dinâmica da MOS. A fração carbono lábil (CL) compreende compostos orgânicos menos recalcitrantes, que podem ser utilizados por microrganismos como fonte de energia (NDZELU; DOU; ZHANG, 2020). Segundo Huang *et al* (2021), dentre os constituintes lábeis do carbono oxidado por permanganato de potássio (CL), estão a amida, os polissacarídeos e os carboidratos. De acordo com Gomes *et al.* (2021), mudanças no uso da terra e em práticas de manejo alteram a entrada de matéria orgânica e influenciam o teor de CL do solo. Neste contexto, Ndzelu; Dou; Zhang (2020) relataram que o CL é um indicador sensível que permite inferir sobre a qualidade da MOS. De forma complementar, Santos *et al.* (2019) descreveram o CL como uma fração que pode ser facilmente perdida por decomposição.

Gomes *et al.* (2021) relataram aumento de 26% no conteúdo de carbono lábil em sistemas agroflorestais em relação a monoculturas. Segundo o estudo, o aumento no conteúdo de carbono lábil foi resultado da diversidade de espécies e da deposição frequente de resíduos vegetais nos sistemas integrados de produção. Neste contexto, Li *et al.* (2019) observaram aumento nos teores de carbono lábil em manejo com retorno de resíduos vegetais ao solo. Adicionalmente, Ma *et al.* (2021) reportaram que resíduos de raízes e seus exudatos radiculares elevam os teores de carbono lábil.

Coser *et al.* (2018) reportaram que a diversificação e o aumento na entrada de resíduos vegetais em sistemas integrados de produção possibilitam acúmulo de COT em frações lábeis e recalcitrantes da MOS. Segundo os autores, aumento no conteúdo de ambas as frações permite intensificar a disponibilização de nutrientes, a partir da mineralização das frações lábeis, e possibilita maior estocagem de COT, por meio das frações mais recalcitrantes e estáveis. Com isso, de acordo com o estudo, a integração pode ser utilizada para alcançar os princípios da agricultura sustentável.

Estudos mostram que maior parte do COT do solo está protegido na fração humina, que apresenta maior estabilidade e recalcitrância dentre as frações químicas (ácido fúlvico, ácido húmico e humina) da matéria orgânica do solo (FREITAS *et al.*, 2020; ALMEIDA *et al.*, 2021; FRAZÃO *et al.*, 2021). Segundo Pflieger; Cassol; Mafra (2017), a fração C-HUM é formada por compostos de maior peso molecular, menor número de grupamentos carboxílicos e maior número de grupamentos nitrogenados. Pflieger; Cassol; Mafra (2017) complementam que estas características contribuem para que maior parte do COT do solo esteja armazenado na fração humina. Coser *et al.* (2018) descreveram que a formação de complexos coloidais húmus-argila também contribui com este armazenamento.

Loss *et al.* (2014), ao avaliar a qualidade do solo em diferentes sistemas de uso da terra (área de monocultivo de lavoura com cerca de 20 anos de utilização, pastagem de aproximadamente 40 anos de condução e sistema silvipastoril implantado há 5 anos) na região sudeste do Brasil, observaram que o sistema silvipastoril (eucalipto consorciado com *Panicum maximum* em espaçamento 8 x 4 m, com cinco

anos de implantação) apresentou maiores teores de carbono nas frações húmicas em relação aos demais tratamentos. Loss *et al.* (2014), a partir dos resultados encontrados, concluíram que sistemas de integração silvipastoris contribuem com o aumento das frações da matéria orgânica do solo, comparativamente a áreas conduzidas sob monocultivos.

Coser *et al.* (2018) também verificaram aumento em todas as frações químicas da MOS do solo sob sistemas integrados de produção implantados em área de pastagem de baixa produtividade, no bioma Cerrado. Bai *et al.* (2020) justificaram que mudanças na cobertura vegetal alteram o equilíbrio entre a entrada e a saída de carbono do solo, modificando o conteúdo de carbono em diferentes frações da MOS. Adicionalmente, Ramos *et al.* (2020) relataram que as frações da MOS apresentam sensibilidade às alterações de manejo e uso da terra. Neste contexto, estudos indicaram que a diversificação e o elevado aporte de resíduos vegetais em sistemas integrados de produção aumentam os níveis de MOS em frações de maior e menor estabilidade (COSER *et al.*, 2018; DAMIAN *et al.*, 2021; FRAZÃO *et al.*, 2021).

Segnini *et al.* (2013) descreveram que o aumento na concentração de compostos com estruturas menos recalcitrantes no solo ocorre quando o aporte de resíduos vegetais é superior à capacidade de metabolização dos microrganismos. Bordonal *et al.* (2017) observaram redução do índice de humificação a partir de maiores entradas de carbono, indicando aumento na concentração de estruturas menos recalcitrantes no solo. Bai *et al.* (2020) verificaram que a restauração de pastagens aumentou os teores de ácido fúlvico do solo. De acordo com os autores, os aumentos dos teores de ácido fúlvico apresentaram correlação com a maior produção de biomassa radicular obtida após a restauração dos sistemas avaliados. De forma complementar, Pflieger; Cassol; Mafra (2017) colocaram que o elevado aporte de resíduos vegetais e a alta taxa de renovação de raízes finas e posterior decomposição promovem aumentos em frações mais lábeis da MOS.

Nath *et al.* (2018) observaram que a composição química da espécie cultivada também influencia na labilidade da MOS. Segundo Bai *et al.* (2020), as frações estáveis da MOS são derivadas principalmente de compostos resistentes à decomposição, como a lignina e a celulose. Além disso, Bieluczyk *et al.* (2020) descreveram que a consorciação de espécies com diferentes volumes e arquitetura radicular também contribui para a melhoria da estrutura do solo e favorece uma maior estabilização do carbono no solo. Neste contexto, Frazão *et al.* (2021) observaram aumento do carbono da fração húmica em sistema integrado com eucalipto e feijão-guandu no bioma Cerrado. Adicionalmente, o estudo indicou que os aumentos na concentração da fração mais humificada da MOS pode contribuir com o sequestro de carbono ao longo do tempo.

O grau de humificação da MOS e a mobilidade do carbono no solo podem ser estimados a partir da relação entre ácido húmico e ácido fúlvico (C-AH/C-AF) (RAMOS *et al.*, 2020). De acordo com Gmach *et al.* (2018), o ácido húmico apresenta maior estabilidade em relação ao ácido fúlvico, enquanto o ácido fúlvico possui maior labilidade e, com isso, maior susceptibilidade às alterações decorrentes do uso e das práticas de manejo da terra. Pflieger; Cassol; Mafra (2017) complementam que o ácido fúlvico é a fração húmica que possui o menor peso molecular, maior número de grupamentos carboxílicos, maior teor de oxigênio e menor de carbono, propriedades que conferem ao ácido fúlvico maior solubilidade e facilidade de dispersão no perfil do solo.

A relação entre extrato alcalino (soma das frações ácido fúlvico e húmico) e humina (EA/C-HUM) também pode ser utilizada para estimar a estabilidade da MOS. Valores inferiores a unidade (1) indicam

alta estabilidade da MOS devido o predomínio de humina (SANTOS *et al.*, 2019; FRAZÃO *et al.*, 2021). Almeida *et al.* (2021) observaram relação EA/C-HUM inferior a unidade (1) em sistemas integrados, indicando proteção da MOS. Diferentes estudos apontam que o aumento da estabilidade da MOS é importante para atender o princípio de intensificação sustentável da agricultura (TADINI *et al.*, 2021a; TADINI *et al.*, 2021b). Tadini *et al.* (2021a) reportaram que o carbono é sequestrado por meio de humificação em moléculas e/ou complexos recalcitrantes. Além disso, De acordo com Tadini *et al.* (2021b), a MOS com grupos mais recalcitrantes impede uma rápida decomposição e liberação de CO₂ para a atmosfera, conferindo maior tempo de permanência no solo e uma contribuição de longo prazo para a mitigação das mudanças climáticas.

3.6 Referências

- ABEBE, B. The Dietary Use of Pigeon Pea for Human and Animal Diets. **The Scientific World Journal**, v. 2022, p. 1-12, 2022.
- ABREU, L. H. G.; FREITAS, I. C.; SANTANA, P. H. L.; BARBOSA, D. L. A.; SANTOS, L. D. T.; SANTOS, M. V.; SANGLARD, D. A.; FRAZAO, L. A. Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2343-2353, 2020.
- ADU-GYAMFI, J. J.; MYAKA, F. A.; SAKALA, W. D.; ODGAARD, R.; VESTERAGER, J. M.; HØGH-JENSEN, H. Biological nitrogen fixation and nitrogen and phosphorus budgets in farmer-managed intercrops of maize–pigeonpea in semi-arid southern and eastern Africa. **Plant and soil**, v. 295, n. 1, p. 127-136, 2007.
- ALAM, B.; SINGH, R.; UTHAPPA, A. R.; CHATURVEDI, M.; SINGH, A. K.; NEWAJ, R.; HANDA, A. K.; CHATURVEDI, O. P. Different genotypes of *Dalbergia sissoo* trees modified microclimate dynamics differently on understory crop cowpea (*Vigna unguiculata*) as assessed through ecophysiological and spectral traits in agroforestry system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 138-148, 2018.
- ALEMU, M.; ASFAW, Z.; WOLDU, Z.; FENTA, B. A.; MEDVECKY, B. Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) (Fabaceae) landrace diversity in northern Ethiopia. **International Journal of Biodiversity and Conservation**, v. 8, n. 11, p. 297-309, 2016.
- ALMEIDA, L. L.S.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO, Á. L. C.; LANA, A. M. Q.; SOUZA, I. A.; PEGORARO, R. F.; FERREIRA, E. A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 1-10, 2021.
- ANGADI, S. V.; UMESH, M. R.; BEGNA, S.; GOWDA, P. Light interception, agronomic performance, and nutritive quality of annual forage legumes as affected by shade. **Field Crops Research**, v. 275, p. 1-10, 2022.
- ARAÚJO, N. C. A.; FRAZÃO, L. A.; FREITAS, I. C.; FERREIRA, E. A.; FREITAS, D. A.; SANTOS, M. V.; SANGLARD, D. A.; FERNANDES, L. A. Soil chemical and microbiological attributes under integrated production system in Oxisol of degraded pasture. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 11, p. 1772-1778, 2020.
- ARAÚJO, S. A. D. C.; SILVA, T. O. D.; ROCHA, N. S.; ORTÊNCIO, M. O. Growing tropical forage legumes in full sun and silvopastoral systems. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 39, p. 27-34, 2017.
- AYALEW, T.; YOSEPH, T.; HÖGY, P.; CADISCH, G. Leaf growth, gas exchange and assimilation performance of cowpea varieties in response to *Bradyrhizobium* inoculation. **Heliyon**, v. 8, p. 1-8, 2022.
- BAI, X.; GUO, Z.; HUANG, Y.; AN, S. Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process. **Catena**, v. 191, p. 1-11, 2020.
- BERTOLIN, D. C.; SÁ, M. E. D.; BUZETTI, S.; SANTIAGO, D.; BARBOSA, R. M. Produção e qualidade de

sementes de guandu: efeitos de doses de fósforo, potássio e espaçamentos em duas épocas de semeadura. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, p. 415-419, 2008.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; MOREIRA, M. Z.; CAMARGO, P. B.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 371, p. 1-14, 2020.

BORDONAL, R. O.; LAL, R.; RONQUIM, C. C.; FIGUEIREDO, E. B.; CARVALHO, J. L. N.; MALDONADO JR, W.; MILORI, D. M. B. P.; LA SCALA JR, N. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 240, p. 54-65, 2017.

CASTRO, C. R. T. D.; GARCIA, R. Competição entre plantas com ênfase no recurso luz. **Ciência Rural**, v. 26, n. 1, p. 167-174, 1996.

CESAR, M. N. Z.; GUERRA, J. G. M.; RIBEIRO, R. D. L. D.; URQUIAGA, S. S. C.; PADOVAN, M. P. Performance de adubos verdes cultivados em duas épocas do ano no Cerrado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 6, n. 2, p. 159-169, 2011.

CHEN, C.; LIU, W.; JIANG, X.; WU, J. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. **Geoderma**, v.299, p. 13-24, 2017.

COELHO, D. S.; MARQUES, M. A. D.; SILVA, J. A. B.; GARRIDO, M.S.; CARVALHO, P. G. S. Respostas fisiológicas em variedades de feijão caupi submetidas a diferentes níveis de sombreamento. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 12, n. 1, p. 14-19, 2014.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R.L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. M. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 15-53, 2015.

CORREIA, A. J.; NÓBREGA, R. S. A.; OLIVEIRA, A. S.; SANTANA, W. S.; BRAULIO, C. S.; OLIVEIRA, M. S.; SOUSA, C. B. C.; SANTOS, A. R. Productivity and growth in cowpea inoculated with rhizobia under different light environments. **Bioscience Journal**, v. 37, p. 1981-3163, 2021.

COSER, T. R.; FIGUEIREDO, C. C.; JOVANOVIC, B.; MOREIRA, T. N.; LEITE, G. G.; CABRAL FILHO, S. L. S.; KATO, E.; MALAQUIAS, J. V.; MARCHÃO, R. L. Short-term buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. **Agricultural systems**, v. 166, p. 184-195, 2018.

COSTA, M. P.; SCHOENEBOOM, J. C.; OLIVEIRA, S. A.; VINAS, R. S.; MEDEIROS, G. A. A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1460-1471, 2018.

COTRIM, M. F.; GAVA, R.; CAMPOS, C. N. S.; DAVID, C. H. O.; REIS, I. D. A.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 1, p. 34-43, 2021.

CUNHA, J. R. D.; FREITAS, R. D. C. A. D.; SOUZA, D. J. D. A. T.; GUALBERTO, A. V. S.; SOUZA, H. A. D.; LEITE, L. F. C. Soil biological attributes in monoculture and integrated systems in the Cerrado region of Piauí State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. 1-9, 2021.

DAKORA, F. D.; BELANE, A. K. Evaluation of protein and micronutrient levels in edible cowpea (*Vigna Unguiculata* L. Walp.) leaves and seeds. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, p. 1-10, 2019.

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. S.; PEDREIRA, B. C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, A. J.; ANDREOTE, F. D.; PREMAZZI, L. M.; CERRI, C. E. P. Pastureland intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. **Applied Soil Ecology**, v. 160, p. 1-13, 2021.

FAN, Y.; CHEN, J.; WANG, Z.; TAN, T., LI, S.; LI, J.; WANG, B.; ZHANG, J.; CHENG, Y.; WU, X.; YANG, W.; YANG, F. Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seedlings response to shading: leaf structure, photosynthesis

and proteomic analysis. **BMC plant biology**, v. 19, n. 1, p. 1-12, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. FAOSTAT. **FAOSTAT Database**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SICHIERI, F. R.; DEBIASI, H.; CONTE, O. Yield of soybean, pasture and wood in integrated crop-livestock-forest system in Northwestern Paraná state, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 1006-1013, 2014.

FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; ALMEIDA NETA, M. N.; MOTA, M. F. C.; ALMEIDA, L. L. 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.

FREITAS, A. D. S.; SILVA, A. F.; SAMPAIO, E. V. D. S. B. Yield and biological nitrogen fixation of cowpea varieties in the semi-arid region of Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 45, p. 109-114, 2012.

FREITAS, I. C.; 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.

GIOMO, G. S.; RAZERA, L. F.; NAKAGAWA, J. Espaçamentos para produção de sementes de guandu em semeadura tardia. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 121-126, 2001.

GMACH, M. R.; DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; NÓBREGA, J. C.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; SIQUEIRA-NETO, M. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, p. 1-8, 2018.

GOMES, M. F.; VASCONCELOS, S. S.; VIANA-JUNIOR, A. B.; COSTA, A. N. M.; BARROS, P. C.; KATO, O. R.; CASTELLANI, D. C. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 15, p. 4313-4326, 2021.

GOMES, V. C.; LIMA MEIRELLES, P. R.; COSTA, C.; BARROS, J. S.; CASTILHOS, A. M.; SOUZA, D. M.; TARDIVO, R.; PARIZ, C. M. Production and quality of corn silage with forage and pigeon peas in a crop-livestock system. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 861-876, 2021.

GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, M. C. M.; ALVARENGA, R. C.; DOS SANTOS, E. A.; SIMÃO, E. P.; CAMPANHA, M. M. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Minas Gerais. **Boletim de Indústria Animal**, v. 71, n. 2, p. 183-191, 2014.

HITZ, T.; HARTUNG, J.; GRAEFF-HÖNNINGER, S.; MUNZ, S. Morphological response of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars to light intensity and red to far-red ratio. **Agronomy**, v. 9, n. 8, p. 1-15, 2019.

HONNAYYA; CHITTAPUR, B. M.; DODDABASAWA. Productivity of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millsp.) in neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) based agroforestry system on Alfisols in semi arid tropics. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 1879-1889, 2020.

HUANG, J.; RINNAN, Å.; BRUUN, T. B.; ENGEDAL, T.; BRUUN, S. Identifying the fingerprint of permanganate oxidizable carbon as a measure of labile soil organic carbon using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, p. 1–11, 2021.

JENSEN, E. S.; CARLSSON, G.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 1, p. 1-9, 2020.

JUMRANI, K.; BHATIA, V. S. Influence of different light intensities on specific leaf weight, stomatal density photosynthesis and seed yield in soybean. **Plant Physiology Reports**, v. 25, n. 2, p. 277-283, 2020.

KEBEDE, E.; BEKEKO, Z. Expounding the production and importance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.)

Walp.) in Ethiopia. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1-21, 2020.

KHALID, M. H. B.; RAZA, M. A.; YU, H. Q.; SUN, F. A.; ZHANG, Y. Y.; LU, F. Z.; SI, L.; IQBAL, N.; KHAN, I.; FU, F. L.; LI, W. C. Effect of shade treatments on morphology, photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybeans (*Glycine max* L. Merr.). **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 17, n. 2, p. 2551-2569, 2019.

KICHEL, A. N.; COSTA, J. A. A.; ALMEIDA, R. G.; PAULINO, V. T. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPP) - experiência no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, v. 71, n. 1, p. 94-105, 2014.

LI, S.; LI, X.; ZHU, W.; CHEN, J.; TIAN, X.; SHI, J. Does straw return strategy influence soil carbon sequestration and labile fractions? **Agronomy Journal**, v. 111, n. 2, p. 897-906, 2019.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa. ES. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1347-1357, 2014.

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**, v. 161, p. 1-9, 2021.

MA, Z.; CHEN, H. Y.; 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**, v. 29, n. 10, p. 1817-1828, 2020.

MANOJ, K. N.; UMESH, M. R.; ANANDA, N.; DUTTARGANVI, S. Effects of low light intensity on radiation use efficiency and productivity of tropical pulses. **Journal of Agrometeorology**, v. 23, n. 3, p. 249-256, 2021.

MATOSO, A. O.; SORATTO, R. P.; GUARNIERI, F.; COSTA, N. R.; ABRAHÃO, R. C.; TIRABASSI, L. H. Sowing date effects on cowpea cultivars as a second crop in Southeastern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1799-1812, 2018.

MORGADO, L. B.; WILLEY, R. W. Effects of plant population and nitrogen fertilizer on yield and efficiency of maize-bean intercropping. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 11, p. 1257-1264, 2003.

MUCHANE, M. N.; SILESHI, G. W.; GRIPENBERG, S.; JONSSON, M.; PUMARIÑO, L.; BARRIOS, E. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 295, p. 1-12, 2020.

MWAMLIMA, L. H.; CHERUIYOT, E. K.; OUMA, J. P. Reduced stomatal conductance and irradiance account for soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] yield decline in maize-soybean intercrop. **Journal of Bioscience and Agriculture Research**, v. 24, n. 01, p. 1977-1989, 2020.

NAMATSHEVE, T.; CARDINAEL, R.; CORBEELS, M.; CHIKOWO, R. Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-Saharan Africa. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 4, p. 1-12, 2020.

NATH, A. J.; BRAHMA, B.; SILESHI, G. W.; DAS, A. K. Impact of land use changes on the storage of soil organic carbon in active and recalcitrant pools in a humid tropical region of India. **Science of the total environment**, v. 624, p. 908-917, 2018.

NDZELU, B. S.; DOU, S.; ZHANG, X. Corn straw return can increase labile soil organic carbon fractions and improve water-stable aggregates in Haplic Cambisol. **Journal of Arid Land**, v. 12, n. 6, p. 1018-1030, 2020.

OLIVEIRA, L. B. D.; BARROS, R. L. N.; MAGALHÃES, W. B. D.; MEDICI, L. O.; PIMENTEL, C. Cowpea growth and yield in sole crop and intercropped with millet. **Revista Caatinga**, v. 30, p. 53-58, 2017.

OSIPITAN, O. A.; FIELDS, J. S.; LO, S.; CUVACA, I. Production Systems and Prospects of Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in the United States. **Agronomy**, v. 11, p. 1-10, 2021.

- OSÓRIO, R. M. L.; AZEVEDO, D. B. Percepções dos Especialistas Frente às Mudanças Climáticas: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta como Alternativa Sustentável à Produção de Alimentos, Fibras e Energia no Agronegócio. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, p. 257-278, 2014.
- PFLEGER, P.; CASSOL, P. C.; MAFRA, Á. L. Substâncias húmicas em cambissolo sob vegetação natural e plantios de pinus em diferentes idades. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 807-817, 2017.
- RAJASHREE; DODAMANI, B. M.; RATHOD, P. S.; PATIL, D. H.; AMAREGOUDA, A. Influence of different fodder crops on yield and yield parameters of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) under intercropping systems. **The Pharma Innovation Journal**, v. 11, n. 1, p. 1573-1576, 2022.
- RAMOS, M. L. G.; SILVA, V. G. D.; CARVALHO, A. M. D.; MALAQUIAS, J. V.; OLIVEIRA, A. D. D.; SOUSA, T. R. D.; SILVA, S. B. Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. 1-9, 2020.
- RAZOUK, R.; DAOUI, K.; RAMDANI, A.; CHERGAOUI, A. Optimal distance between olive trees and annual crops in rainfed intercropping system in northern Morocco. **Journal of Crop Science Research**, v. 1, n. 1, p. 23-32, 2016.
- SACRAMENTO, J. A. A. S. D.; ARAÚJO, A. C. D. M.; ESCOBAR, M. E. O.; XAVIER, F. A. D. S.; CAVALCANTE, A. C. R.; OLIVEIRA, T. S. D. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 784-795, 2013.
- SANDERSON, M. A.; ARCHER, D.; HENDRICKSON, J.; KRONBERG, S.; LIEBIG, M.; NICHOLS, K.; SCHMER, M.; TANAKA, D.; AGUILAR, J. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop–livestock systems. **Renewable agriculture and food systems**, v. 28, n. 2, p. 129-144, 2013.
- SANTOS, E. R.; BORGES, P. R. S.; SIEBENEICHLER, S. C.; CERQUEIRA, A. P.; PEREIRA, P. R. Crescimento e teores de pigmentos foliares em feijão-caupi cultivado sob dois ambientes de luminosidade. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 4, p. 14-19, 2011.
- SANTOS, U. J.; DUDA, G. P.; MARQUES, M. C.; MEDEIROS, E. V.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; BROSSARD, M.; HAMMECKER, C. Soil organic carbon fractions and humic substances are affected by land uses of Caatinga forest in Brazil. **Arid Land Research and Management**, v. 33, n. 3, p. 255-273, 2019.
- SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D. M. B. P.; SILVA, W. T. L. D.; SIMÕES, M. L.; CANTARELLA, H.; MARIA, I. C.; MARTIN-NETO, L. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 321-326, 2013.
- SHARMA, P.; SINGH, I.; KHOSLA, G.; SINGH, G.; SINGH, S.; DHALIWAL, S. K.; SINGH, S. Variability and Association Studies for Yield and Yield Related Traits in Pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]. **Legume Research-An International Journal**, p. 1-6, 2021.
- SILVA, J. A. N.; CECCON, G.; ROCHA, E. C.; SOUZA, C. M. A. Produtividade de feijão-caupi e braquiária com inoculação nas sementes, em cultivo solteiro e consorciado. **Agrarian**, v. 9, n. 31, p. 44-46, 2016.
- SILVA, R. A.; CRESTE, J. E.; MEDRADO, M. J. S.; MAREGA, I. Sistemas integrados de produção: O novo desafio para a agropecuária brasileira. **Colloquium Agrarie**, v. 10, n. 1, p. 55-68, 2014.
- SIQUEIRA, C. C. Z.; CHIBA, M. K.; MOREIRA, R. S.; ABDO, M. T. V. N. Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 3, p. 1059-1069, 2020.
- SOUZA, P. J. D. O. P.; FARIAS, V. D. D. S.; LIMA, M. J. A. D.; RAMOS, T. F.; SOUSA, A. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 30, p. 748-759, 2017.
- SURKI, A. A.; NAZARI, M.; FALLAH, S.; IRANIPOUR, R.; MOUSAVI, A. The competitive effect of almond trees on light and nutrients absorption, crop growth rate, and the yield in almond–cereal agroforestry systems in semi-arid regions. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 3, p. 1111-1122, 2020.

TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; GORANOV, A. I.; MILORI, D. M.; BERNARDI, A. C.; OLIVEIRA, P. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; COLNAGO, L. A.; HATCHER, P. G. Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. 1-18, 2021a.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A.; MILORI, D. M.; OLIVEIRA, P. P.; PEZZOPANE, J. R.; BERNARDI, A. C.; MARTIN-NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 1-9, 2021b.

TORU, T.; KIBRET, K. Carbon stock under major land use/land cover types of Hades sub-watershed, eastern Ethiopia. **Carbon balance and management**, v. 14, n. 7, p. 1-14, 2019.

VARSHNEY, R. K.; PENMETSU, R. V.; DUTTA, S.; KULWAL, P. L.; SAXENA, R. K.; DATTA, S.; SHARMA, T. R.; ROSEN, B.; CARRASQUILLA-GARCIA, N.; FARMER, A. D.; DUBEY, A.; SAXENA, K. B.; GAO, J.; FAKRUDIN, B.; SINGH, M. N.; SINGH, B. P.; WANJARI, K. B.; YUAN, M.; SRIVASTAVA, R. K.; KILIAN, A.; UPADHYAYA, H. D.; MALLIKARJUNA, N.; TOWN, C. D.; BRUENING, G. E.; HE, G.; MAY, G. D.; MCCOMBIE, R.; JACKSON, S. A.; SINGH, N. K.; COOK, D. R. Pigeonpea genomics initiative (PGI): an international effort to improve crop productivity of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.). **Molecular Breeding**, v. 26, n. 3, p. 393-408. 2010.

VENKATA, S. K. C.; RAMA, G. R. N. V. P.; SAXENA, R. K.; SAXENA, K.; UPADHYAYA, H. D.; SIAMBI, M.; SILIM, S. N.; REDDY, K. N.; HINGANE, A. J.; SHARMA, M.; SHARMA, S.; LYIMO, S. D.; UBWE, R.; MAKENGE, M.; GAD, K.; KIMURTO, P. K.; AMANE, M.; KANENGA, K.; OBONG, Y.; MONYO, E.; OJIEWO, C.; VENKATA, N. K. M.; RAO, J. P.; LAKKIREDDY, P.; CHOURAT, S.; SINGH, I.; SAJJA, S.; BELIAPPA, S. H.; VARSHNEY, R. K. Pigeonpea improvement: An amalgam of breeding and genomic research. **Plant Breeding**, v. 138, n. 4, p. 445-454, 2019.

WANG, S.; ADHIKARI, K.; WANG, Q.; JIN, X.; LI, H. Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon (C), nitrogen (N), and C: N ratio from the northeastern coastal agroecosystems in China. **Ecological Indicators**, v. 84, p. 263-272, 2018.

WEN, B. X.; HUSSAIN, S.; YANG, J. Y.; WANG, S.; ZHANG, Y.; QIN, S. S.; XU, M.; YANG, W. Y.; LIU, W. G. Rejuvenating soybean (*Glycine max* L.) growth and development through slight shading stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 10, p. 2439-2450, 2020.

WU, Y. S.; FENG, Y. A. N. G.; GONG, W. Z.; AHMED, S.; FAN, Y. F.; WU, X. L.; YONG, T. W.; LIU, W. G.; SHU, K.; LIU, J.; DU, J. B.; YANG, W. Y. Shade adaptive response and yield analysis of different soybean genotypes in relay intercropping systems. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 6, p. 1331-1340, 2017.

WU, Y.; GONG, W.; YANG, F.; WANG, X.; YONG, T.; YANG, W. Responses to shade and subsequent recovery of soya bean in maize-soya bean relay strip intercropping. **Plant Production Science**, v. 19, n. 2, p. 206-214, 2016.

YADAV, G. S.; KANDPAL, B. K.; DAS, A.; BABU, S.; MOHAPATRA, K. P.; DEVI, A. G.; CHANDRA, P.; SINGH, R.; BARMAN, K. K. Impact of 28 year old agroforestry systems on soil carbon dynamics in Eastern Himalayas. **Journal of Environmental Management**, v. 283, p. 1-11, 2021.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 – Crescimento, nodulação, produção e fisiologia de leguminosas em sistemas integrados de produção.

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico Agronomy Journal.

Crescimento, nodulação, produção e fisiologia de leguminosas em sistemas integrados de produção

Resumo

A escolha de espécies adequadas para cultivo consorciado é preponderante para a produção e sustentabilidade de sistemas conservacionistas. Neste sentido, o estudo teve como objetivo avaliar variáveis de crescimento, nodulação, produção e fisiologia de feijão-caupi e feijão-guandu consorciados com capim-buffel e eucalipto em sistema integrado de produção. Foram conduzidos dois experimentos, simultaneamente, ambos em esquema fatorial 2 x 4. O primeiro fator consistiu na utilização de dois sistemas integrados de produção. Já o segundo correspondeu a realização das avaliações do feijão-caupi e guandu em quatro distâncias (2, 4, 6 e 8 m) das linhas de plantio de eucalipto. No primeiro experimento foram avaliados os sistemas silviagrícola (ILF: eucalipto e feijão-caupi) e agrossilvipastoril (ILPF: eucalipto, feijão-caupi e capim-buffel) e, no segundo, os sistemas silvipastoris IPF1 (eucalipto e feijão-guandu) e IPF2 (eucalipto, feijão-guandu e capim-buffel). A nodulação no feijão-caupi não foi influenciada pelos sistemas e distâncias, enquanto no feijão-guandu ocorreu redução do número e da massa seca de nódulos com o distanciamento das árvores. Maior crescimento, produção de biomassa e atividade fotossintética de feijão-caupi e feijão-guandu foram observadas com o distanciamento das linhas de plantio de eucalipto. Contudo, o feijão-caupi apresentou aumento no peso de 100 grãos nas distâncias de 2 e 4 m das linhas de eucalipto, contribuindo para a melhoria da qualidade dos grãos próximo às árvores. O cultivo simultâneo com capim-buffel não alterou a produtividade das leguminosas, viabilizando maior diversificação e aumento na produção total de biomassa do consórcio.

Abreviaturas: ILF, consórcio entre eucalipto e feijão-caupi; ILPF, consórcio entre feijão-caupi, capim-buffel e eucalipto; IPF1, consórcio entre feijão-guandu e eucalipto; IPF2, consórcio entre feijão-guandu, capim-buffel e eucalipto.

4.1.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de consórcio apresentam como benefícios a estabilidade de produção, maior rendimento por unidade de área, redução da incidência de pragas e uso de agroquímicos, proporcionando aumento na biodiversidade e sustentabilidade dos sistemas produtivos (Jensen et al., 2020). Além disso, Namatsheve et al. (2021) relataram que a integração entre leguminosa e gramínea possibilita a adição significativa de nitrogênio ao sistema por meio da fixação biológica de N₂, contribuindo com o aumento da produtividade da terra. Silva et al. (2022) reportaram que a inclusão de leguminosas em sistemas integrados com gramíneas pode aumentar a produtividade das culturas e de animais.

A diminuição da intensidade luminosa em consórcios, devido ao sombreamento, é um fator crítico no crescimento e na produtividade das culturas, já que a luz regula a eficiência fotossintética das plantas (Jumrani e Bhatia, 2020). A redução da taxa fotossintética, decorrente do sombreamento, diminui a produção de fotoassimilados necessários para o crescimento e produtividade das plantas (Mwamlima et al., 2020). Dessa forma, as espécies de menor estatura podem ter o desenvolvimento prejudicado pela competição com as plantas mais altas (Fan et al., 2019). Entretanto, apesar da redução da luz geralmente diminuir a produtividade da cultura, o nível de perda de produtividade varia de acordo com a espécie utilizada (Angadi et al., 2022).

A redução da radiação fotossinteticamente ativa, em sistemas agroflorestais, consiste na limitação mais importante para a cultura no sub-bosque, que pode ser manejada aumentando a distância de plantio das árvores (Surki et al., 2020). Honnayya et al. (2020) observaram redução gradual no crescimento e produtividade de feijão-guandu com o aumento da proximidade das linhas de plantio de árvores em sistemas agroflorestais. Apesar disso, Manoj et al. (2021) relataram o feijão-guandu como uma leguminosa com potencial para sistemas consorciados. Angadi et al. (2022) também constataram o feijão-caupi, entre diferentes leguminosas avaliadas sob sombreamento, como uma das espécies mais tolerantes a redução da luminosidade.

O feijão-caupi é uma leguminosa de múltiplos usos, que pode ser utilizada para alimentação animal (Iqbal et al., 2018), humana (Kebede e Bekeko, 2020) e como adubo verde (Abera e Gerkabo, 2020). O feijão-guandu também é utilizado na alimentação animal (Neres et al., 2012), humana (Miano et al., 2020) e como estratégia para manutenção da sustentabilidade do solo (Teodoro et al., 2018), apresentando, portanto, uma vasta possibilidade de usos. Além disso, diferentes estudos mostram que o feijão-caupi (Sindhu et al., 2019; Carvalho et al., 2017; Boukar et al., 2019) e o feijão-guandu (Musokwa e Mafongoya, 2021; Lobato et al., 2020) são culturas adaptadas a diferentes condições edafoclimáticas.

Apesar das diferentes possibilidades de uso e de produção em condições edafoclimáticas variadas, estudos que avaliam o desempenho das leguminosas citadas em sistemas integrados de produção ainda são limitados, ocasionando carência de informações para otimização da capacidade produtiva nestes sistemas. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar variáveis de crescimento, nodulação, produção e fisiologia de feijão-caupi e guandu consorciados com capim-buffel e eucalipto em sistema integrado de produção.

4.1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos entre dezembro de 2019 e maio de 2020 na Fazenda Experimental Hamilton de Abreu Navarro (16°40'03"S, 43°50'41"W, 598 m de altitude), localizada no

Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, no município de Montes Claros, Minas Gerais, Brasil. A área está no bioma Cerrado (*stricto sensu*) e apresenta relevo levemente ondulado. O clima é tropical de savana (Aw segundo classificação de Köppen), com verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual no período que abrangeu as avaliações deste estudo foi de 923 mm, com temperatura média de 24,9°C, conforme demonstrado na figura 1 (Instituto Nacional de Meteorologia, 2022).

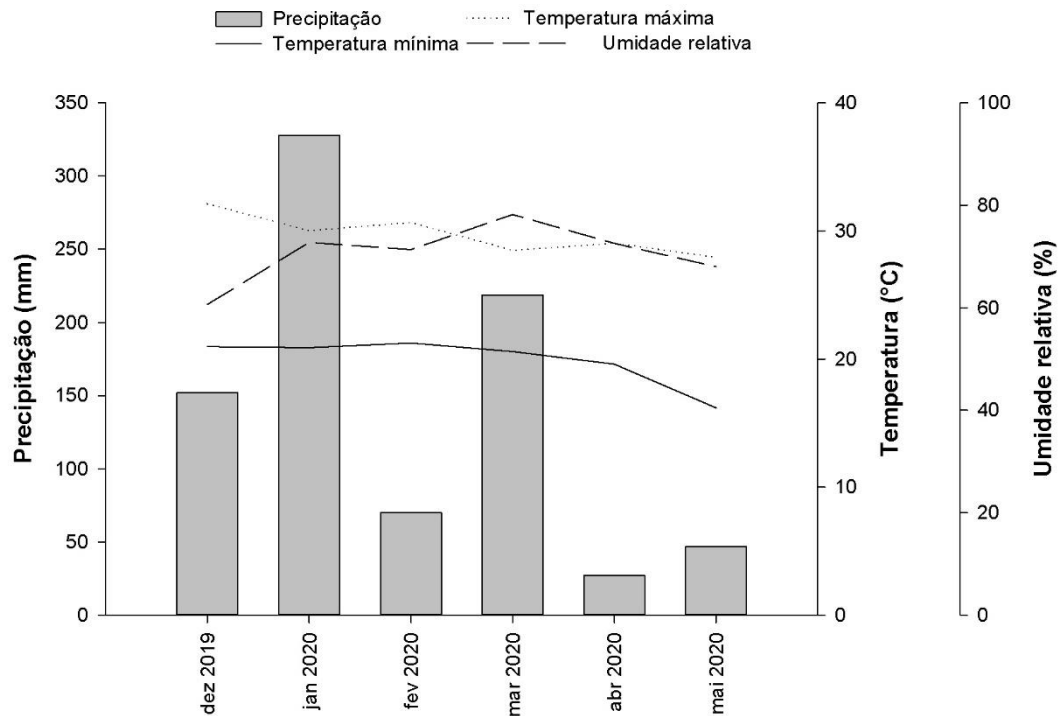


FIGURA 1 Temperaturas máxima e mínima, umidade relativa e precipitação mensal no município de Montes Claros – MG entre dezembro de 2019 e maio de 2020.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, tendo, na camada de 0-20 cm de profundidade, apresentado as seguintes características químicas e físicas: pH em água = 6,50; P Mehlich 1 = 17,52 mg dm⁻³; P remanescente = 39,00 mg L⁻¹; K = 217 mg dm⁻³; Ca = 7,60 cmol_c dm⁻³; Mg = 3,28 cmol_c dm⁻³; Al = 0,00 cmol_c dm⁻³; H+Al = 2,08 cmol_c dm⁻³; Soma de Bases = 11,44 cmol_c dm⁻³; Capacidade Efetiva de Troca de Cátions = 11,44 cmol_c dm⁻³; Saturação por Alumínio = 0,00 %; Capacidade Potencial de Troca de Cátions = 13,52 cmol_c dm⁻³; Saturação por Bases = 84,61 %; Carbono Orgânico = 20,37 g kg⁻¹; Areia = 38,00 g kg⁻¹; Silte = 32,00 g kg⁻¹; Argila = 30,00 g kg⁻¹; e Densidade = 1,41 g cm⁻³.

A área experimental apresenta 6900 m² e foi implantada em 2009 sobre pastagem de baixa produtividade. O componente arbóreo é o híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*), com arranjo de 20 x 3 m (166 árvores ha⁻¹) e linhas de plantio no sentido leste-oeste (Figura 2). Em inventário realizado, as árvores apresentaram altura total de 44,74 m. A radiação fotossinteticamente ativa média foi obtida a partir do ceptômetro AccuPAR modelo LP-80 nas distâncias de 2, 4, 6 e 8 m das linhas de plantio das árvores, que apresentaram 324,92, 369,20, 378,08 e 395,98 μmol m² s⁻¹, respectivamente, enquanto a pleno sol foi de 647 μmol m² s⁻¹.

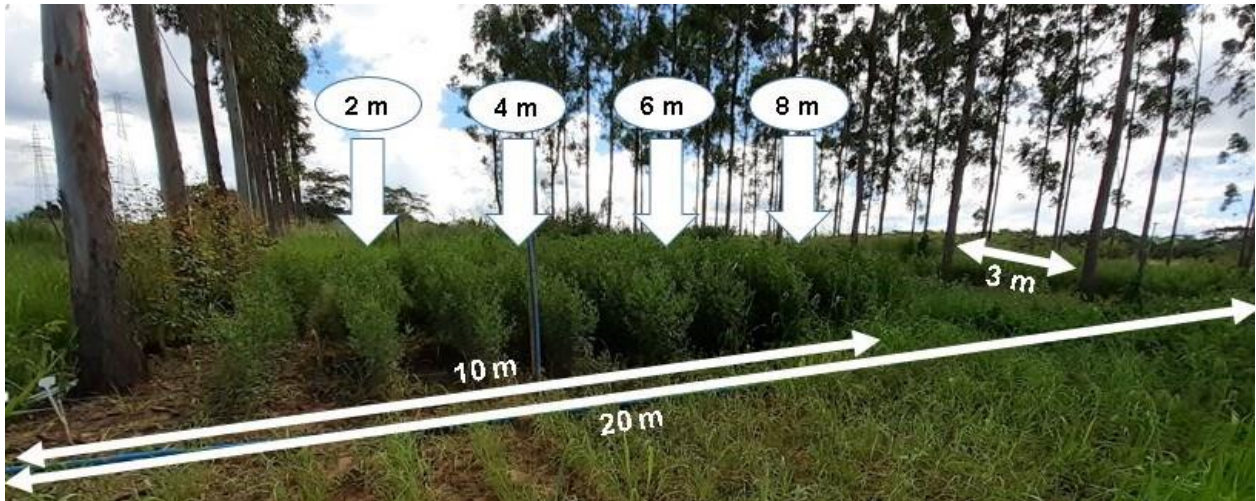


FIGURA 2 Espaçamento entre linhas de plantio (20 m) e árvores de eucalipto (3 m), área ocupada por parcela (10 x 3 m) e distâncias (2, 4, 6 e 8 m) das linhas de plantio de eucalipto utilizadas na avaliação do feijão-caupi e guandu.

Foram conduzidos dois experimentos simultaneamente, na mesma área experimental. Em ambos, foram utilizados o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições, com tratamentos arranjados em esquema fatorial 2 x 4. O primeiro fator consistiu na utilização de dois sistemas integrados de produção. Já o segundo correspondeu a realização das avaliações do feijão-caupi e guandu em quatro distâncias (2, 4, 6 e 8 m) das linhas de plantio das árvores (eucalipto) (Figura 2). Para o primeiro experimento, foram avaliados os sistemas silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF), enquanto para o segundo experimento, foram avaliados os sistemas silvipastoris IPF1 e IPF2.

O sistema ILF foi composto por eucalipto e feijão-caupi, enquanto o sistema ILPF foi formado pelo consórcio de eucalipto, feijão-caupi e capim-buffel. O sistema IPF1 foi composto por eucalipto e feijão-guandu, enquanto o sistema IPF2 foi formado pelo consórcio de eucalipto, feijão-guandu e capim-buffel. Em ambos os experimentos, as distâncias das linhas de eucalipto utilizadas para determinação dos atributos estudados foram 2, 4, 6 e 8 m (Figura 2). As unidades experimentais, alocadas entre as linhas das árvores, tiveram dimensão de 10 x 3 m (30 m²), respeitando 1 m de distância das linhas de eucalipto (Figura 2).

O plantio de feijão-guandu, feijão-caupi e capim-buffel foi realizado entre as linhas de eucalipto em dezembro de 2019, quando o sistema integrado apresentava 11 anos de idade. Para a implantação dos sistemas integrados citados, realizou-se a dessecação de espécies remanescentes de cultivos anteriores (predomínio de *Brachiaria* sp) com Glifosato Atanor® (4,0 L ha⁻¹). O solo foi preparado para plantio (gradagem) e, em seguida, foi realizada a adubação de plantio com a aplicação 20 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e, 25 dias após a semeadura (DAS), foram aplicados 20 kg ha⁻¹ de K₂O e 20 kg ha⁻¹ de N (Freire Filho et al., 2005). No momento da implantação das culturas, foi montado um sistema de irrigação por aspersão visando evitar perdas de plantas por estresse hídrico em períodos sem chuva, por meio da aplicação de lâmina de 16 mm por semana.

O feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp., cv. Iapar 43/Aratã) foi semeado visando um estande final de 10 plantas m⁻¹, com 1 m de espaçamento entre linhas, e o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp., cv. BRS Potengi) com 8 plantas m⁻¹ e 0,5 m entre linhas. Para a semeadura do capim-buffel

(*Cenchrus ciliaris* L., cv. Aridus), foram utilizados 35 kg ha⁻¹ de sementes (2 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis), em linhas espaçadas por 0,5 m de distância. A semeadura das parcelas com consórcio entre as leguminosas e o capim-buffel seguiu os mesmos espaçamentos e população de plantas utilizados nas parcelas onde não houve consórcio. O feijão-caupi foi manejado visando a produção de grãos e o feijão-guandu e o capim-buffel foi utilizado para produção de forragem. O capim-buffel permaneceu na área após a produção das leguminosas.

No florescimento pleno (50% das plantas com flores abertas), foram selecionadas, ao acaso, duas plantas em cada distância, totalizando 64 plantas em cada experimento. Cada planta foi coletada com um volume de solo de 25 cm de comprimento x 25cm de largura x 30 cm de profundidade com o auxílio uma pá reta para abertura da cova. O solo foi separado do sistema radicular por meio de jato d'água sobre uma peneira com malha de 2 x 2 mm. As variáveis avaliadas no florescimento do feijão-caupi foram: comprimento da haste principal da planta, número de folhas, número de nódulos, massa seca de nódulos, massa seca de caule, massa seca de folha, massa seca de raiz e massa seca total. Além das variáveis citadas, para o feijão-guandu também foram aferidos o diâmetro do caule, diâmetro de hastes e número de hastes.

O comprimento da haste principal da planta foi determinado por meio de fita métrica, medindo-se do nível do solo até a inserção da última folha trifoliolada, anotando-se também o número de folhas e hastes presentes em toda planta. O diâmetro do caule e hastes foi obtido por meio de paquímetro digital. A parte aérea foi separada das raízes com corte feito no ponto de inserção cotiledonar. Os nódulos foram retirados das raízes, contados e secos em papel absorvente. A parte aérea das plantas (caule e folhas), as raízes e os nódulos foram acondicionados em sacos de papel, deixados em estufa de circulação forçada a 65°C até atingir peso constante (± 72 h), para se proceder à avaliação da massa seca de nódulos, caule, folha, raiz e massa seca total.

No florescimento das leguminosas, também foram avaliadas as variáveis CO₂ consumido, carbono interno, taxa transpiratória, condutância estomática e taxa fotossintética com uso do analisador de gás por infravermelho (IRGA - Infrared gas analyser) modelo LCpro – SD. As avaliações foram realizadas no período matutino (entre 7 e 9 h), em dias sem nuvens. Foram amostradas aleatoriamente três plantas em cada unidade experimental, utilizando-se folhas totalmente expandidas localizadas próximo ao ápice das plantas.

A colheita do feijão-caupi foi realizada manualmente com aproximadamente 75 DAS, quando as vagens se encontravam maduras, em área de 0,5 m² (demarcada com pvc de 1,0 x 0,5 m) em cada distância avaliada. Foram analisados o número de vagens, peso de vagens, peso de 100 sementes e produtividade efetiva de grãos. Para determinação do peso de 100 sementes e da produtividade, a umidade foi corrigida para 13% a partir do método da estufa a 105°C. O corte do feijão-guandu foi realizado 150 DAS para determinação da produtividade efetiva de massa seca. A produtividade efetiva de massa seca do feijão-guandu foi obtida a partir da coleta de todas as plantas presentes em 1 m linear, em cada distância. Em seguida, as plantas coletadas foram levadas a estufa de circulação forçada (65°C) até a verificação de peso constante (aproximadamente 72 h).

Os valores de produtividade efetiva de grãos e de massa seca foram determinados de acordo com a seguinte equação: produtividade efetiva de massa seca (MS) (kg ha⁻¹) = {Produtividade de MS (kg ha⁻¹) x [(10000 - área ocupada por árvores (m²)) / 10000]}. A área ocupada pelas árvores correspondeu a 10%,

enquanto a área disponível para produção agropecuária foi equivalente a 90%.

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para verificar a ocorrência de distribuições normais e o teste de Bartlett para constatar a homogeneidade de variâncias. Os valores obtidos a partir de contagem (número de hastes, folhas, nódulos e vagens) foram transformados em $\sqrt{x} + 0,5$ para atender as pressuposições de normalidade para a realização da análise de variância, sendo apresentado, nos resultados, os valores não transformados. A partir da validação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, foi realizada a análise de variância e aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A análise estatística foi realizada com o software R, versão 3.6.2 (R Core Team, 2019).

4.1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se efeito da interação entre os fatores sistemas e distâncias para variáveis CO₂ consumido e taxa transpiratória no feijão-caupi (Tabela 1), sendo, as demais variáveis, avaliadas de forma independente (Figuras 3, 4 e 5).

TABELA 1 Resumo da análise de variância para variáveis de crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-caupi em diferentes sistemas com eucalipto (S) e em diferentes distâncias (D) das linhas de plantio de eucalipto.

FV	Variáveis																
	ch	nf	nn	msn	msc	msf	msr	mst	nv	pv	ps	prod	ΔC	Ci	E	Gs	A
S	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*	ns
D	*	ns	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	*	ns	*	*	*	*	*
S*D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns
CV%	19,8	25,4	21,3	43,6	31,9	30,3	21,1	26,9	12,7	29,3	11,6	33,0	13,9	2,2	6,0	27,9	14,8

FV: Fonte de variação; S: Sistema; D: Distância; Variáveis: Comprimento da haste principal (ch), número de folhas (nf) e nódulos (nn), massa seca de nódulos (msn), caule (msc), folha (msf), raiz (msr) e massa seca total (mst), número de vagens (nv), peso de vagens (pv), peso de 100 sementes (ps), produtividade efetiva de grãos (prod), CO₂ consumido (ΔC), carbono interno (Ci), taxa transpiratória (E), condutância estomática (Gs) e taxa fotossintética (A); ns: não significativo; *: significativo ao nível de 0,05 pelo teste F.

Para o feijão-guandu, constatou-se efeito da interação entre os fatores sistemas e distâncias para as variáveis número de hastes, taxa transpiratória e taxa fotossintética (Tabela 2), sendo, as demais variáveis, avaliadas de forma independente (Figuras 6 e 7).

TABELA 2 Resumo da análise de variância para variáveis de crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-guandu em diferentes sistemas com eucalipto (S) e em diferentes distâncias (D) das linhas de plantio de eucalipto.

FV	Variáveis															
	ch	dc	dh	nh	nf	nn	msc	msf	msr	msn	prod	ΔC	Ci	E	Gs	A
S	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*
D	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
S*D	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
CV%	3,8	4,5	9,0	4,2	17,5	18,6	30,8	30,1	26,9	45,2	35,1	22,5	3,5	5,2	32,7	12,6

FV: Fonte de variação; S: Sistema; D: Distância; Variáveis: Comprimento da haste principal (ch), diâmetro do caule (dc) e hastes (dh), número de hastes (nh), folhas (nf) e nódulos (nn), massa seca de caule (msc), folha (msf), raiz (msr) e nódulos (msn), produtividade efetiva de massa seca (prod), CO₂ consumido (ΔC), carbono interno (Ci), condutância estomática (Gs), taxa transpiratória (E) e taxa fotossintética (A); ns: não significativo; *: significativo ao nível de 0,05 pelo teste F.

4.1.3.1 Crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-caupi

As variáveis comprimento da haste principal, número de folhas, número de nódulos, massa seca de nódulos, massa seca de caule, massa seca de folha e massa seca de raiz foram semelhantes entre os sistemas ILF e ILPF (Figura 3). Observou-se acréscimo no comprimento da haste principal, massa seca de caule, massa seca de folha, massa seca de raiz e massa seca total com o distanciamento das linhas de plantio de eucalipto. De forma geral, maior comprimento da haste principal e maior produção de biomassa foram observadas na distância de 8 m. As variáveis número de folhas e nódulos e massa seca de nódulos não apresentaram diferença entre os sistemas avaliados e distâncias estudadas (Figura 3).

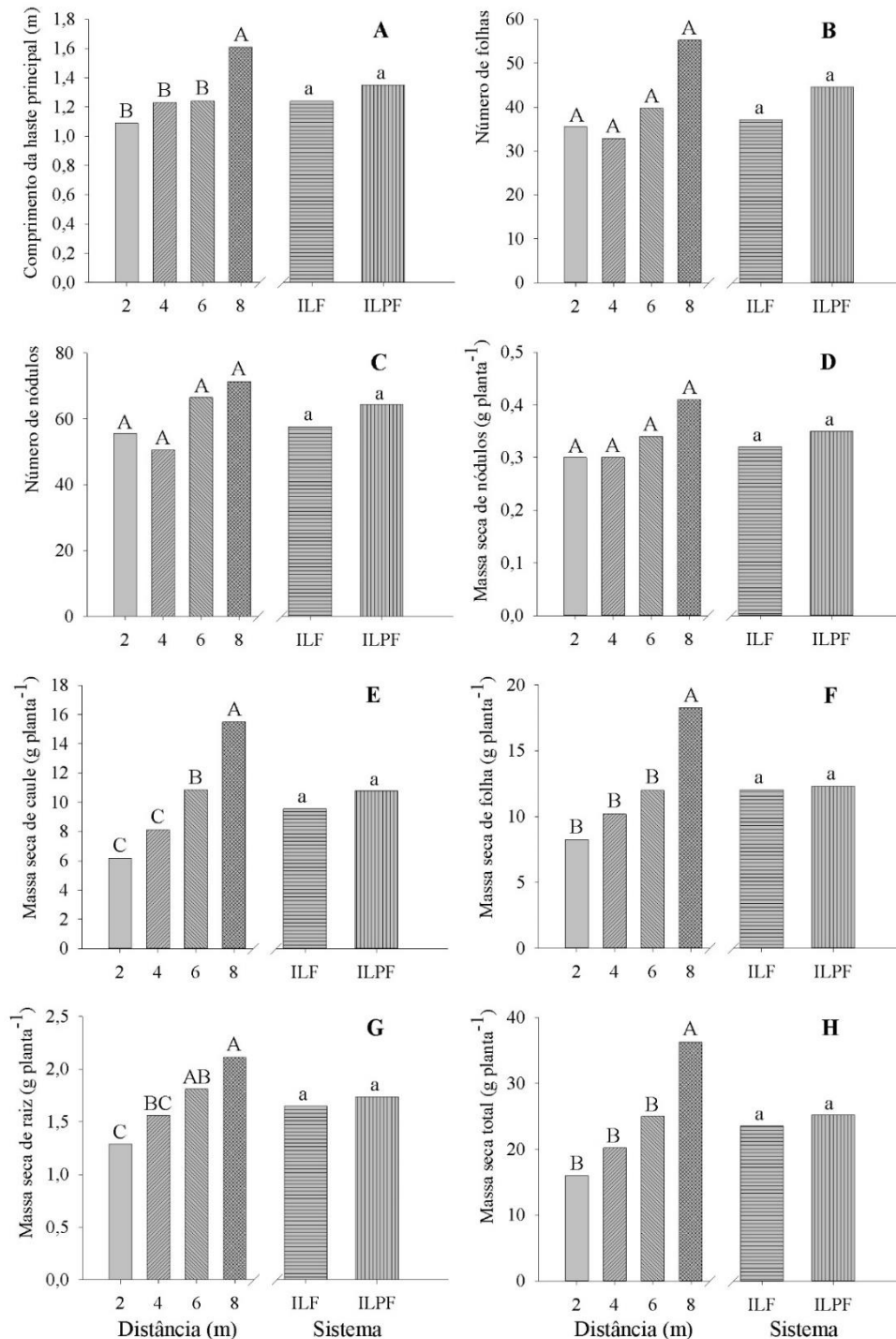


FIGURA 3 Comprimento da haste principal (A), número de folhas (B) e nódulos (C), massa seca de nódulos (D), caule (E), folha (F), raiz (G) e massa seca total (H) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

ILF: consórcio entre eucalipto e feijão-caupi. ILPF: consórcio entre feijão-caupi, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para distâncias e minúsculas para sistemas, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Varição na produção de biomassa de plantas de feijão-caupi cultivado em sub-bosque também foi observada em estudo realizado por Alam et al. (2018). Os autores relataram redução da produção de

biomassa de feijão-caupi no sub-bosque de genótipos de *Dalbergia sissoo* que apresentaram maior índice de área foliar, proporcionando maior interceptação de luz pelo dossel e, conseqüentemente, maior sombreamento sobre a cultura agrícola. De acordo com Alam et al. (2018), as diferentes intensidades de sombreamento influenciaram o crescimento de feijão-caupi nos sistemas agrossilviculturais avaliados.

O distanciamento das linhas de plantio de eucalipto, no presente estudo, contribuiu para elevar a produção de biomassa de feijão-caupi devido ao menor nível de sombreamento e maior interceptação de luz pela cultura no sub-bosque, mostrando a necessidade de planejamento adequado na escolha do componente arbóreo e no arranjo dos sistemas integrados visando maior produção de biomassa. Resultados semelhantes também foram observados por Correia et al. (2021) ao avaliar o crescimento de feijão-caupi e por Jumrani e Bhatia (2020) em estudo com soja em diferentes condições de luminosidade.

Em contrapartida, Coelho et al. (2014) observaram maior desenvolvimento vegetativo em feijão-caupi sob sombreamento e relacionaram os ganhos obtidos em biomassa com melhorias nos processos bioquímicos e morfogênicos nas variedades estudadas. Os autores também constaram que variedades de feijão-caupi podem apresentar respostas distintas entre si quanto à capacidade de adaptação ao sombreamento, provavelmente, devido a diferenças no ponto de saturação de luz do aparelho fotossintético. Santos et al. (2011) relataram maior área foliar e teores de clorofila a e b e carotenoides em feijão-caupi cultivado em ambiente artificial (50% de luminosidade), sugerindo aclimatação a ambiente com menor luminosidade. Dessa forma, a tolerância ao sombreamento pode estar relacionada ao genótipo, o que mostra a necessidade de estudos com diferentes variedades de feijão-caupi em sistemas integrados de produção para identificação daquelas com maior potencial produtivo.

Correia et al. (2021) constataram que o sombreamento artificial com tela preta não influenciou as variáveis número de nódulos e massa seca de nódulos de feijão-caupi em floração quando comparado ao cultivo em pleno sol, corroborando com os resultados do presente estudo, já que o distanciamento das linhas de plantio de eucalipto não alterou as variáveis de nodulação. Oliveira et al. (2017) observaram que o feijão-caupi em consórcio com milho apresentou massa seca de nódulos igual ao sistema em monocultivo, demonstrando que o sombreamento gerado pelo milho não afetou a nodulação, assim como o componente arbóreo e o capim-buffel no presente estudo. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2016) entre cultivo de feijão-caupi solteiro e consórcio de feijão-caupi e capim braquiária.

Neste contexto, Namatsheve et al. (2020) não observaram diferença na porcentagem de nitrogênio proveniente da fixação biológica entre cultivo de feijão-caupi solteiro e consorciado. No presente estudo, todos os tratamentos proporcionaram nodulação aparentemente suficiente para garantir uma eficiente fixação biológica de nitrogênio para o feijão-caupi (Zilli et al., 2011), tendo sido observado número mínimo de 44 nódulos planta⁻¹.

As variáveis número de vagens, peso de vagens, peso de 100 sementes e produtividade efetiva de grãos também foram semelhantes entre os sistemas ILF e ILPF (Figura 4). Foi observada redução no peso de 100 sementes com o distanciamento das linhas de plantio de eucalipto (Figura 4), enquanto as variáveis número de vagens, peso de vagens e produtividade efetiva de grãos não apresentaram diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre as distâncias estudadas.

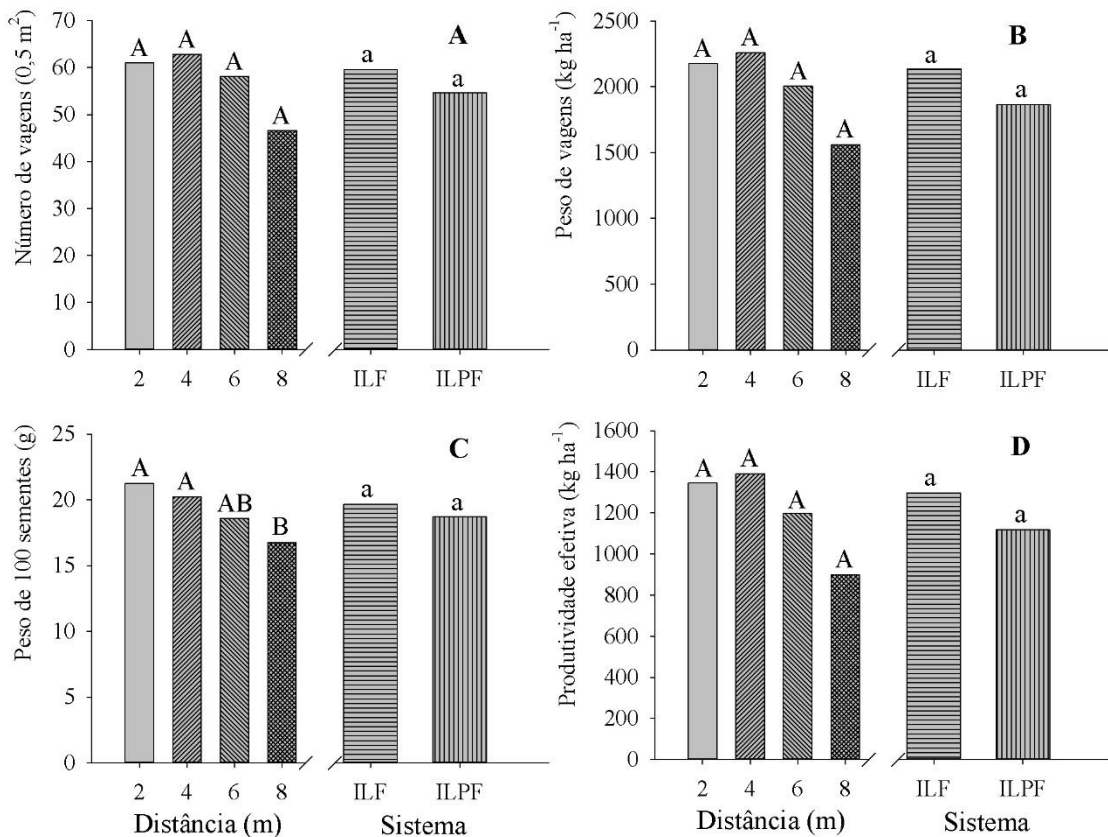


FIGURA 4 Número de vagens (A), peso de vagens (B), peso de 100 sementes (C) e produtividade efetiva de grãos (D) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

ILF: consórcio entre eucalipto e feijão-caupi. ILPF: consórcio entre feijão-caupi, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para distâncias e minúsculas para sistemas, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O maior peso de 100 grãos ($p \leq 0,05$) nas distâncias de 2 e 4 m das linhas de eucalipto indicou melhoria da qualidade dos grãos próximo às árvores. Ao avaliar a massa de 1000 grãos, Silva et al. (2016) encontraram 219,11 g em cultivo de feijão-caupi consorciado com capim braquiária, massa superior a observada no cultivo de feijão-caupi solteiro (187,02 g). Silva et al. (2016) relataram ainda produtividade de grãos semelhante entre cultivo de feijão-caupi consorciado com capim braquiária e cultivo de feijão-caupi solteiro, com valores de 845 kg ha⁻¹ e 782,25 kg ha⁻¹, respectivamente, indicando que a competição resultante da consorciação nas condições estudadas não influenciou na produtividade de grãos, semelhante ao observado no presente estudo.

Angadi et al. (2022) constataram o feijão-caupi como uma das espécies mais tolerantes a redução da luminosidade em estudo que avaliou diferentes leguminosas sob sombreamento (30%). Apesar da produção de sementes geralmente apresentar correlação positiva com o acúmulo de massa seca total, Jumrani e Bhatia (2020) e Khalid et al. (2019) identificaram que níveis de sombreamento entre 20 a 30% permitem maior produtividade de sementes de soja em plantio consorciado. Adicionalmente, Wen et al. (2020) também relataram que, embora a massa seca de plantas de soja reduziu com o aumento do sombreamento, o peso de sementes não apresentou a mesma tendência. Em sombreamento leve, as

plantas de soja usam mais produtos fotossintéticos para o desenvolvimento das sementes do que para o crescimento vegetativo (Wen et al., 2020), fenômeno que pode explicar o aumento do peso de sementes de feijão-caupi próximo às árvores no presente estudo.

O CO₂ consumido apresentou menor valor na distância de 2 m (maior proximidade das árvores) em ambos os sistemas integrados (ILF e ILPF) (Tabela 3). Também foi observada redução no CO₂ consumido no sistema ILPF (4 m), quando comparado ao sistema ILF. As variáveis carbono interno e a condutância estomática foram superiores no sistema ILF (Figura 5). Foi observada redução no carbono interno com o distanciamento das linhas de plantio de eucalipto, enquanto a condutância estomática aumentou com o distanciamento (Figura 5).

TABELA 3 CO₂ consumido (ΔC) e taxa transpiratória (E) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

Sistema	Distância (m)			
	2	4	6	8
ΔC ($\mu\text{mol m}^{-1}$)				
ILF	8,00 aC	32,25 aA	25,00 aB	29,00 aAB
ILPF	12,00 aB	27,00 bA	28,00 aA	25,00 aA
E ($\text{mol H}_2\text{O m}^2 \text{s}^{-1}$)				
ILF	0,97 aD	1,42 aC	1,89 aB	2,04 aA
ILPF	0,52 bB	1,03 bA	0,99 bA	1,13 bA

ILF: consórcio entre eucalipto e feijão-caupi. ILPF: consórcio entre feijão-caupi, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

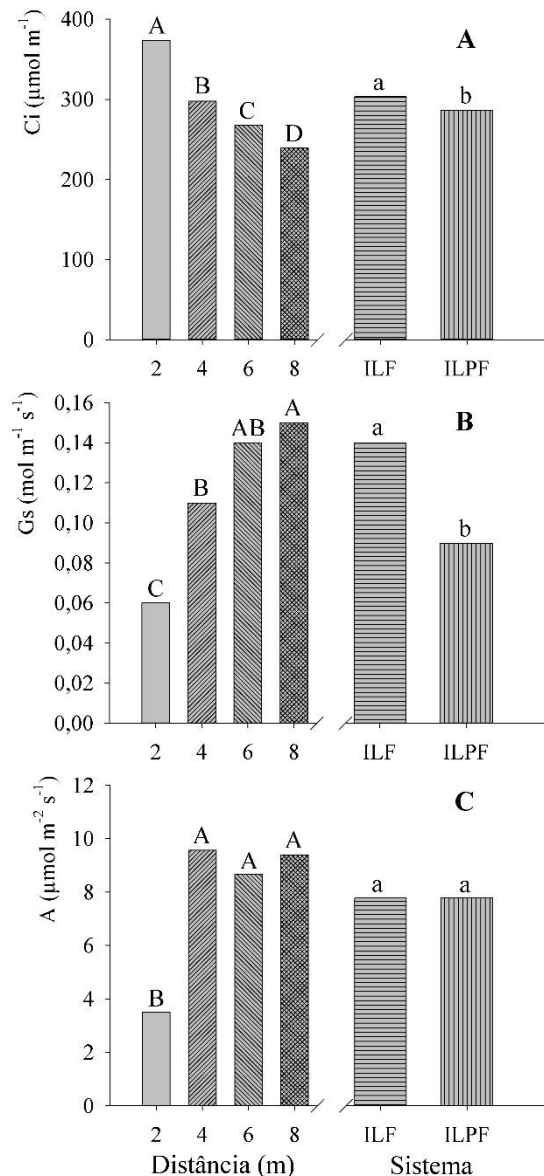


FIGURA 5 Carbono interno (Ci) (A), condutância estomática (Gs) (B) e taxa fotossintética (A) (C) de feijão-caupi em sistema silviagrícola (ILF) e agrossilvipastoril (ILPF) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

ILF: consórcio entre eucalipto e feijão-caupi. ILPF: consórcio entre feijão-caupi, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para distâncias e minúsculas para sistemas, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A taxa transpiratória apresentou menor valor na distância de 2 m (maior proximidade das árvores) em ambos os sistemas integrados (ILF e ILPF) (Tabela 3). Também foi observada redução na taxa transpiratória no sistema ILPF em todas as distâncias avaliadas (2, 4, 6 e 8m). Quanto a taxa fotossintética, foram observados valores semelhante entre os sistemas ILF e ILPF e menor valor próximo às linhas de plantio de eucalipto (2m) (Figura 5).

Os achados do presente estudo estão de acordo com Alam et al. (2018) que observaram diminuição da taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração em feijão-caupi devido a redução da luz incidente sob o dossel de árvores em sistemas agroflorestais com maior restrição luminosa. De

acordo com os autores, variáveis microclimáticas como aumento da umidade relativa e redução da temperatura do ar e do solo de áreas entre fileiras de árvores também contribuem para as alterações fisiológicas observadas em feijão-caupi cultivado em sub-bosque, além da redução da interceptação do fluxo de fótons fotossintéticos pela cultura sombreada. A redução da temperatura em locais onde há menor luminosidade leva a diminuição da transpiração, devido a menor necessidade de resfriamento foliar.

No presente estudo, foi observado que a taxa fotossintética não apresentou variação a partir da distância de 4 m das árvores, indicando que apenas a redução da radiação solar na distância de 2 m foi suficiente para alterar a eficiência fotossintética (Figura 5). A redução da radiação fotossinteticamente ativa em sistemas agroflorestais consiste na limitação mais importante para a cultura no sub-bosque, que pode ser manejada aumentando a distância de plantio das árvores (Surki et al., 2020). Além disso, a competição por água e nutrientes também pode interferir no desenvolvimento das espécies consorciadas, o que também exige planejamento para escolha da distância de cultivo das árvores (Razouk et al., 2016). Há maior sombreamento e competição próximo à linha das árvores (Honnayya et al., 2020). Contudo, os resultados do presente estudo mostraram que a redução da taxa fotossintética não foi suficiente para reduzir a produtividade de grãos, conforme já discutido anteriormente, porém, pode ter contribuído para diminuição da produção de matéria seca.

Coelho et al. (2014) também observaram, em feijão-caupi submetido a diferentes níveis de sombreamento, que a condutância estomática e a taxa de transpiração seguiram tendência semelhante a taxa fotossintética, e esse resultado foi atribuído a elevada correlação entre estas variáveis. Com o aumento da taxa transpiratória, condutância estomática e taxa fotossintética houve aumento do CO₂ consumido e redução do carbono interno, semelhante ao observado na literatura (Ayalew et al., 2022; Cotrim et al., 2020). Em condições ideais há aumento da taxa fotossintética e consequente aumento no processamento de CO₂, que resulta na redução do carbono interno (Cotrim et al., 2020). Coelho et al. (2014) verificaram ainda que a eficiência fotossintética sob restrição luminosa difere entre variedades de caupi, podendo haver maior eficiência em pleno sol (variedade BRS Pujante) ou sob 30 % de sombreamento (BRS Acauã), o que indica a necessidade de seleção de variedades apropriadas para cultivo em sistemas integrados.

A avaliação do crescimento, produção, nodulação e variáveis fisiológicas de feijão-caupi ao longo do transecto de árvores em sistemas integrados com onze anos de implantação permitiu identificar o feijão-caupi como uma espécie estratégica para produção em sistemas agrosilvipastoris, já que a nodulação e a produtividade de grãos não foram reduzidas, apesar de alterações na produção de biomassa e variáveis fisiológicas. Além disso, foi constatado aumento no peso de 100 sementes próxima as linhas de plantio das árvores. A realização de novos estudos para identificação e validação de variedades de feijão-caupi, assim como de diferentes arranjos é necessária visando a otimização da produção e obtenção dos benefícios resultantes da consorciação de diferentes componentes de produção.

4.1.3.2 Crescimento, produção, nodulação e características fisiológicas de feijão-guandu

As variáveis comprimento da haste principal, diâmetro de hastes, número de folhas, número de nódulos, massa seca de caule, massa seca de folha, massa seca de raiz, massa seca de nódulos e produtividade efetiva de massa seca foram semelhantes entre os sistemas IPF1 e IPF2, enquanto o diâmetro do caule foi inferior no sistema IPF2 (Figura 6). Foi observada redução do número de hastes no

sistema IPF2 (4m), quando comparado ao sistema IPF1 (Tabela 4).

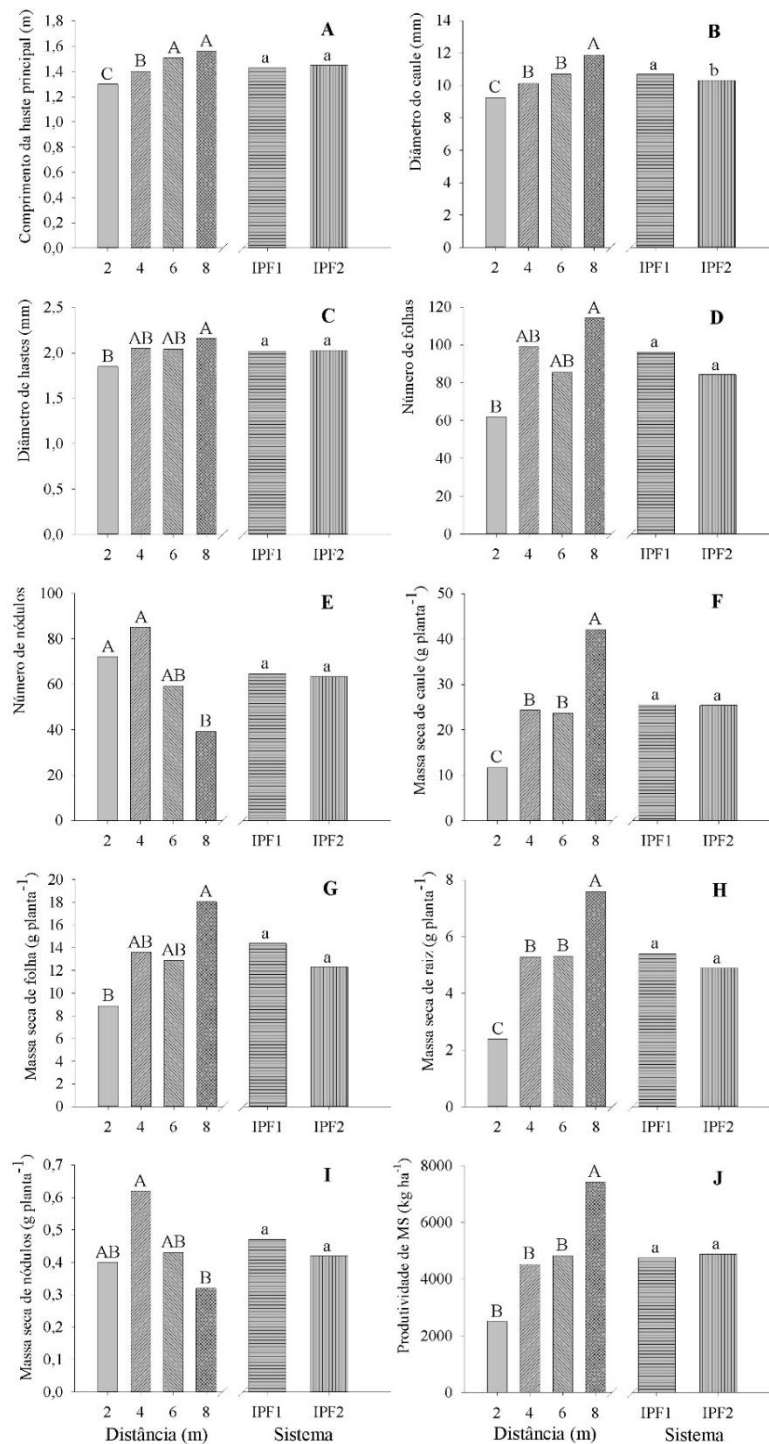


FIGURA 6 Comprimento da haste principal (A), diâmetro do caule (B), diâmetro das hastes (C), folhas (D) e nódulos (E), massa seca de caule (F), folha (G), raiz (H), nódulos (I) e produtividade efetiva de massa seca (J) de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

IPF1: consórcio entre feijão-guandu e eucalipto. IPF2: consórcio entre feijão-guandu, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para distâncias e minúsculas para sistemas, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 4 Número de hastes de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

Sistema	Distância (m)			
	2	4	6	8
	Número de hastes			
IPF1	21,75 aB	23,15 aB	24,15 aAB	27,45 aA
IPF2	20,75 aC	19,65 bC	24,75 aB	30,00 aA

IPF1: consórcio entre feijão-guandu e eucalipto. IPF2: consórcio entre feijão-guandu, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

De modo geral, maior comprimento da haste principal, diâmetro de caule, diâmetro e número de hastes, assim como uma maior produção de biomassa de caule, folha e raiz e maior produtividade efetiva de massa seca foram obtidos com o distanciamento das linhas de plantio das árvores, enquanto o número de nódulos e a produção de massa seca de nódulos apresentaram diminuição com o distanciamento (Figura 6; Tabela 4).

Honnayya et al. (2020) relataram maior crescimento e produtividade de feijão-guandu com o aumento da distância das linhas de árvores (*Azadirachta indica*) em sistema agroflorestal. Os autores atribuíram o menor crescimento e rendimento de feijão-guandu próximo às linhas das árvores (2 a 7,4 m) devido possivelmente ao maior sombreamento e competição. A partir de 12,8 m, Honnayya et al. (2020) não observaram interferência das árvores no desenvolvimento do feijão-guandu no sistema integrado avaliado. No presente estudo, a produtividade efetiva de massa seca de feijão-guandu obtida na distância de 8 m foi 195,08%, 64,26% e 53,62% superior à produtividade observada nas distâncias de 2 m, 4 m e 6 m, respectivamente, considerando a média dos sistemas IPF1 e IPF2. A maior produtividade obtida aos 8 m de distância das linhas de plantio de eucalipto ocorreu possivelmente devido à redução do sombreamento e da competição com as árvores nesta distância.

De acordo com Khalid et al. (2019), a disponibilidade adequada de luz solar sobre o dossel da cultura aumenta a produção de carboidratos para utilização nos processos bioquímicos e fisiológicos, resultando em maior acúmulo de biomassa. Manoj et al. (2021) relataram que a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pelas folhas é um processo importante para a produção de biomassa e também verificaram que a redução da luminosidade resultou em menor rendimento de biomassa em feijão-guandu.

Foi observado que a introdução do capim-buffel no sistema (IPF2) influenciou apenas no diâmetro do caule e no número de hastes, não alterando as demais variáveis de crescimento e produção (Figura 6; Tabela 4). Tal resultado mostrou que a associação com o capim resultou em uma baixa competição por umidade, luz, espaço e nutrientes para o feijão-guandu, já que não houve interferência na produtividade da leguminosa (Rajashree et al., 2022). Isso demonstra uma possibilidade de utilização do feijão-guandu em sistemas integrados como estratégia para aumento da produção total de biomassa. Manoj et al. (2021) colocam o feijão-guandu como uma leguminosa com potencial para sistemas consorciados. Além disso, Neres et al. (2012) sugeriram a substituição da adubação nitrogenada pelo consórcio com feijão-guandu em cultivo de gramíneas (Piatã e Tifton 85), pois, apesar de não terem verificado aumento na produção de

massa seca total das associações, o feijão-guandu contribuiu para a redução de custos com fertilizantes nitrogenados e para a produção de forragem com maior valor nutritivo (maiores teores de proteína bruta e menores teores de fibra em detergente neutro).

O feijão-guandu pode estabelecer associação simbiótica com rizóbios para realização de fixação biológica de nitrogênio que é capaz de suprir sua demanda por nitrogênio para crescimento e produção (Rufini et al., 2016; Degefu et al. 2018; Araújo et al., 2020). Rufini et al. (2016) observaram 29 e 38 nódulos e 0,36 e 0,35 g de massa seca de nódulos em feijão-guandu inoculado com cepas BR2003 e BR 2801 de *Bradyrhizobium* (cepas de referência aprovadas como inoculante para feijão-guandu), respectivamente, em vasos contendo Latossolo. O número e massa seca de nódulos máximos observados por Rufini et al (2016) foram de 71 nódulos (inoculação com a cepa UFLA 04-212) e 0,439 g de massa seca de nódulos ((inoculação com a cepa UFLA 03-320). Os autores concluíram, em experimento de campo, que as linhagens testadas, exceto a BR 2003, foram eficazes na fixação de N₂ e permitiram o crescimento do feijão-guandu.

No presente estudo, 72,25, 85,13, 59,25 e 39,25 nódulos planta⁻¹ e 0,40, 0,62, 0,43 e 0,32 g planta⁻¹ de massa seca de nódulos foram obtidos nas distâncias de 2, 4, 6 e 8 m das linhas das árvores, respectivamente, indicando que os rizóbios nativos, já que não foi realizada inoculação, podem ter promovido uma fixação eficiente nos diferentes tratamentos avaliados. Além disso, a área de estudo pode conter rizóbios com potencial para desenvolvimento de futuros inoculantes. Araújo et al. (2020) observaram que a população nativa de rizóbios apresentou desempenho semelhante ao obtido com adubação com 210 kg ha⁻¹. Degefu et al. (2018) relataram rizóbios nodulantes em feijão-guandu fenotipicamente diversos e simbioticamente eficazes.

De modo geral, foi observada redução nas variáveis de nodulação na distância de 8 metros das linhas de plantio das árvores, que pode estar associada a menor competição por nitrogênio devido a menor influência das árvores neste local. Jensen et al. (2020) relataram que a competição por nitrogênio em consórcios estimula uma maior a fixação biológica de nitrogênio em leguminosas. Adicionalmente, Morgado e Willey (2003) reportaram aumento do número de nódulos com o aumento da população de plantas em consórcio de milho e feijão.

A variável carbono consumido foi inferior no sistema IPF1, enquanto o carbono interno foi superior neste sistema. Já a condutância estomática não apresentou diferença entre os sistemas IPF1 e IPF2 (Figura 7). Em relação às distâncias avaliadas, foi observado aumento no carbono consumido com o distanciamento das árvores (6 e 8 m), enquanto o carbono interno reduziu com o distanciamento. A condutância estomática também aumentou nos locais mais distantes das árvores (4, 6 e 8 m), apresentando menor valor na distância de 2 m das linhas de plantio de eucalipto.

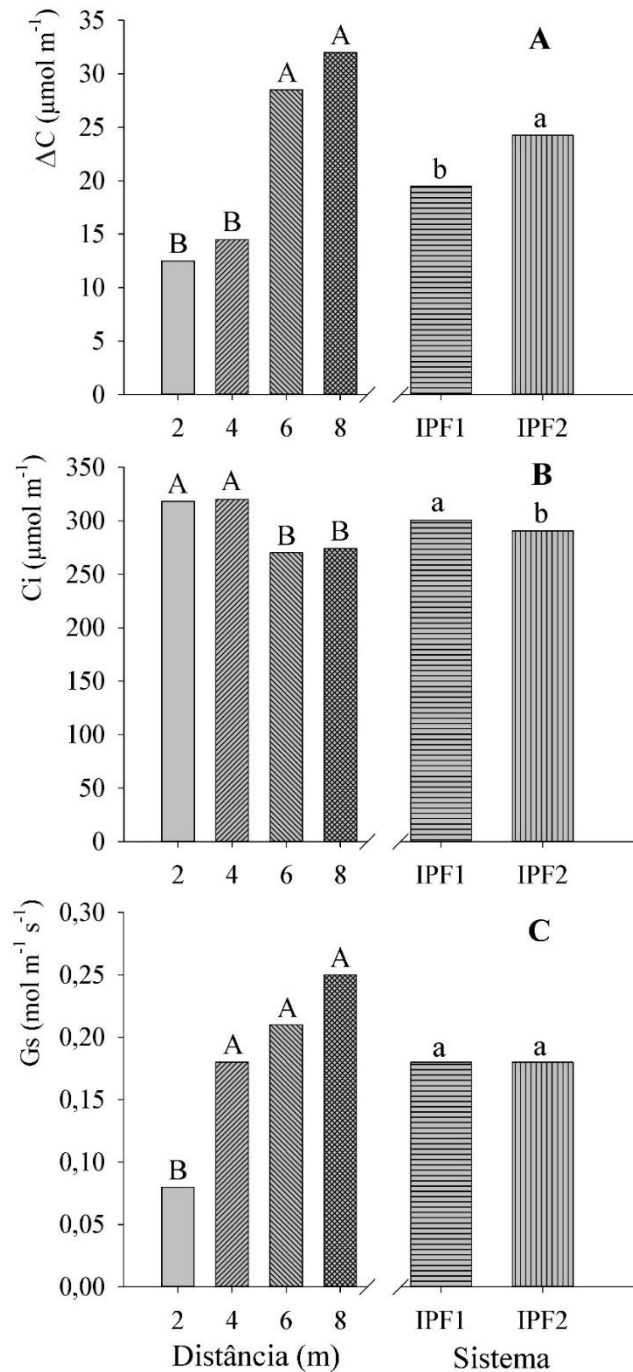


FIGURA 7 CO_2 consumido (ΔC) (A), Carbono interno (C_i) (B) e condutância estomática (G_s) (C) de feijão-gandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto. IPF1: consórcio entre feijão-gandu e eucalipto. IPF2: consórcio entre feijão-gandu, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para distâncias e minúsculas para sistemas, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Foram verificadas reduções na taxa transpiratória (6 e 8 m) e na taxa fotossintética (6 m) no sistema IPF1 (Tabela 5), quando comparadas com o sistema IPF2. Em relação às distâncias, de forma geral, a taxa transpiratória e a taxa fotossintética foram inferiores nos locais mais próximos às árvores, aumentando nos pontos mais distantes das linhas de plantio.

TABELA 5 Taxa transpiratória (E) e taxa fotossintética (A) de feijão-guandu em sistemas silvipastoris (IPF1 e IPF2) em diferentes distâncias das linhas de plantio de eucalipto.

Sistema	Distância (m)			
	2	4	6	8
	E (mol H ₂ O m ² s ⁻¹)			
IPF1	0,84 aB	1,97 aA	1,89 bA	1,95 bA
IPF2	0,85 aC	1,21 aB	2,34 aA	2,21 aA
	A (μmol m ⁻² s ⁻¹)			
IPF1	3,37 aC	7,84 aB	6,56 bB	11,23 aA
IPF2	4,53 aB	5,01 bB	11,96 aA	10,81 aA

IPF1: consórcio entre feijão-guandu e eucalipto. IPF2: consórcio entre feijão-guandu, capim-buffel e eucalipto. Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

As reduções na taxa transpiratória (6 e 8 m) e na taxa fotossintética (6 m) no sistema IPF1 (Tabela 5), quando comparadas com o sistema IPF2, assim como a redução no carbono consumido e o aumento do carbono interno no sistema IPF1 (Figura 7) ocorreram possivelmente devido à presença isolada de plantas daninhas remanescentes entre as capinas realizadas, ocasionando sombreamento. Redução da taxa fotossintética na distância de 4 m também foi observada no sistema IPF2 ao comparar com o sistema IPF1, que também pode ter sido ocasionada pelo sombreamento decorrente da presença isolada de plantas daninhas, já que o capim-buffel apresenta altura inferior ao feijão-guandu.

Os resultados das variáveis fisiológicas avaliados no feijão-guandu, nos diferentes tratamentos estudados, estão de acordo com outros estudos com leguminosas encontrados na literatura, que mostraram redução do carbono interno e aumento nas variáveis CO₂ consumido, taxa transpiratória, condutância estomática e taxa fotossintética com o distanciamento das árvores (menor sombreamento). Fan et al. (2019) constataram redução da taxa fotossintética em plantas de soja sob sombreamento (consórcio milho e soja), enquanto o carbono interno aumentou. Khalid et al. (2019) observaram que a disponibilidade ideal de luz (pleno sol ou sombreamento de até 25%) proporcionou maior taxa fotossintética e transpiratória em soja. Mwamlima et al. (2020) relataram redução da taxa fotossintética, transpiração e da condutância estomática em soja consorciada com milho. De acordo com Mwamlima et al. (2020), a redução da luminosidade sobre o dossel e conseqüente redução da interceptação da radiação fotossinteticamente ativa contribuiu para diminuição da condutância estomática, limitando a captura de dióxido de carbono para a fotossíntese.

No presente estudo, a maior disponibilidade de luz favoreceu a atividade fotossintética do feijão-guandu, contribuindo para o crescimento e produção da leguminosa, já que os maiores índices de crescimento e produtividade coincidiram, de modo geral, com a melhoria da atividade fotossintética. Khalid et al. (2019) também verificaram que a maior disponibilidade de luz favoreceu a taxa fotossintética e melhorou o desenvolvimento e produção de soja. A redução da taxa fotossintética diminuiu a produção de fotoassimilados necessários para o crescimento e produtividade das plantas (Mwamlima et al., 2020).

O capim-buffel (IPF2) não alterou as variáveis fisiológicas do feijão-guandu, já que a gramínea

apresenta altura inferior ao feijão-guandu. As variáveis fisiológicas foram influenciadas apenas pelo componente arbóreo. Em consórcio, as plantas de menor porte têm o crescimento prejudicado pela competição com as plantas mais altas devido ao sombreamento gerado (Fan et al., 2019). Dessa forma, o plantio de feijão-guandu em sistemas integrados com árvores deve ser planejado visando a redução do sombreamento e da competição, já que os resultados mostraram, que a leguminosa avaliada pode ter seu crescimento, produção e fisiologia prejudicados quando consorciada com eucalipto. Contudo, mesmo ocorrendo diminuição da produtividade do feijão-guandu em consórcio, o rendimento combinado da cultura principal com as demais espécies consorciadas geralmente são significativamente elevados e justificam a consorciação (Rajashree et al., 2022). Além disso, o plantio de árvores no sentido leste-oeste, a distância de plantio entre as árvores e a cultura, a poda de árvores e a época adequada de plantio nas entrelinhas são fatores importantes para aumentar a luminosidade e o desempenho de feijão-guandu em sistema agroflorestal (Honnayya et al., 2020). Práticas como poda e plantio das árvores no sentido leste-oeste foram adotadas no presente estudo, que podem ter contribuído no crescimento e desenvolvimento das culturas no sub-bosque.

Apesar da redução da produtividade efetiva de massa seca do feijão-guandu próximo às linhas de plantio de eucalipto, a produtividade média foi de 4.756,63 e 4.873,51 kg ha⁻¹ nos sistemas IPF1 e IPF2, respectivamente. Calvo et al. (2010) obtiveram 3278 kg ha⁻¹ de produtividade de fitomassa seca de feijão-guandu anão aos 90 dias após a semeadura em monocultivo, em Argissolo Vermelho, na região sudeste do Brasil. Cavalcante et al. (2012) encontraram produtividade de 4000 kg ha⁻¹ de matéria seca de feijão-guandu anão solteiro com 92 dias de plantio, em Argissolo Vermelho, na região nordeste do Brasil. Na região sul do Brasil, Neres et al. (2012) relataram 3412 kg ha⁻¹ de massa seca de feijão-guandu (cv. Super N) em Latossolo Vermelho, também em monocultivo. Com isso, foi possível inferir que, mesmo em sistema integrado, foi obtida alta produtividade efetiva de matéria seca de feijão-guandu no presente trabalho, indicando alta viabilidade de produção de matéria seca da leguminosa nos diferentes sistemas integrados avaliados.

4.1.4 CONCLUSÕES

A nodulação no feijão-caupi não foi influenciada pelos sistemas e distâncias, enquanto no feijão-guandu ocorreu redução do número e da massa seca de nódulos com o distanciamento das árvores.

Observou-se maior crescimento, produção de biomassa e atividade fotossintética de feijão-caupi e feijão-guandu com o aumento do distanciamento das linhas de plantio de eucalipto. Contudo, o feijão-caupi apresentou aumento no peso de 100 grãos nas distâncias de 2 e 4 m das linhas de eucalipto, contribuindo para a melhoria da qualidade dos grãos próximo às árvores.

O cultivo simultâneo com capim-buffel não alterou a produtividade das leguminosas, viabilizando maior diversificação e aumento na produção total de biomassa do consórcio.

4.1.5 REFERÊNCIAS

Abera, G., & Gerkabo, H. (2021). Effects of green manure legumes and their termination time on yield of maize and soil chemical properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(3), 397-409. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1733536>

Alam, B., Singh, R., Uthappa, A. R., Chaturvedi, M., Singh, A. K., Newaj, R., ... & Chaturvedi, O. P. (2018). Different genotypes of *Dalbergia sissoo* trees modified microclimate dynamics differently on understory crop cowpea (*Vigna unguiculata*) as assessed through ecophysiological and spectral traits in agroforestry

system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.031>

Angadi, S. V., Umesh, M. R., Begna, S., & Gowda, P. (2022). Light interception, agronomic performance, and nutritive quality of annual forage legumes as affected by shade. *Field Crops Research*, 275, 108358. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108358>

Araujo, J., Díaz-Alcántara, C. A., Urbano, B., & González-Andrés, F. (2020). Inoculation with native *Bradyrhizobium* strains formulated with biochar as carrier improves the performance of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.). *European Journal of Agronomy*, 113, 125985. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125985>

Ayalew, T., Yoseph, T., Högy, P., & Cadisch, G. (2022). Leaf growth, gas exchange and assimilation performance of cowpea varieties in response to *Bradyrhizobium* inoculation. *Heliyon*, e08746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08746>

Boukar, O., Belko, N., Chamarthi, S., Togola, A., Batieno, J., Owusu, E., ... & Fatokun, C. (2019). Cowpea (*Vigna unguiculata*): Genetics, genomics and breeding. *Plant Breeding*, 138(4), 415-424. <https://doi.org/10.1111/pbr.12589>

Calvo, C. L., Foloni, J. S. S., & Brancalião, S. R. (2010). Produtividade de fitomassa e relação C/N de monocultivos e consórcios de guandu-anão, milheto e sorgo em três épocas de corte. *Bragantia*, 69, 77-86. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000100011>

Carvalho, M., Lino-Neto, T., Rosa, E., & Carnide, V. (2017). Cowpea: a legume crop for a challenging environment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(13), 4273-4284. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8250>

Cavalcante, V. S., Santos, V. R., Santos Neto, A. L. D., Dos Santos, M. A., Santos, C. G. D., & Costa, L. C. (2012). Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(5), 521-528. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500008>

Coelho, D. S., Marques, M. A. D., da Silva, J. A. B., da Silva Garrido, M., & de Carvalho, P. G. S. (2014). Respostas fisiológicas em variedades de feijão caupi submetidas a diferentes níveis de sombreamento. *Revista Brasileira de Biociências*, 12(1), 14.

Correia, A. J., Nóbrega, R. S. A., Oliveira, A. S., Santana, W. S., da Silva Braulio, C., de Oliveira, M. S., ... & dos Santos, A. R. (2021). Productivity and growth in cowpea inoculated with rhizobia under different light environments. *Bioscience Journal*, 37(e37057), 1981-3163. <https://doi.org/10.14393/BJ-v37n0a2021-51542>

Cotrim, M. F., Gava, R., Campos, C. N. S., de David, C. H. O., Reis, I. D. A., Teodoro, L. P. R., & Teodoro, P. E. (2021). Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(1), 34-43. <https://doi.org/10.1111/jac.12448>

Degefu, T., Wolde-meskel, E., Adem, M., Fikre, A., Amede, T., & Ojiewo, C. O. (2018). Morphophysiological diversity of rhizobia nodulating pigeon pea (*Cajanus cajan* L. Millsp.) growing in Ethiopia. *African Journal of Biotechnology*, 17(6), 167-177. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB2017.16338>

Fan, Y., Chen, J., Wang, Z., Tan, T., Li, S., Li, J., ... & Yang, F. (2019). Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seedlings response to shading: leaf structure, photosynthesis and proteomic analysis. *BMC plant biology*, 19(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1633-1>

Freire Filho, F.R., Lima, J.A.A., & Ribeiro, V.Q. (2005). *Feijão-caupi: avanços tecnológicos*. Embrapa Informação Tecnológica.

Honnayya, Chittapur, B.M., Doddabasawa (2020). Productivity of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millsp.) in neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) based agroforestry system on Alfisols in semi arid tropics. *Agroforestry Systems*, 94(5), 1879-1889. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00507-4>

Instituto Nacional de Meteorologia (2022) BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Available at <http://www.inmet.gov.br/portal/>. [Accessed 30 January 2022]

- Iqbal, M. A., Siddiqui, M. H., Afzal, S., Ahmad, Z., Maqsood, Q., & Dildar Khan, R. (2018). Forage productivity of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] cultivars improves by optimization of spatial arrangements. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 9(2), 203-219. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i2.4335>
- Jensen, E. S., Carlsson, G., & Hauggaard-Nielsen, H. (2020). Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>
- Jumrani, K., & Bhatia, V. S. (2020). Influence of different light intensities on specific leaf weight, stomatal density photosynthesis and seed yield in soybean. *Plant Physiology Reports*, 25(2), 277-283. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00508-6>
- Kebede, E., & Bekeko, Z. (2020). Expounding the production and importance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1769805. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1769805>
- Khalid, M., Raza, M., Yu, H., Sun, F., Zhang, Y., Lu, F., ... & Li, W. C. (2019). Effect of shade treatments on morphology, photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybeans (*Glycine max* L. Merr.). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 2551-2569. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_25512569
- Lobato, S. M. D. S., dos Santos, L. R., da Silva, B. R. S., Melo, W. D. O., & Lobato, A. K. D. S. (2020). Protective mechanism triggered by pigeonpea plants exposed to water deficit: modifications linked to paraheliotropism, stomatal characteristics and antioxidant enzymes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(1), 20-36. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10077-5>
- Manoj, K. N., Umesh, M. R., Ananda, N., & Duttarganvi, S. (2021). Effects of low light intensity on radiation use efficiency and productivity of tropical pulses. *Journal of Agrometeorology*, 23(3), 249-256. <https://doi.org/10.54386/jam.v23i3.19>
- Miano, A. C., Carvalho, G. R. D., Sabadoti, V. D., Anjos, C. B. P. D., Godoy, R., & Augusto, P. E. D. (2020). Evaluating new lines of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) as a human food source. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), e14517. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14517>
- Morgado, L. B., & Willey, R. W. (2003). Effects of plant population and nitrogen fertilizer on yield and efficiency of maize-bean intercropping. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(11), 1257-1264. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001100002>
- Musokwa, M., & Mafongoya, P. (2020). Pigeonpea Yield and Water Use Efficiency: A Savior under Climate Change-Induced Water Stress. *Agronomy*, 11(1), 5. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010005>
- Mwamlima, L. H., Cheruiyot, E. K., & Ouma, J. P. (2020). Reduced stomatal conductance and irradiance account for soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] yield decline in maize-soybean intercrop. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*, 24(01), 1977-1989. <https://doi.org/10.18801/jbar.240120.242>
- Namatsheve, T., Cardinael, R., Corbeels, M., & Chikowo, R. (2020). Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(4), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00629-0>
- Namatsheve, T., Chikowo, R., Corbeels, M., Mouquet-Rivier, C., Icard-Vernière, C., & Cardinael, R. (2021). Maize-cowpea intercropping as an ecological intensification option for low input systems in sub-humid Zimbabwe: Productivity, biological N₂-fixation and grain mineral content. *Field Crops Research*, 263, 108052. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108052>
- Neres, M. A., Castagnara, D. D., Silva, F. B., Oliveira, P. S. R. D., Mesquita, E. E., Bernardi, T. C., ... & Vogt, A. S. L. (2012). Características produtivas, estruturais e bromatológicas dos capins Tifton 85 e Piatã e do feijão-guandu cv. Super N, em cultivo singular ou em associação. *Ciência Rural*, 42(5), 862-869. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000500017>
- Oliveira, L. B. D., Barros, R. L. N., Magalhães, W. B. D., Medici, L. O., & Pimentel, C. (2017). Cowpea growth and yield in sole crop and intercropped with millet. *Revista Caatinga*, 30, 53-58.

<https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n106rc>

R Core Team. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing (software). Version 3.6.2. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Rajashree, Dodamani, B. M., Rathod, P. S., Patil, D. H., & Amaregouda, A. (2022). Influence of different fodder crops on yield and yield parameters of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) under intercropping systems. *The Pharma Innovation Journal*, 11(1), 1573-1576.

Razouk, R., Daoui, K., Ramdani, A., & Chergaoui, A. (2016). Optimal distance between olive trees and annual crops in rainfed intercropping system in northern Morocco. *Journal of Crop Science Research*, 1(1), 23-32.

Rufini, M., Oliveira, D. P., Trochmann, A., Soares, B. L., Andrade, M. J. B. D., & Moreira, F. M. D. S. (2016). *Bradyrhizobium* spp. strains in symbiosis with Pigeon pea cv. Fava-Larga under greenhouse and field conditions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0160156. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160156>

Santos, E. R., Borges, P. R. S., Siebeneichler, S. C., Cerqueira, A. P., & Pereira, P. R. (2011). Crescimento e teores de pigmentos foliares em feijão-caupi cultivado sob dois ambientes de luminosidade. *Revista Caatinga*, 24(4), 14-19.

Silva, J. A. N., Ceccon, G., Rocha, E. C., & de Souza, C. M. A. (2016). Produtividade de feijão-caupi e braquiária com inoculação nas sementes, em cultivo solteiro e consorciado. *Agrarian*, 9(31), 44-46.

Silva, L. S., Laroca, J. V. S., Coelho, A. P., Gonçalves, E. C., Gomes, R. P., Pacheco, L. P., ... & Systems, R. I. G. P. C. L. (2022). Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? *Applied Soil Ecology*, 170, 104257. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104257>

Sindhu, M., Kumar, A., Yadav, H., Chaudhary, D., Jaiwal, R., & Jaiwal, P. K. (2019). Current advances and future directions in genetic enhancement of a climate resilient food legume crop, cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 139(3), 429-453. <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01695-3>

Surki, A. A., Nazari, M., Fallah, S., Iranipour, R., & Mousavi, A. (2020). The competitive effect of almond trees on light and nutrients absorption, crop growth rate, and the yield in almond–cereal agroforestry systems in semi-arid regions. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1111-1122. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00469-2>

Teodoro, M. S., Castro, K. N. D. C., & Magalhaes, J. A. (2018). Assessment of legumes with potential use as green manure in the coastal tablelands of Piauí State, Brazil. *Revista Caatinga*, 31, 584-592. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n306rc>

Wen, B. X., Hussain, S., Yang, J. Y., Shan, W. A. N. G., Zhang, Y., Qin, S. S., ... & Liu, W. G. (2020). Rejuvenating soybean (*Glycine max* L.) growth and development through slight shading stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(10), 2439-2450. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63159-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63159-8)

Zilli, J. É., Silva Neto, M. L. D., França Júnior, I., Perin, L., & Melo, A. R. D. (2011). Resposta do feijão-caupi à inoculação com estirpes de *Bradyrhizobium* recomendadas para a soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(3), 739-742. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300009>

4.2 Artigo 2 – A mudança do uso da terra para sistemas integrados de produção eleva os estoques de carbono do solo no bioma Cerrado.

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico Acta Scientiarum. Agronomy.

A mudança do uso da terra para sistemas integrados de produção eleva os estoques de carbono do solo no bioma Cerrado

RESUMO. Sistemas integrados de produção agropecuária podem elevar os estoques carbono orgânico do solo ao longo do tempo e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas. Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar os estoques e as taxas de acúmulo de carbono (COT) e nitrogênio total (NT) do solo e a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) após a transição de pastagem de baixa produtividade em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) em experimento de campo de longa duração no bioma Cerrado. Os tratamentos foram: eucalipto e capim-buffel (E+B); eucalipto e feijão-caupi (E+C); eucalipto e feijão-guandu (E+G); eucalipto, capim-buffel e feijão-caupi (E+B+C); eucalipto, capim-buffel e feijão-guandu (E+B+G); eucalipto (Euc), também com arranjo 20 x 3 m, porém sem cultivo nas entrelinhas, mas com histórico de produção de forrageiras e culturas de grãos; e uma pastagem de baixa produtividade (Test) como tratamento adicional e referência a condição do solo anteriormente a mudança do uso da terra. Foram determinados os teores, estoques e acúmulo de COT e NT, carbono lábil (CL) e não lábil (CNL) e frações húmicas da MOS nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 0-40 cm de profundidade. Os sistemas integrados elevaram os teores e estoques de COT e NT, de CNL e carbono nas frações químicas da MOS em todas as profundidades e apresentaram acúmulo de 5,22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 0,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de COT e NT, respectivamente, na camada de 0-40 cm. A integração de eucalipto com leguminosas ou capim-buffel aumentou o teor de CL na camada superficial do solo. A transição de pastagem de baixa produtividade em sistemas integrados promoveu a recuperação do conteúdo e da qualidade da MOS e indicou a ILPF como prática de uso sustentável da terra no bioma Cerrado.

Palavras-chave: agrossilvipastoril; carbono lábil; substâncias húmicas; matéria orgânica do solo; leguminosas; capim-buffel.

4.2.1 INTRODUÇÃO

A falta de práticas de manejo adequadas em pastagens contribui para a perda de matéria orgânica do solo (MOS), aumentando a emissão de carbono para a atmosfera (Tadini et al., 2021b). Usos da terra que aumentem o conteúdo de carbono orgânico e reduzam a sua emissão devem ser implementados visando o controle dos impactos negativos das mudanças climáticas (Toru & Kibret, 2019). A conversão de pastagens de baixa produtividade em sistemas integrados de produção favorece o acúmulo de carbono no solo (Frazão et al., 2021).

Sistemas integrados apresentam características de sistemas conservacionistas e contribuem com o sequestro de CO₂ (Yadav et al., 2021). Possibilitam o aumento da biodiversidade (Freitas et al., 2020), fornecimento de biomassa, além de maior volume radicular (Cunha et al., 2020), permitindo a melhoria da fertilidade do solo, do armazenamento de MOS, aumento da qualidade biológica (Damian et al., 2021) e física do solo (Muchane et al., 2020).

A MOS e suas frações (carbono lábil, substâncias húmicas) têm sido estudadas em diferentes sistemas de uso e manejo da terra. O carbono orgânico do solo (COT) é um importante indicador de recuperação de ecossistemas (Gomes et al., 2021) e apresenta correlação positiva com a fertilidade do solo (Tadini et al., 2021b). O carbono lábil (CL) é um indicador sensível e representativo da dinâmica e qualidade da MOS, compreende compostos lábeis utilizados por microrganismos como fonte de energia (Ndzelu et al., 2020) e pode, com isso, ser facilmente decomposto e perdido (Santos et al., 2019). Gomes et al. (2021) relataram aumento no conteúdo de CL em sistemas agroflorestais devido a maior diversidade de espécies e da deposição frequente de resíduos vegetais.

O estudo das substâncias húmicas também apresenta alta relevância, pois o carbono se torna sequestrado por meio de humificação em moléculas e/ou complexos recalcitrantes, processo que reduz a decomposição da MOS e a emissão de CO₂ (Tadini et al., 2021a). O fracionamento químico das substâncias húmicas permite inferir sobre o grau de humificação e estabilidade da MOS (Ramos et al., 2020). O aumento de frações mais recalcitrantes indica maior estabilização do carbono no solo, atendendo pressupostos da agricultura de baixo carbono, conforme verificado em sistemas integrados avaliados por Coser et al. (2018).

É importante destacar, contudo, que podem ocorrer variações no conteúdo de MOS entre sistemas integrados devido a diferenças existentes em propriedades como, precipitação, aporte de serapilheira, biomassa radicular, taxa de decomposição, espécies de plantas, características edafoclimáticas, composição química da serapilheira, entre outros fatores (Yadav et al., 2021). Além disso, apesar de observar que sistemas integrados de produção podem promover aumento nos estoques de COT do solo em curto prazo, Almeida et al. (2021) reportaram que o monitoramento de longo prazo é necessário. Ma et al. (2020) relataram que o tempo de implementação é um fator importante na recuperação e acúmulo de carbono no solo.

Neste contexto, mais experimentos incorporando diferentes modelos de sistemas integrados de produção devem ser realizados para validação dos acúmulos e melhoria da qualidade da MOS. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os estoques e as taxas de acúmulo de carbono e nitrogênio total do solo e a qualidade da MOS após 11 anos da conversão de pastagem de baixa produtividade para sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) no bioma Cerrado.

4.2.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

Os sistemas integrados de produção foram implantados em 2009 na Fazenda Experimental Hamilton de Abreu Navarro (16°40'03"S, 43°50'41"O, 598 m de altitude), localizada no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, no município de Montes Claros, Minas Gerais, Brasil. A área está no bioma Cerrado (*stricto sensu*) e apresenta relevo levemente ondulado. O clima é tropical de savana (Aw segundo classificação de Köppen), com verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual no período que abrangeu as avaliações deste estudo foi de 923 mm, com temperatura média de 24,9°C (Instituto Nacional de Meteorologia, 2022). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, sendo as características químicas e físicas apresentadas na tabela 01.

Tabela 01. Caracterização física e química do solo¹ das áreas experimentais na profundidade de 0-20 cm.

Atributo	Área experimental	
	ILPF	Test
pH em água	6,50	5,00
P Mehlich (mg dm ⁻³)	17,52	7,70
P remanescente (mg L ⁻¹)	39,00	39,50
K (mg dm ⁻³)	217,00	231,80
Ca (cmol _c dm ⁻³)	7,60	8,30
Mg (cmol _c dm ⁻³)	3,28	3,32
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,08	2,29
Soma de Bases (cmol _c dm ⁻³)	11,44	12,21
Capacidade Efetiva de Troca de Cátions (cmol _c dm ⁻³)	11,44	12,21
Saturação por Alumínio (%)	0,00	0,00
Capacidade Potencial de Troca de Cátions (cmol _c dm ⁻³)	13,52	14,50
Saturação por Bases (%)	84,61	84,21
Carbono Orgânico (g kg ⁻¹)	20,37	5,67
Areia (g kg ⁻¹)	38,00	34,00
Silte (g kg ⁻¹)	32,00	26,00
Argila (g kg ⁻¹)	30,00	40,00
Densidade (g cm ⁻³)	1,41	1,78

¹Coletado em agosto de 2019. ILPF: sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta; Test: pastagem de baixa produtividade utilizada como referência ao estágio anterior a implantação do sistema integrado.

4.2.2.2 Histórico da área de estudo

A área de ILPF (6900 m²) foi implantada em 2009 sobre pastagem de baixa produtividade, identificada como Test no presente estudo. A pastagem de baixa produtividade (sem manejo definido, presença de plantas daninhas e solo exposto e mistura de espécies de capim) está inserida em área com histórico de cultivo de hortaliças e milho irrigados, onde a retirada da vegetação nativa ocorreu em 1971. O componente arbóreo é o híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*). Ao longo dos anos

foram realizados desbastes de árvores e linhas de plantio para redução do sombreamento nas entrelinhas, resultando no arranjo de 20 x 3 m (166 árvores ha⁻¹). Desde a implantação, foram combinadas espécies forrageiras e culturas de grãos, em consórcio e/ou sucessão, conforme descrito na tabela 02. Práticas de manejo e culturas estudadas neste sistema foram descritas em Santana et al. (2016), Rodrigues et al. (2017), Souza et al. (2018) e Frazão et al. (2021).

Tabela 02. Histórico de espécies forrageiras e culturas de grãos cultivadas com eucalipto em área experimental de integração lavoura-pecuária-floresta localizada em Montes Claros - MG, Brasil.

Período (ano)	Espécie	Uso/Manejo
2009 a 2011	<i>Sorghum bicolor</i> ; <i>Urochloa decumbens</i> ; <i>Vigna unguiculata</i> ; <i>Andropogom gayanus</i> ; <i>Canavalia ensiformis</i> ; <i>Urochloa brizantha</i> ; e <i>Panicum maximum</i> .	Produção de forragem e grãos.
2012 a 2016	Forrageiras remanescentes de cultivos anteriores.	Nenhuma intervenção ou manejo.
2016 a 2018	<i>Urochloa decumbens</i> ; <i>Urochloa brizantha</i> ; <i>Megathyrsus maximus</i> ; <i>Cajanus cajan</i> ; e <i>Phaseolus vulgaris</i> .	Produção de forragem e grãos.
2019 a 2020	<i>Cajanus cajan</i> ; <i>Vigna unguiculata</i> ; e <i>Cenchrus ciliaris</i> .	Produção de forragem e grãos.

Em dezembro de 2019, foi realizado o plantio de feijão-guandu, feijão-caupi e capim-buffel entre as linhas de eucalipto, quando o sistema integrado apresentava 11 anos de idade. Também foram feitos consórcios entre feijão-guandu com capim-buffel e feijão-caupi com capim-buffel entre as linhas de plantio de eucalipto. Para a implantação dos sistemas integrados citados, realizou-se a dessecação de espécies remanescentes de cultivos anteriores (predomínio de *Brachiaria* sp) com Glifosato Atanor® (4,0 L ha⁻¹). O solo foi preparado para plantio (gradagem) e, em seguida, foi realizada a adubação de plantio com a aplicação 20 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e, 25 dias após a semeadura (DAS), foram aplicados 20 kg ha⁻¹ de K₂O e 20 kg ha⁻¹ de N.

O feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp., cv. Iapar 43/Aratã) foi semeado visando um estande final de 10 plantas m⁻¹, com 1 m de espaçamento entre linhas, e o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp., cv. BRS Potengi) com 8 plantas m⁻¹ e 0,5 m entre linhas. Para a semeadura do capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L., cv. Aridus), foram utilizados 35 kg ha⁻¹ de sementes (2 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis), em linhas espaçadas por 0,5 m de distância. A semeadura das parcelas com consórcio entre as leguminosas e o capim-buffel seguiu os mesmos espaçamentos e população de plantas utilizados nas parcelas onde não houve consórcio.

O feijão-caupi foi manejado visando a produção de grãos, enquanto o feijão-guandu e o capim-buffel foi utilizado para produção de forragem. A colheita dos grãos de feijão-caupi foi realizada com aproximadamente 75 DAS. O corte do feijão-guandu foi realizado 150 DAS, enquanto o capim-buffel

permaneceu na área após a produção das leguminosas.

4.2.2.3 Desenho experimental e tratamentos

O experimento foi implantado em delineamento em blocos casualizados (DBC), com 4 repetições e 7 tratamentos, sendo eles: eucalipto e capim-buffel (E+B); eucalipto e feijão-caupi (E+C); eucalipto e feijão-guandu (E+G); eucalipto, capim-buffel e feijão-caupi (E+B+C); eucalipto, capim-buffel e feijão-guandu (E+B+G); eucalipto (Euc), também com arranjo 20 x 3 m, porém sem cultivo nas entrelinhas, mas com histórico de cultivos de forrageiras e culturas de grãos, sendo as plantas daninhas roçadas periodicamente; e pastagem de baixa produtividade (Test), tratamento adicional descrito no subtópico anterior. O arranjo do eucalipto foi de 20 x 3 m, sendo as unidades experimentais alocadas entre as linhas das árvores, com dimensão de 10 x 3 m (30 m²), respeitando 1 m de distância das linhas de eucalipto.

4.2.2.4 Amostragem de solo

A coleta de solo para avaliação da densidade e da MOS foi realizada em maio de 2020, aos 165 DAS das leguminosas e do capim-buffel, quando o sistema integrado apresentava 11 anos de idade. As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade em trincheiras distribuídas aleatoriamente no tratamento Test (tratamento adicional) e, nos sistemas de integrados, ao longo do transecto entre as linhas de plantio do eucalipto, nas distâncias de 2, 4, 6 e 8 m das árvores. As diferentes distâncias (amostras simples) foram utilizadas para obtenção de amostras compostas. Portanto, cada amostra composta de solo (repetição) foi formada pela mistura de 4 subamostras individuais. Após a coleta em campo, as amostras foram secas ao ar, passadas em peneiras de 2 mm e, em seguida, foram retirados os resíduos vegetais restantes.

4.2.2.5 Análises laboratoriais

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (Blake e Hartge, 1986). O COT foi quantificado por oxidação via úmida com dicromato de potássio (Yeomans & Bremner, 1988) e o NT a partir de digestão sulfúrica, conforme método Kjeldhal (Bremner & Mulvaney, 1982; Tedesco et al., 1995). Em seguida, foi calculada a relação C/N e os estoques de COT e NT. Os estoques (Mg ha⁻¹) foram obtidos a partir da multiplicação do teor de COT ou NT (%), pela densidade do solo (g cm⁻³), pela espessura da camada de solo desejada (cm). As taxas anuais de acúmulo de COT e NT foram obtidas por meio da subtração das médias dos estoques de COT e NT de todos sistemas integrados estudados pelos estoques do sistema Test (tratamento adicional), divididos pelo tempo de implantação de 11 anos.

O CL foi determinado por meio de oxidação com permanganato de potássio (KMnO₄) 0,033 mol L⁻¹, sendo a quantificação feita por colorimetria a partir de leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda em 565 nm (Blair et al., 1995; Shang & Tiessen, 1997). O CNL correspondeu ao carbono não oxidado por KMnO₄ e foi obtido, portanto, pela diferença entre o COT e CL.

Foi realizado o fracionamento químico da MOS para separação das frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM), a partir de diferenças de solubilidade em meio ácido e alcalino, conforme método da Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas, descrito por Swift (1996). Os teores de carbono em cada fração foram quantificados por oxidação via úmida com dicromato de potássio (Yeomans & Bremner, 1988). Em seguida, foram calculadas as relações C-AH/C-AF e EA/HUM. O extrato

alcalino (EA), correspondeu a soma das frações C-AF e C-AH.

4.2.2.6 Análise estatística

Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para verificar a ocorrência de distribuições normais e o teste de Bartlett para constatar a homogeneidade de variâncias. A partir da validação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, foi realizada a análise de variância e aplicado o teste de ScottKnott ao nível de 5% de significância para comparações entre os sistemas integrados e, entre os sistemas integrados e o tratamento adicional (Test), foi aplicado teste de Dunnett ($p \leq 0.05$). Os valores obtidos ao longo do perfil do solo (0-40 cm de profundidade) foram submetidos à análise de componentes principais (ACP) visando sintetizar a variação multidimensional dos dados. Anteriormente a realização da ACP, foi feita a padronização dos dados. A análise estatística foi realizada com o software R, versão 3.6.2.

4.2.3 RESULTADOS

4.2.3.1 Armazenamento de carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) e relação C/N do solo

Os sistemas integrados de produção elevaram os teores de COT em todas as profundidades de solo ($p < 0.05$). Foi possível observar aumento de até 211,56% na profundidade de 0-40 cm entre os sistemas Test e E+B (Figura 01. A). Não houve variação no teor de COT entre os sistemas integrados para as camadas de solo avaliadas.

O teor de NT também foi afetado pelo uso do solo ($p < 0.05$). Os sistemas integrados contribuíram com o aumento do teor de NT em todas as profundidades, já os menores valores foram obtidos no Test (Figura 01. B). Considerando o perfil de solo avaliado (0-40 cm), o sistema E+B apresentou teor de NT de $1,67 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto no Test foi verificado teor de $0,87 \text{ g kg}^{-1}$, representando um aumento de 91,95%. Não foram observadas diferenças no teor de NT entre os sistemas integrados.

A relação C/N foi menor no sistema Test em todas as profundidades ($p < 0.05$). Os sistemas integrados apresentaram relação C/N semelhantes entre si (Figura 01. C). Considerando a camada de 0-40 cm, a relação C/N variou de 6,89 (Test) a 11,90 (E+B+G).

Os estoques de COT e NT foram alterados pela mudança do uso da terra ($p < 0.05$). Os sistemas integrados apresentaram estoques superiores ao Test em todas as profundidades avaliadas. Os estoques totais de COT (0-40 cm) variaram de 43,63 a $107,51 \text{ Mg ha}^{-1}$ nos sistemas Test e Euc, respectivamente, aumentando o estoque em 146,41% após 11 anos da mudança do uso da terra (Figura 01. D). Não foram constatadas diferenças entre os estoques de COT dos sistemas integrados, que somaram valores entre 98,01 a $107,51 \text{ Mg ha}^{-1}$.

O sistema Test apresentou estoques de NT inferiores aos sistemas integrados nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-40 cm de profundidades (Figura 01. E). Foram observados estoques totais (0-40 cm) de NT de $6,28 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob Test até $9,35 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob Euc. Os estoques de NT não variaram entre os sistemas integrados, sendo verificados valores entre 8,38 a $9,35 \text{ Mg ha}^{-1}$.

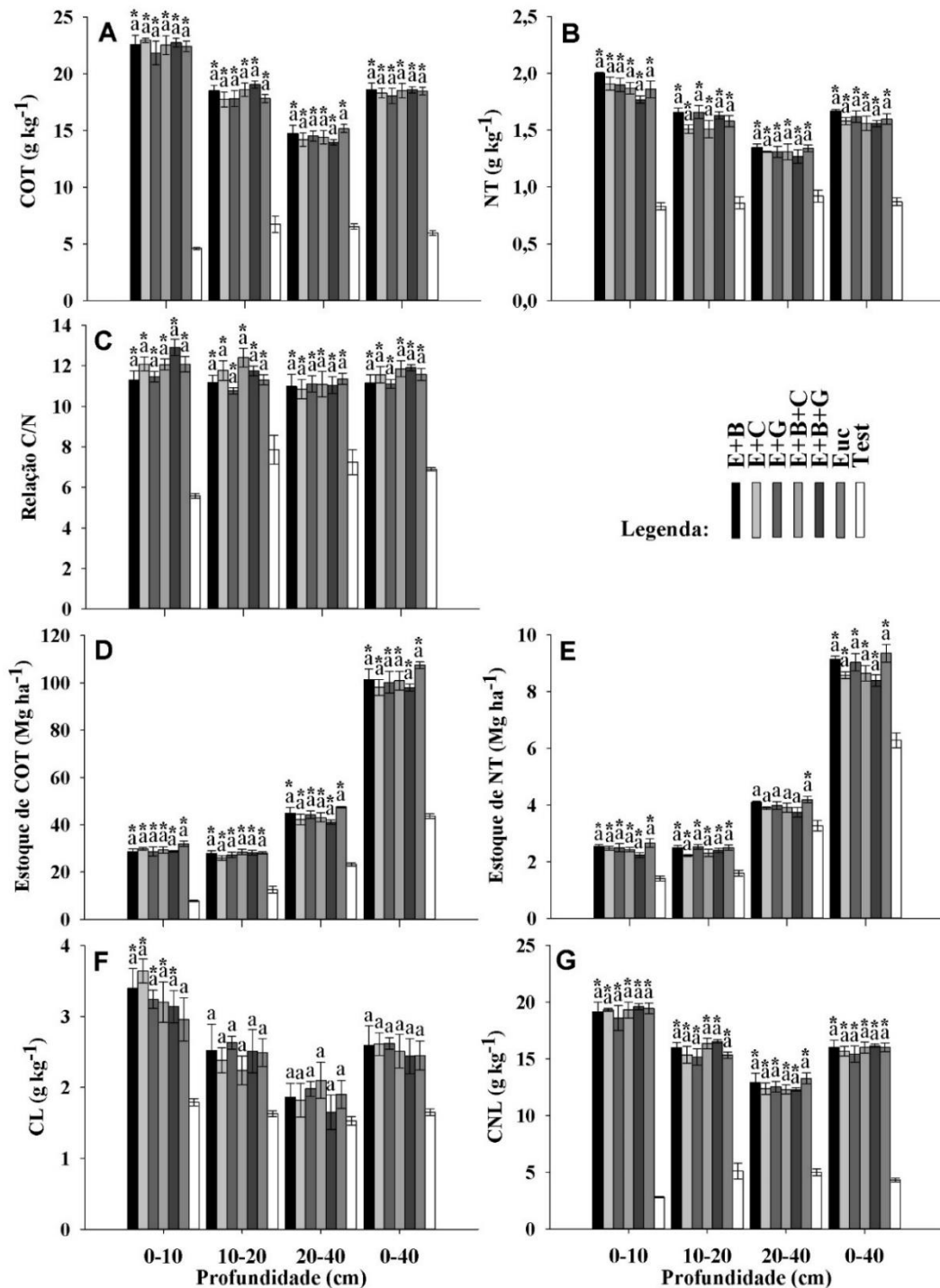


Figura 01. Carbono orgânico total (COT) (A), nitrogênio total (NT) (B), relação C/N (C), estoque de COT (D) e NT (E), carbono lábil (CL) (F) e não lábil (CNL) (G) do solo em diferentes sistemas de uso da terra no bioma Cerrado.

Médias seguidas pela mesma letra, entre os sistemas integrados e para uma mesma profundidade, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0.05$). Barras com *, em uma mesma profundidade, apresentam diferença em relação à média do tratamento adicional (Test) pelo teste de Dunnett ($p \leq 0.05$).

Elevado potencial de acúmulo de COT e NT foram obtidos com a implantação dos sistemas integrados sobre a área de pastagem de baixa produtividade (Tabela 03). As taxas de acúmulo de COT foram de 1,97, 1,37 e 5,22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, somando 5,22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-40 cm de profundidade.

Tabela 03. Taxa de acúmulo de COT e NT do solo em sistemas ILPF com 11 anos de implantação no bioma Cerrado.

Camada (cm)	*Taxa de acúmulo (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	
	COT	NT
0-10	1,97	0,10
10-20	1,37	0,07
20-40	1,87	0,06
0-40	5,22	0,23

*Obtido a partir da subtração dos estoques de COT dos sistemas integrados pelos estoques do tratamento adicional (Test), considerando o tempo de implantação de 11 anos para obtenção da taxa anual.

As taxas de acúmulo de NT foram de 0,10, 0,07 e 0,06 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, somando 0,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-40 cm de profundidade.

4.2.3.2 Carbono lábil (CL) e não lábil (CNL)

Foi observada variação no teor de CL e CNL entre os sistemas de uso da terra ($p < 0.05$). O sistema Test apresentou valor de CL semelhante ao Euc e inferior aos demais sistemas na camada superficial (0-10 cm) (Figura 01. F). O teor de CL foi semelhante entre o Test e os sistemas integrados nas demais profundidades (10-20, 20-30 e 0-40 cm), variando de 1,65 (Test) a 2,62 g kg⁻¹ (E+G) no perfil (0-40 cm). Foram obtidos teores de CL semelhantes entre os sistemas integrados em todas as profundidades.

O teor de CNL foi inferior no Test em todas as profundidades (Figura 01. G). Os valores de CNL foram de 4,32 (Test) até 16,14 g kg⁻¹ (E+B+G) na camada de 0-40 cm, variação que representou aumento de 273,61% com a implantação dos sistemas integrados de produção. Teores semelhantes de CNL foram observados entre os sistemas integrados.

4.2.3.3 Carbono nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM)

O teor de carbono orgânico do solo nas frações C-AF, C-AH e C-HUM foi superior nos sistemas integrados ($p < 0.05$). Valores de 0,23 até 1,52 g kg⁻¹ de C-AF foram obtidos, respectivamente, nos sistemas Teste e E+G (0-40 cm) (Tabela 04). Para esta mesma camada, o teor de C-AH ficou, respectivamente, entre 1,16 e 4,38 g kg⁻¹ nos sistemas Test e E+B+C, enquanto o C-HUM apresentou teor de 5,38 g kg⁻¹ sob Test e 13,49 g kg⁻¹ sob E+B+G.

Tabela 04. Carbono nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM) e relação C-AH/C-AF e ¹EA/C-HUM em diferentes sistemas de uso da terra no bioma Cerrado.

Camada (cm)	Sistema						Test	CV %
	E+B	E+C	E+G	E+B+C	E+B+G	Euc		
C-AF (g kg ⁻¹)								
0-10	1,98a*	1,72a*	1,97a*	1,65a*	1,83a*	1,55a*	0,28	14,70
10-20	1,30a*	1,25a*	1,48a*	1,23a*	1,17a*	1,13a*	0,20	16,18
20-40	1,07a*	0,95a*	1,12a*	0,92a*	0,75a*	0,92a*	0,23	19,34
0-40	1,45a*	1,31b*	1,52a*	1,27b*	1,25b*	1,20b*	0,23	12,24
C-AH (g kg ⁻¹)								
0-10	3,78a*	4,10a*	3,82a*	4,35a*	4,03a*	4,16a*	0,75	16,06
10-20	3,97a*	4,66a*	4,11a*	4,61a*	4,09a*	4,53a*	1,15	19,48
20-40	3,84a*	3,86a*	4,18a*	4,18a*	3,73a*	4,19a*	1,58	20,07
0-40	3,87a*	4,21a*	4,03a*	4,38a*	3,95a*	4,29a*	1,16	16,00
C-HUM (g kg ⁻¹)								
0-10	17,12a*	15,48a*	15,71a*	15,36a*	17,20a*	16,11a*	5,74	10,02
10-20	13,14a*	12,22b*	11,76b*	11,81b*	13,77a*	11,13b*	5,79	10,34
20-40	9,24a*	8,74a*	8,99a*	9,07a*	9,50a*	9,05a*	4,62	14,77
0-40	13,16a*	12,15a*	12,16a*	12,08a*	13,49a*	12,10a*	5,38	8,62
C-AH/C-AF								
0-10	1,94b	2,45a	1,95b	2,67a	2,22b	2,71a	2,79	17,85
10-20	3,03a*	3,78a	2,77a*	3,87a	3,68a	4,16a	5,75	20,19
20-40	3,67a	4,14a	3,93a	4,56a	5,12a	4,72a	7,08	25,51
0-40	2,88a*	3,46a	2,88a*	3,70a	3,67a	3,86a	5,21	16,16
EA/C-HUM								
0-10	0,34a*	0,38a*	0,37a*	0,39a*	0,34a*	0,36a*	0,19	14,91
10-20	0,40a	0,49a*	0,47a	0,50a*	0,39a	0,51a*	0,25	19,45
20-40	0,55a	0,57a	0,60a	0,57a	0,48a	0,57a	0,41	25,39
0-40	0,43a	0,48a	0,48a	0,49a	0,40a	0,48a	0,28	17,01

¹Extrato alcalino (EA) = C-AF + C-AH. Médias seguidas pela mesma letra, na linha, entre os sistemas integrados, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0.05$). Médias seguidas por *, na linha, apresentam diferença em relação à média do tratamento adicional (Test) pelo teste de Dunnett ($p \leq 0.05$).

Em geral, o teor de carbono orgânico do solo nas frações C-AF, C-AH e C-HUM foi semelhante entre os sistemas integrados (Tabela 04). Foram observadas diferenças no teor de C-AF apenas na profundidade de 0-40 cm, tendo os sistemas E+B e E+G apresentado teores superiores. Quanto ao teor de C-HUM, os sistemas E+B e E+B+G apresentaram maiores valores na camada de 10-20 cm.

As relações C-AH/C-AF e EA/C-HUM também foram alteradas pelos sistemas de uso da terra ($p < 0.05$). Os sistemas E+B e E+G apresentaram relação C-AH/C-AF inferior ao Test nas camadas de 10-

20 e 0-40 cm de profundidade (Tabela 04). Entre os sistemas integrados, a relação C-AH/C-AF, na camada superficial (0-10 cm), foi maior nos tratamentos E+C, E+B+C e Euc e menor em E+B, E+G e E+B+G.

A relação EA/C-HUM foi menor no Test na profundidade de 0-10 cm e, na camada de 10-20 cm, o Test apresentou relação inferior aos sistemas E+C, E+B+C, e Euc (Tabela 04). A relação EA/C-HUM foi semelhante entre os sistemas integrados, com valores entre 0,40 e 0,48 (0-40 cm).

4.2.3.4 Estatística multivariada

A análise de componentes principais dos atributos estudados mostrou os dois primeiros componentes principais (PCA 1 e PCA 2) explicando 99,95% da variabilidade total dos dados para o perfil de solo avaliado (0-40 cm). O PCA 1 correspondeu a 99,69% e o PCA 2 a 0,26% da variabilidade total dos dados (Figura 02).

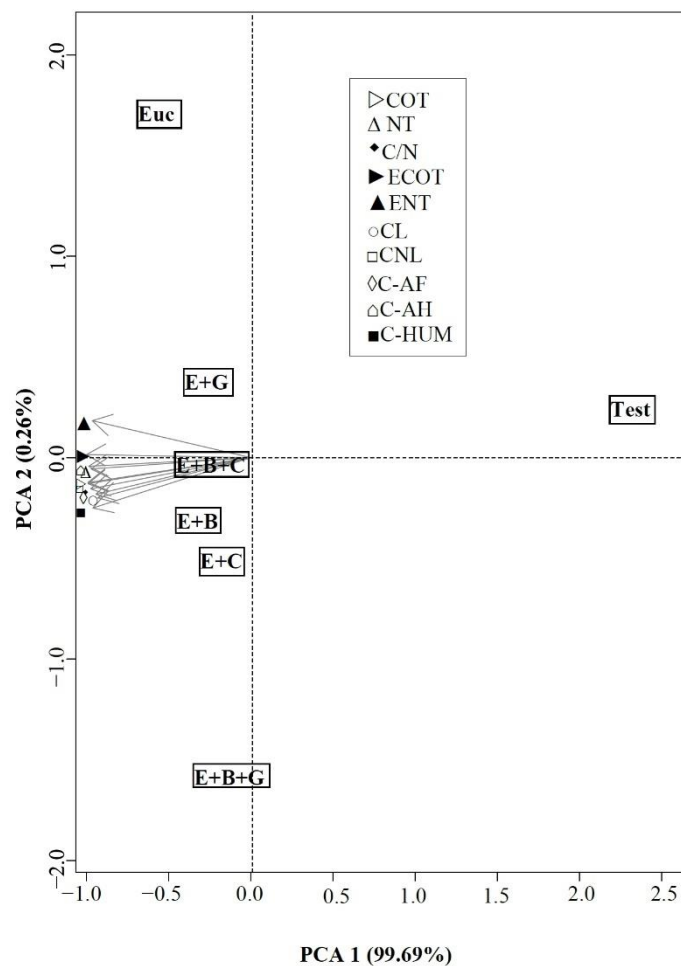


Figura 02. Análise de componentes principais (PCA) para atributos da matéria orgânica do solo de diferentes sistemas de uso da terra no bioma Cerrado.

Atributos: teores e estoques de carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) do solo, relação carbono/nitrogênio (C/N), teores de carbono lábil (CL) e não lábil (CNL) e das frações ácido fúlvico (C-AF), húmico (C-AH) e humina (C-HUM).

Todas as variáveis estudadas explicaram fortemente a variação dos dados para o PCA1, enquanto as variáveis CL, C-AF, C-HUM e estoque de NT apresentaram maior influência na ordenação dos

agrupamentos no PCA 2 (Figura 02). Todas as variáveis estudadas foram negativamente relacionadas com o PCA 1. Em relação ao PCA 2, os atributos estoque de COT e NT do solo apresentaram coeficientes positivos, enquanto as demais variáveis foram negativamente relacionadas com este eixo.

A análise de componentes principais mostrou, portanto, que os valores dos atributos COT, NT, relação C/N, CL, CNL, C-AF, C-AH, C-HUM, estoques de COT e NT aumentaram da direita para a esquerda em relação ao PCA 1 (Figura 02). Esses resultados indicaram que a transição de pastagem de baixa produtividade em sistemas integrados promoveu a recuperação da qualidade do solo e indicou os sistemas integrados como prática de uso sustentável da terra.

4.2.4 DISCUSSÃO

A hipótese de que a transição de pastagem de baixa produtividade em sistemas integrados de produção agropecuária pode promover aumentos significativos no conteúdo de matéria orgânica do solo, foi confirmada no presente estudo. Os teores, estoques e taxas de acúmulo de COT e NT, teores de CL, CNL e COT das frações C-AF, C-AH e C-HUM foram, de modo geral, superiores nos sistemas integrados.

4.2.4.1 Armazenamento de carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) e relação C/N do solo

A mudança do uso da terra para sistemas integrados possibilitou aumentos significativos no conteúdo de COT e NT do solo (Figura 01. A, B, D e E; Figura 02), demonstrando que sistemas agrossilvipastoris podem fornecer benefícios significativos de adaptação e mitigação às mudanças climáticas (Muchane et al., 2020) e na qualidade do solo. Pastagens manejadas incorretamente podem diminuir os estoques de COT do solo (Tadini et al., 2021b). Isso acarreta a liberação de carbono para a atmosfera (Frazão et al., 2021). Porém, a implantação de sistemas integrados de produção pode aumentar o conteúdo de COT e NT do solo (Freitas et al., 2020; Yadav et al., 2021). De acordo com Ma et al. (2020), a agrossilvicultura consiste em uma estratégia geralmente eficaz para aumentar o armazenamento de COT regiões tropicais.

Araújo et al. (2020) verificaram aumento no teor de MOS em sistema de ILPF no primeiro ano de condução no bioma Cerrado. Corroborando com os resultados apresentados por Araújo et al. (2020), Freitas et al. (2020) relataram recuperação dos estoques de COT e NT após três anos de condução de sistemas agrossilvipastoris na mesma área experimental. Almeida et al. (2021) observaram aumento nos estoques de COT e NT do solo após quatro anos de implantação de sistemas silvipastoris em áreas de pastagens degradadas também localizadas no Cerrado brasileiro. Frazão et al. (2021) concluíram, a partir de sistemas agrossilviculturais com 8 anos de idade, que a introdução de sistemas integrados no Cerrado brasileiro aumenta os estoques de COT do solo em comparação a áreas de pastagem de baixa produtividade.

O presente estudo, baseado sistemas integrados com histórico de 11 anos de condução no bioma Cerrado, também mostrou que os sistemas integrados de produção apresentam elevado potencial de recuperação dos estoques de COT e NT do solo, indicando sustentabilidade de produção e melhoria da qualidade do solo.

Siqueira et al. (2019) reportaram acúmulo de 2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de COT em sistema agroflorestal na camada de 0-20 cm, em Argissolo degradado, após 5 anos de implantação, que foi atribuído ao aporte de biomassa vegetal na superfície do solo. Coser et al. (2018) observaram acúmulo de 6,14 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de

COT, na profundidade de 0-40 cm, após 28 meses da conversão de pastagem de baixa produtividade em sistema agrossilvicultural no bioma Cerrado. No presente estudo, acúmulo de $5,22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi observado após 11 anos da conversão de pastagem degradada em sistemas integrados de produção na camada de 0-40 de profundidade.

Práticas como semeadura direta, cultivo de culturas forrageiras anuais nos primeiros anos de implantação, manejo adequado do capim e das árvores em sistemas integrados contribuem para aumentar os teores de COT e NT do solo (Almeida et al., 2021). Os autores relataram que a menor mobilização do solo no plantio de sorgo nos anos iniciais do sistema integrado de produção, a boa cobertura do solo e a alta taxa de renovação radicular do capim utilizado, assim como o aporte de serapilheira gerado pelo eucalipto, intensificado pela realização de podas, resultaram em aumentos nos teores de COT e NT do solo após a conversão de áreas de pastagens de baixa produtividade em sistemas integrados. Práticas semelhantes também foram realizadas no presente estudo.

O eucalipto pode contribuir com o aumento dos teores de COT do solo, com maior intensidade próximo às linhas de plantio das árvores, devido a maior deposição de resíduos sobre o solo e abaixo da superfície, como exsudados de folhas e raízes, folhas, flores, sementes, caules e raízes (Abreu et al., 2020). Além disso, o eucalipto produz resíduos de forma contínua durante seu ciclo, contribuindo para o aumento do COT (Cunha et al., 2020). Toru e Kibret (2019) recomendam o cultivo de plantas perenes lenhosas em sistemas conservacionistas visando o aumento do sequestro de carbono. Assim, a produção de serapilheira de eucalipto ao longo dos anos contribuiu para a recuperação do conteúdo de COT e NT perdido no sistema Test deste estudo.

A associação de mais espécies em sistemas ILPF e a presença de pastagens de gramíneas, que desenvolvem um sistema radicular denso e abrangem grande volume de solo, melhoram os níveis de MOS (Araújo et al., 2020). Os altos teores de COT obtidos em sistemas integrados podem ser resultado de elevados aportes de resíduos orgânicos de eucalipto e gramíneas (Cunha et al., 2020). Os autores relataram que além de denso, o sistema radicular das gramíneas é constituído principalmente por raízes finas que apresentam rápida decomposição, elevando o conteúdo de carbono orgânico do solo. Dessa forma, o histórico de cultivo de gramíneas (em todos os tratamentos utilizados) e o capim-buffel presente nos sistemas integrados estudados (E+B, E+B+C e E+B+G) contribuíram para a recuperação dos teores e estoques de COT e para um significativo acúmulo de COT.

Os sistemas integrados que não foram cultivados com espécies fixadoras de nitrogênio (E+B e Euc), no momento das coletas para avaliação da dinâmica da MOS, apresentaram teores e estoques de COT e NT do solo semelhantes aos que continham essas espécies (E+C, E+G, E+B+C, E+B+G). Segundo Wu et al. (2020), o aumento da produção de biomassa de plantas pode promover aumento dos teores de COT e NT do solo mesmo em sistemas integrados que não possuem plantas fixadoras de nitrogênio. Além disso, as práticas de adubações realizadas ao longo dos anos podem ter favorecido, principalmente, os resultados semelhantes observados em relação ao NT do solo.

Abreu et al. (2020) e Almeida et al. (2021) reportaram valores de relação C/N que variaram de 10,98 a 14,94 e 10,36 a 14,85, respectivamente, em estudos envolvendo sistemas integrados no bioma Cerrado. Corroborando com os autores, os valores obtidos no presente estudo variaram de 10,76 a 12,91 nos sistemas ILPF, enquanto no tratamento Test foram observadas relações C/N entre 5,57 e 7,85 (Figura 01. C). De acordo com Wang et al (2018), a relação C/N é alterada pelos diferentes tipos de uso da terra.

Razões C/N próximas a 10 e 12 são consideradas normais em solos minerais (Toru & Kibret, 2019). A diminuição da relação C/N indica avanço no processo de mineralização e humificação da MOS e redução do conteúdo de MOS particulada e de resíduos vegetais primários que possuem ampla razão C/N (Chen et al., 2017), afirmações que estão de acordo com os menores teores de CL encontrados no sistema Test (Figura 01. F) decorrentes do baixo aporte de material orgânico fresco neste local.

4.2.4.2 Carbono lábil (CL) e não lábil (CNL)

Os sistemas integrados E+B, E+C, E+G, E+B+C e E+B+G apresentaram maiores teores de CL na camada superficial do solo em relação ao tratamento Test (Figura 01. F). Apesar dos valores de CL semelhantes ($p > 0.05$) entre os sistemas Euc e Test na profundidade de 0-10 cm, foi observado um aumento de 65,36% no sistema Euc. Para as demais camadas de solo avaliadas, foram verificados ganhos no conteúdo de CL de até 61,34% (E+G na profundidade de 10-20 cm), 37,25% (E+B+C na profundidade de 10-20 cm) e de 58,79% (E+G na camada de 0-40 cm) com a conversão de Test em sistemas integrados. As variações no teor de CL ocorreram devido a mudança do uso da terra e práticas de manejo que alteram a entrada de matéria orgânica (Gomes et al., 2021), confirmando que o CL é sensível às mudanças no conteúdo de MOS do solo e sua dinâmica pode ser utilizada para inferir sobre a qualidade da MOS (Ndzelu et al., 2020), já que consiste em uma fração que pode ser facilmente perdida por decomposição (Santos et al., 2019).

Gomes et al. (2021) relataram aumento de 26% no conteúdo de carbono lábil em sistemas agroflorestais quando comparados a monoculturas, resultado da diversidade de espécies e da deposição frequente de resíduos vegetais nestes sistemas. No presente estudo, foram observados aumentos de até 103,35%, 61,34% e 35,25% de CL nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, comparando os sistemas integrados com o tratamento Test.

A significativa redução dos níveis de CL no sistema Test, principalmente na camada superficial, indicou escassez na entrada de biomassa e avanço no estágio de degradação do solo. Já nos sistemas integrados, a maior deposição de serapilheira e volume de raízes promoveu ganhos significativos de CL ao longo dos anos, principalmente na profundidade de 0-10 cm. Li et al. (2019) observaram aumento nos teores de carbono oxidado por permanganato de potássio em manejo com retorno de resíduos de cultura ao solo e Ma et al. (2021) reportaram que raízes residuais da cultura e seus exudatos elevam os teores deste indicador de qualidade do solo.

O CL é representado por compostos orgânicos de menor recalcitrância que podem ser utilizados por microrganismos como fonte de energia (Ndzelu et al., 2020). Huang et al (2021) relataram a amida, polissacarídeos e carboidratos dentre os constituintes lábeis do carbono oxidado por permanganato de potássio. Segundo Coser et al. (2018), a diversificação e o aumento na entrada de resíduos vegetais, resultantes da implantação de sistemas integrados no Cerrado, podem proporcionar acúmulo de MOS em frações lábeis e recalcitrantes em curto prazo. De acordo com os autores, aumentos de ambas as frações intensifica a disponibilização de nutrientes, devido a maior disponibilidade de frações lábeis para mineralização, e possibilita maior estocagem de COT, por meio dos maiores níveis de frações mais recalcitrantes e estáveis da MOS, permitindo atender princípios da agricultura sustentável. No presente estudo, aumentos nos teores de CL e CNL foram alcançados com a introdução e condução dos sistemas integrados, permitindo inferir que atenderam pressupostos da agricultura sustentável.

De acordo com Tadini et al. (2021b), a MOS com grupos mais recalcitrantes geralmente possui maior tempo de permanência no solo, que impede uma rápida decomposição e liberação de CO₂ para a atmosfera, possibilitando uma contribuição de longo prazo para a mitigação das mudanças climáticas. Portanto, os acréscimos observados nos teores de CNL nos sistemas integrados do presente estudo indicaram aumento do conteúdo de MOS de maior estabilidade e vida útil (Figura 01. G), sugerindo esses sistemas como estratégias para a mitigação das mudanças climáticas. Segundo Tadini et al (2021a), o carbono é sequestrado por meio de humificação em moléculas e/ou complexos recalcitrantes. De acordo com Bieluczyk et al. (2020), a consorciação de espécies com diferentes volumes e arquitetura radicular contribui para a melhoria da estrutura do solo e favorece uma maior estabilização do carbono no solo.

4.2.4.3 Carbono nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM)

O fracionamento químico da MOS mostrou maior parte do COT protegido na fração mais estável e recalcitrante (C-HUM), independente do sistema e da profundidade do solo (Tabela 04), corroborando com outros estudos realizados (Freitas et al., 2020; Almeida et al., 2021; Frazão et al., 2021). A fração C-HUM compreende compostos de maior peso molecular, menor número de grupamentos carboxílicos e maior de grupamentos nitrogenados, o que confere maior estabilidade e tempo de permanência no solo (Pfleger et al., 2017), permitindo que maior parte de COT seja armazenado nesta fração. Coser et al. (2018) também relacionaram este armazenamento à formação de complexos coloidais húmus-argila.

O teor de carbono orgânico do solo nas frações C-AF, C-AH e C-HUM foi superior nos sistemas integrados, quando comparados ao tratamento Test em todas as profundidades avaliadas (Tabela 04). De maneira semelhante, Coser et al. (2018) também obtiveram aumento em todas as frações húmicas do solo com a implantação de sistemas integrados de produção sobre pastagem de baixa produtividade em região de Cerrado. De acordo com Bai et al. (2020), mudanças na cobertura vegetal do solo alteram significativamente o equilíbrio entre a entrada e saída de carbono do solo, que influenciam no conteúdo total e nas frações da MOS. A diversificação e o alto aporte de resíduos vegetais podem promover acúmulo de MOS lábil e de frações estáveis (Coser et al., 2018; Damian et al., 2021; Frazão et al., 2021).

Alterações entre os sistemas integrados também foram observadas, indicando que as frações da MOS apresentam sensibilidade às alterações de manejo e uso da terra (Ramos et al, 2020). Maiores teores de C-AF foram encontrados em E+B e E+G, considerando a profundidade de 0-40 cm. O aumento dos teores de C-AF nos sistemas E+B e E+G pode ter levado à diminuição da relação C-AH/C-AF em E+B e E+G na camada de 0-10 cm de profundidade (Tabela 04). Menor relação C-AH/C-AF entre os sistemas integrados também foi observada em E+B+G para esta mesma profundidade, permitindo inferir que os sistemas integrados citados contribuíram para aumentar as concentrações de C-AF. Foi observado que os tratamentos com feijão-guandu possibilitaram boa cobertura do solo e produção de biomassa, que resultaram em aportes positivos de resíduos vegetais.

Corroborando com os resultados obtidos, Ramos et al. (2020) também identificaram que o feijão-guandu contribui para aumentar o teor de C-AF do solo no Cerrado. Conforme Segnini et al. (2013), pode ocorrer aumento no conteúdo de compostos de estruturas menos recalcitrantes quando o aporte de resíduos vegetais supera a capacidade de metabolização dos microrganismos. Caso contrário, apenas estruturas mais recalcitrantes da MOS tendem a permanecer. Bordonal et al. (2017) relataram diminuição do índice de humificação (aumento de estruturas menos recalcitrantes) a partir de maiores entradas de

carbono.

Já o capim-buffel, nos tratamentos E+B e E+B+G, pode ter contribuído com o aumento do teor de C-AF devido a maior produção de raízes finas. O sistema radicular das gramíneas é denso e formado principalmente por raízes finas, de mais fácil decomposição, contribuindo para aumentar o armazenamento de MOS (Cunha et al., 2020). Bia et al. (2020) também verificaram que a restauração de pastagens aumentou os teores de ácido fúlvico do solo e observaram correlação com a maior produção de biomassa radicular. No entanto, o capim-buffel não apresentou desenvolvimento satisfatório no tratamento em que foi consorciado com feijão-caupi (E+B+C), já que a cultivar utilizada apresenta crescimento indeterminado e porte semiereto (Silva et al., 2016) e, por consequência, resultou em maior competição por luz.

Aumento na fração mais recalcitrante (C-HUM) também foi observado em E+B e E+B+G na camada de 10-20 cm de profundidade entre os sistemas integrados (Tabela 04). Portanto, entre os sistemas integrados, E+B e E+B+G apresentaram maior contribuição no aumento de diferentes frações da MOS, de menor e maior recalcitrância (C-AF e C-HUM). De acordo com Nath et al. (2018), a composição química da espécie cultivada influencia na labilidade da MOS e aumentos nas concentrações de frações lábeis e recalcitrantes indicam estado de equilíbrio sob uso da terra. Frazão et al. (2021) também observaram aumento do C-HUM em sistema integrado com eucalipto e feijão-guandu no bioma Cerrado e indicaram que aumentos na fração mais humificada da MOS pode levar ao sequestro de carbono ao longo do tempo.

Os aumentos no C-HUM verificados nos sistemas E+B e E+B+G podem estar relacionados à composição química e a produção de biomassa radicular das forrageiras cultivadas, principalmente do capim-buffel, já que E+G não acompanhou os aumentos observados no teor de C-HUM (10-20 cm) entre os sistemas integrados citados. Bia et al. (2020) relataram que as frações estáveis da MOS são derivadas principalmente de materiais resistentes a decomposição, como a lignina e a celulose. Jalota et al. (2006) apresentaram teor de 14% de lignina em raízes de capim-buffel, enquanto outras espécies estudadas, como *Medicago sativa* e *Triticum aestivum*, apresentaram 2,77 e 8,7%, respectivamente. Além disso, Bieluczyk et al. (2020) observaram que a consorciação de espécies com diferentes volumes e arquitetura radicular contribui para a melhoria da estrutura do solo e favorece uma maior estabilização do carbono no solo.

A relação C-AH/C-AF indica o grau de humificação da MOS e a mobilidade do carbono no solo (Ramos et al., 2020) (Tabela 04). Independente do sistema e profundidade, a relação C-AH/C-AF foi maior que 1 (variou de 1,94 a 7,08), indicando predomínio de C-AH. Entre as duas frações (C-AH e C-AF), o C-AH apresenta maior estabilidade, propriedade que geralmente leva a uma maior concentração desta fração, já que o C-AF é mais lábil e mais suscetível a mudanças (Gmach et al., 2018). O C-AF é a fração húmica de menor peso molecular, maior número de grupamentos carboxílicos, maior teor de oxigênio e menor de carbono, propriedades que conferem maior solubilidade e facilidade de dispersão no perfil do solo (Pfleger et al., 2017).

Os sistemas E+B e E+G apresentaram redução da relação C-AH/C-AF em relação ao tratamento Test nas camadas de 10-20 e 0-40 cm de profundidade. Elevado aporte de resíduos vegetais e alta taxa de renovação de raízes finas e posterior decomposição podem explicar aumento em frações mais lábeis da MOS (Pfleger et al., 2017). Já entre os sistemas integrados, foi observada menor relação C-AH/C-AF na camada superficial nos sistemas E+B, E+G e E+B+G, o que pode ser explicado pelo aumento dos

teores de C-AF obtidos ao longo do perfil (0-40 cm) (Tabela 04), já discutidos anteriormente.

A relação EA/C-HUM mostrou alta estabilidade na MOS devido ao predomínio de C-HUM (Santos et al., 2019; Frazão et al., 2021), com valores que variaram de 0,19 a 0,60 (Tabela 04). No entanto, o menor valor da relação EA/C-HUM observado no Test em relação aos sistemas integrados, na camada de 0-10 cm, resultou do baixo aporte de resíduos vegetais ao longo dos anos, que levou à oxidação de compostos de maior labilidade pelos microrganismos, permanecendo principalmente estruturas mais recalcitrantes da MOS (Segnini et al., 2013), o que pode ser apoiado pelas as perdas de carbono verificadas no conteúdo total e nas diferentes frações da MOS deste sistema. Dessa forma, a menor relação EA/C-HUM no tratamento Test não apresentou correlação com uma possível melhoria da qualidade da MOS associada ao aumento da estabilidade.

A relação EA/C-HUM nos sistemas E+C (0,49), E+B+C (0,50) e Euc (0,51) diferiu do Test (0,25) na profundidade de 10-20 cm, possivelmente devido aos menores valores de C-HUM obtidos nesta camada nestes sistemas integrados, já discutidos anteriormente. Na camada subsequente (20-40 cm), os sistemas integrados apresentaram relação EA/C-HUM semelhante ao tratamento Test, que pode ocorrer pela menor influência da cobertura vegetal com o aumento da profundidade (Pfleger et al., 2017).

Não foi observada diferença quanto a relação EA/C-HUM entre os sistemas integrados e, com base nos valores obtidos (<1), foi possível inferir que a integração de diferentes componentes de produção promoveu melhor proteção da MOS (Almeida et al., 2021). Aumento na estabilidade da MOS é importante para atender o princípio da intensificação sustentável da agricultura, pois reduz as emissões de CO₂ e permite maior mitigação das mudanças climáticas (Tadini et al., 2021a; Tadini et al., 2021b).

4.2.4.4 Estatística multivariada

Foi observada relação inversa das variáveis estudadas com o sistema Test (Figura 02), confirmando os resultados da ANOVA que mostraram os sistemas integrados com níveis mais elevados para os atributos avaliados (carbono, nitrogênio e frações da MOS). Em síntese, a estatística multivariada aplicada permitiu observar resultados relevantes que mostram a possibilidade de utilização de sistemas integrados de produção como estratégia de obtenção de acúmulos de COT e NT e melhoria da qualidade da MOS (aumentos em diferentes frações da MOS) em pastagens de baixa produtividade.

Em termos práticos, este estudo indica como produtores e técnicos/extensionistas de campo podem melhorar o uso da terra em condições tropicais, mais especificamente no bioma Cerrado. Além disso, sugere que o desenvolvimento de mais experimentos com sistemas integrados permitiria uma ampla divulgação desse modelo de produção, incentivando a criação de políticas que fomentem a sua utilização por agricultores/produtores como estratégia de recuperação de áreas em processo de degradação e/ou de redução de emissão de gases de efeito estufa.

4.2.5 CONCLUSÕES

Os sistemas integrados elevaram os teores e estoques de COT e NT, teor de CNL e carbono nas frações químicas da MOS em todas as profundidades avaliadas e apresentaram acúmulo de 5,22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 0,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de COT e NT, respectivamente, na camada de 0-40 cm de profundidade. A integração de eucalipto com leguminosas ou capim-buffel aumentou o teor de CL na camada superficial do solo. A transição de pastagem de baixa produtividade em sistemas integrados promoveu a recuperação

do conteúdo e da qualidade da MOS solo e indicou, a partir de experimento de campo de longa duração, a ILPF como prática de uso sustentável da terra no bioma Cerrado.

4.2.6 REFERÊNCIAS

- Abreu, L. H. G., Freitas, I. C., Santana, P. H. L., Barbosa, D. L. A., Santos, L. D. T., Santos, M. V., ... & Frazão, L. A. (2020). Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. *Agroforestry Systems*, 94(6), 2343-2353. DOI: 10.1007/s10457-020-00554-x
- Almeida, L. L.S., Frazão, L. A., Lessa, T. A. M., Fernandes, L. A., Veloso, Á. L. C., Lana, A. M. Q., ... & Ferreira, E. A. (2021). Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, 205, 104785. DOI: 10.1016/j.still.2020.104785
- Araujo, N. C. A., Frazão, L. A., Freitas, I. C., Ferreira, E. A., Freitas, D. A., Santos, M. V., ... & Fernandes, L. A. (2020). Soil chemical and microbiological attributes under integrated production system in Oxisol of degraded pasture. *Australian Journal of Crop Science*, 14(11), 1772-1778. DOI: 10.21475/ajcs.20.14.11.p2535
- Bai, X., Guo, Z., Huang, Y., & An, S. (2020). Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process. *Catena*, 191, 104575. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104575
- Bieluczyk, W., Piccolo, M. C., Pereira, M. G., Moraes, M. T., Soltangheisi, A., Bernardi, A. C. C., ... & Cherubin, M. R. (2020). Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*, 371, 114368. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114368
- Blair, G. J., Lefroy, R. D., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian journal of agricultural research*, 46(7), 1459-1466. DOI: 10.1071/AR9951459
- Bordonal, R. O., Lal, R., Ronquim, C. C., Figueiredo, E. B., Carvalho, J. L. N., Maldonado Jr, W., Milori, D. M. B. P., & La Scala Jr, N. (2017). Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agriculture, ecosystems & environment*, 240, 54-65. DOI: 10.1016/j.agee.2017.02.016
- Bremner, J. M. & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen total. In A. L. PAGE (Ed.), *Methods of soil analysis* (p. 595-624). Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Chen, C., Liu, W., Jiang, X., & Wu, J. (2017). Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. *Geoderma*, 299, 13-24. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.03.021
- Coser, T. R., Figueiredo, C. C., Jovanovic, B., Moreira, T. N., Leite, G. G., Cabral Filho, S. L. S., Kato, E., ... & Marchão, R. L. (2018). Short-term buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. *Agricultural systems*, 166, 184-195. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.01.030
- Cunha, J. R. D., Freitas, R. D. C. A. D., Souza, D. J. D. A. T., Gualberto, A. V. S., Souza, H. A. D., & Leite, L. F. C. (2021). Soil biological attributes in monoculture and integrated systems in the Cerrado region of Piauí State, Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 43, 51814. DOI: 10.4025/actasciagron.v43i1.51814
- Damian, J. M., Matos, E. S., Pedreira, B. C., Carvalho, P. C. F., Souza, A. J., Andreote, F. D., ... & Cerri, C. E. P. (2021). Pastureland intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. *Applied Soil Ecology*, 160, 103858. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103858
- Frazão, L. A., Cardoso, P. H. S., Almeida Neta, M. N., Mota, M. F. C., Almeida, L. L. S., Ribeiro, J. M., ... & Feigl, B. J. (2021). Carbon and nitrogen stocks and organic matter fractions in the topsoil of traditional and agrisilvicultural systems in the Southeast of Brazil. *Soil Research*, 59(8), 794-805. DOI: 10.1071/SR20150
- Freitas, I. C., Ribeiro, J. M., Araújo, N. C. A., Santos, M. V., Sampaio, R. A., Fernandes, L. A., Azevedo, A. M., ... & Frazão, L. A. (2020). Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangeland Ecology & Management*, 73(6), 776-785. DOI: 10.1016/j.rama.2020.08.001
- Gmach, M. R., Dias, B. O., Silva, C. A., Nóbrega, J. C., Lustosa-Filho, J. F., & Siqueira-Neto, M. (2018). Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, 14, e00178. DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.e00178
- Gomes, M. F., Vasconcelos, S. S., Viana-Junior, A. B., Costa, A. N. M., Barros, P. C., Kato, O. R., &

- Castellani, D. C. (2021). Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. *Land Degradation & Development*, 32(15), 4313-4326. DOI: 10.1002/ldr.4038
- Huang, J., Rinnan, Å., Bruun, T. B., Engedal, T., & Bruun, S. (2021). Identifying the fingerprint of permanganate oxidizable carbon as a measure of labile soil organic carbon using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 1–11. DOI: 10.1111/ejss.13085
- Instituto Nacional de Meteorologia (2022) BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Available at <http://www.inmet.gov.br/portal/>. [Accessed 30 January 2022]
- Jalota, R. K., Dalal, R. C., Harms, B. P., Page, K., Mathers, N. J., & Wang, W. J. (2006). Effects of litter and fine root composition on their decomposition in a Rhodic Paleustalf under different land uses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(13-14), 1859-1875. DOI: 10.1080/00103620600767108
- Li, S., Li, X., Zhu, W., Chen, J., Tian, X., & Shi, J. (2019). Does straw return strategy influence soil carbon sequestration and labile fractions? *Agronomy Journal*, 111(2), 897-906. DOI: 10.2134/agnonj2018.08.0484
- Ma, Z., Chen, H. Y., Bork, E. W., Carlyle, C. N., & Chang, S. X. (2020). Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: A global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 29(10), 1817-1828. DOI: 10.1111/geb.13145
- Ma, L., Lv, X., Cao, N., Wang, Z., Zhou, Z., & Meng, Y. (2021). Alterations of soil labile organic carbon fractions and biological properties under different residue-management methods with equivalent carbon input. *Applied Soil Ecology*, 161, 103821. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103821
- Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106899. DOI: 10.1016/j.agee.2020.106899
- Nath, A. J., Brahma, B., Sileshi, G. W., & Das, A. K. (2018). Impact of land use changes on the storage of soil organic carbon in active and recalcitrant pools in a humid tropical region of India. *Science of the total environment*, 624, 908-917. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.199
- Ndzelu, B. S., Dou, S., & Zhang, X. (2020). Corn straw return can increase labile soil organic carbon fractions and improve water-stable aggregates in Haplic Cambisol. *Journal of Arid Land*, 12(6), 1018-1030. DOI: 10.1007/s40333-020-0024-7
- Pfleger, P., Cassol, P. C., & Mafra, Á. L. (2017). Substâncias húmicas em cambissolo sob vegetação natural e plantios de pinus em diferentes idades. *Ciência Florestal*, 27, 807-817. DOI: 10.5902/1980509828631
- Ramos, M. L. G., Silva, V. G. D., Carvalho, A. M. D., Malaquias, J. V., Oliveira, A. D. D., Sousa, T. R. D., & Silva, S. B. (2020). Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, 01743. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01743
- Rodrigues, M. N., Santos, L. D. T., Sampaio, R. A., & Fernandes, L. A. (2017). Soil chemical properties in an integrated crop-livestock-forestry system. *Revista Engenharia na Agricultura-Reveng*, 25(1), 63-73. DOI: 10.13083/reveng.v25i1.695
- Santana, P. H. L., Frazão, L. A., Santos, L. D. F., Fernandes, L. A., & Sampaio, R. A. (2016). Soil attributes and production of Eucalyptus in monoculture and silvopastoral systems in the north of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Agriculture Science Technology B*, 6, 361-370. DOI: 10.17265/2161-6264/2016.06.001
- Santos, U. J., Duda, G. P., Marques, M. C., Medeiros, E. V., Lima, J. R. S., Souza, E. S., ... & Hammecker, C. (2019). Soil organic carbon fractions and humic substances are affected by land uses of Caatinga forest in Brazil. *Arid Land Research and Management*, 33(3), 255-273. DOI: 10.1080/15324982.2018.1555871
- Segnini, A., Carvalho, J. L. N., Bolonhezi, D., Milori, D. M. B. P., Silva, W. T. L. D., Simões, M. L., ... & Martin-Neto, L. (2013). Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. *Scientia Agricola*, 70(5), 321-326. DOI: 10.1590/S0103-90162013000500006
- Shang, C., & Tiessen, H. (1997). Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. *Soil Science*, 162(11), 795-807.
- Silva, A. D., Brito, M. E. B., Frade, L. J. G., Nobre, R. G., Costa, F. B. D., Melo, A. S. D., & Silva, L. D. A. (2016). Crescimento e trocas gasosas de genótipos de feijão-caupi sob estratégias de cultivo. *Revista Ambiente & Água*, 11, 745-758. DOI: 10.4136/ambi-agua.1880
- Siqueira, C. C. Z., Chiba, M. K., Moreira, R. S., & Abdo, M. T. V. N. (2020). Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1059-1069. DOI: 10.1007/s10457-

019-00470-9

- Souza, G. C., Frazão, L. A., Dias, R. F., Lucas, C. D. S. G., Rodrigues, C. H. O., & Camargo, P. B. (2018). Respostas fisiológicas e produtividade de feijoeiro cultivado em sistema silviagrícola com diferentes manejos de adubação. *Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas*, 10(2), 50-67.
- Swift, R. S. (1996). Organic matter characterization. In Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E.. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods* (p. 1001-1069). Madison, WI: Soil Science Society of America Books. DOI:10.2136/sssabookser5.3.c35.
- Tadini, A. M., Martin-Neto, L., Goranov, A. I., Milori, D. M., Bernardi, A. C., Oliveira, P. P., ... & Hatcher, P. G. (2021a). Chemical characteristics of soil organic matter from integrated agricultural systems in southeastern Brazil. *European Journal of Soil Science*, 73(1), 13136. DOI: 10.1111/ejss.13136
- Tadini, A. M., Xavier, A. A., Milori, D. M., Oliveira, P. P., Pezzopane, J. R., Bernardi, A. C., & Martin-Neto, L. (2021b). Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Soil and Tillage Research*, 211, 105001. DOI: 10.1016/j.still.2021.105001
- Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H., & Volkweiss, S. J. (1995). *Análises de solo, plantas e outros materiais* (p. 174). Porto Alegre, RS: UFRGS.
- Toru, T., & Kibret, K. (2019). Carbon stock under major land use/land cover types of Hades sub-watershed, eastern Ethiopia. *Carbon balance and management*, 14(7), 1-14. DOI: 10.1186/s13021-019-0122-z
- Wang, S., Adhikari, K., Wang, Q., Jin, X., & Li, H. (2018). Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon (C), nitrogen (N), and C: N ratio from the northeastern coastal agroecosystems in China. *Ecological Indicators*, 84, 263-272. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.08.046
- Wu, J., Zeng, H., Zhao, F., Chen, C., Liu, W., Yang, B., & Zhang, W. (2020). Recognizing the role of plant species composition in the modification of soil nutrients and water in rubber agroforestry systems. *Science of The Total Environment*, 723, 138042. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138042
- Yadav, G. S., Kandpal, B. K., Das, A., Babu, S., Mohapatra, K. P., Devi, A. G., Chandra, P., ... & Barman, K. K. (2021). Impact of 28 year old agroforestry systems on soil carbon dynamics in Eastern Himalayas. *Journal of Environmental Management*, 283, 111978. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111978
- Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in soil science and plant analysis*, 19(13), 1467-1476.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O consórcio com capim-buffel não afetou a nodulação das leguminosas cultivadas em sistemas integrados de produção com eucalipto. No entanto, com o distanciamento das árvores, foram observadas reduções no número de nódulos e na massa seca de nódulos. O cultivo simultâneo com capim-buffel também não alterou a produtividade das leguminosas, viabilizando maior diversificação e aumento na produção total de biomassa dos consórcios.

O distanciamento das linhas de plantio de eucalipto permitiu maior crescimento, produção de biomassa e atividade fotossintética do feijão-caupi e do feijão-guandu, contudo foi observada produtividade média satisfatória ao longo do transecto avaliado entre as árvores. Além disso, o feijão-caupi apresentou aumento no peso de 100 grãos nas distâncias de 2 e 4 m das árvores, sugerindo melhoria da qualidade dos grãos próximo ao eucalipto.

A transição de pastagem de baixa produtividade em sistemas integrados elevou os teores e estoques de carbono orgânico e nitrogênio total, de carbono não lábil e do carbono nas frações químicas da matéria orgânica do solo em todas as profundidades e apresentaram acúmulo de $5,22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,23 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de carbono orgânico e nitrogênio total do solo, respectivamente, na camada de 0-40 cm. Também foi obtido aumento no teor de carbono lábil na camada superficial do solo sob sistemas integrados com leguminosas ou capim-buffel, indicando que os sistemas integrados de produção podem ser adotados como uma estratégia de uso sustentável da terra no bioma Cerrado.