

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Ana Clara Santos Duarte

**Atributos biológicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas
agropecuários no cerrado mineiro**

Montes Claros

2023

Ana Clara Santos Duarte

**Atributos biológicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas
agropecuários no cerrado mineiro**

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

Orientador: Prof^a Dra. Leidivan Almeida Frazão

Montes Claros

Maio de 2023

Duarte, Ana Clara Santos.

D812a Atributos biológicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas
2023 agropecuários no cerrado mineiro [manuscrito]/ Ana Clara Santos Duarte. Montes
Claros, 2023.
52 f.: il.

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

Orientadora: Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Leidivan Almeida Frazão, Rodinei Facco Pegoraro, Walter
José Rodrigues Matrangolo.

Inclui referências: Inclui referências: f. 22-25; 47-51.

1. *Cratylia argentea* -- Teses. 2. Agricultura sustentada -- Teses. 3. Matéria
orgânica -- Solos -- Teses. 4. Plantas forrageiras -- Solos -- Teses 5. Solos -- Teses.
I. Frazão, Leidivan Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de
Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4



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

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 12 dias do mês de maio de 2023, às 09:00 horas, sob a Presidência da Professora Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (Orientadora - ICA/UFMG), com a participação do Professor Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (ICA/UFMG) e do Pesquisador Walter José Rodrigues Matrangolo, D. Sc. (EMBRAPA), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Dissertação de **ANA CLARA SANTOS DUARTE**, aluna do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. Como resultado da defesa de dissertação intitulada "**Atributos biológicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas agropecuários no cerrado mineiro**", a aluna foi considerada **APROVADA**. E, para constar, eu, Professora Leidivan Almeida Frazão, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do **ARTIGO 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 obtido, o candidato deverá, após 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 tese, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros/MG, 12 de maio de 2023.

Leidivan Almeida Frazão

Rodinei Facco Pegoraro

Walter José Rodrigues Matrangolo

Orientadora

Membro

Membro



Documento assinado eletronicamente por **Leidivan Almeida Frazão, Professora do Magistério Superior**, em 18/05/2023, às 15:23, 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 18/05/2023, às 15:32, 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 **Walter José Rodrigues Matrangolo, Usuário Externo**, em 19/05/2023, às 16:34, 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 **2307769** e o código CRC **BA2FE07E**.

Ana Clara Santos Duarte

**Atributos biológicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas
agropecuários no cerrado mineiro**

Aprovado pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Rodinei Facco Pegoraro

ICA/UFMG

Dr. Walter José Rodrigues Matrangolo

Embrapa Milho e Sorgo



Prof.^a Dra. Leidivan Almeida Frazão - Orientadora

ICA/UFMG

Montes Claros, 12 de maio de 2023

*Aos meus pais, minha razão para lutar
pelos meus sonhos,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser minha força e sustento em todos os momentos, assim como na condução deste trabalho.

Aos meus pais José Duarte e Dulce, que são meu alicerce, pelo amor, incentivo e por acreditar nos meus sonhos e em mim. Não existem palavras que possam expressar minha gratidão. Ao meu irmão Josué, pela parceria, incentivo e apoio. A Erick, pelo carinho, compreensão e por sempre acreditar em mim.

A toda minha família, especialmente meus avós, pelas orações e por serem exemplos de luta e fé.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Leidivan, pelos inúmeros ensinamentos compartilhados, pela paciência e amizade ao longo de todos esses anos.

A Jaqueline e Igor, pelo auxílio de sempre, ensinamentos e pela amizade.

A todos os membros do Grupo de Estudo em ILPF, especialmente, Ismael, Alex, Álissam, Nicson, Warley, João Gabriel, Marcos, Paulo, Bruna, Rafael e Evander pelo apoio fundamental em toda a condução deste estudo e pelos momentos de descontração.

A Walter Matrangolo e Karina Toledo, pelas contribuições neste trabalho e por viabilizarem a condução deste estudo.

Ao Prof. Dr. Rodinei, pela presteza em colaborar com este trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais, ao Instituto de Ciências Agrárias e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de realização do mestrado.

Aos técnicos de laboratório do Centro de Pesquisa em Ciências Agrárias (CPCA/ICA) pelo constante auxílio durante as análises laboratoriais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo. A FAPEMIG, CNPq e Bayer S.A pelo apoio financeiro fundamental para realização deste trabalho.

A Embrapa Milho e Sorgo e Epamig pelas áreas experimentais concedidas para realização desta pesquisa, e todos os funcionários que auxiliaram nos trabalhos de campo.

A todos do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, pelo grande auxílio prestado durante as análises.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

Muito obrigada!

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso. Não se apavore nem desanime, porque o Senhor está contigo em qualquer parte para onde for”

Josué 1:9

“O segredo da vida é o solo, porque do solo dependem as plantas, a água, o clima e a nossa vida. Tudo está interligado. Não existe ser humano sadio se o solo não for sadio.”

Ana Primavesi

ATRIBUTOS BIOLÓGICOS E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS NO CERRADO MINEIRO

RESUMO

Visando atender as metas relacionadas à mitigação das mudanças climáticas, destaca-se a importância do estudo dos atributos biológicos, assim como dos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N), para avaliar a qualidade dos solos cultivados com sistemas integrados de produção, principalmente aliados ao uso de espécies que se adaptam a diferentes condições edafoclimáticas e possuem múltiplos usos na agropecuária. Diante do exposto, objetivou-se avaliar os atributos biológicos e os estoques de C e N do solo de diferentes sistemas integrados de produção com o uso da *Cratylia argentea* no bioma cerrado. Foram conduzidos dois experimentos, sendo o experimento 1 composto por 5 usos do solo: vegetação nativa (VN); plantio convencional de milho (MILHO); pastagem contínua (PAST); sistema integrado cratília + milho (CRAT); sistema integrado gliricídia + milho (GLIR). O experimento 2 foi composto por 3 usos do solo: vegetação nativa (VN); pastagem contínua (PAST); sistema integrado cratília + pastagem (CRAT). As coletas de solo foram realizadas em duas épocas (dezembro e julho) para avaliação dos seguintes atributos biológicos: carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC), carbono lábil (CL), atividade das enzimas urease e β -glicosidase, nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm do solo. Adicionalmente, foi realizada uma coleta de solo para determinação de C e N total, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm. Os teores e estoques de C foram influenciados pelo uso do solo, com maiores médias observadas na PAST. No experimento 1, os sistemas integrados apresentaram maiores estoques de C do solo em relação ao MILHO. Já no experimento 2, os valores foram semelhantes entre PAST e CRAT. Os atributos biológicos de qualidade do solo foram influenciados pelos manejos e pela época de amostragem. No experimento 1, os maiores teores de Cmic e qMIC na avaliação de dezembro foram observados na PAST. Na avaliação de julho, a atividade da enzima urease e o teor de CL foram maiores na PAST, enquanto a atividade da β -glicosidase foi maior no sistema GLIR, seguido pelo sistema CRAT. No experimento 2, os maiores teores de cmic, qMIC e atividade da enzima β -glicosidase foram observados para PAST e CRAT, nas duas épocas de amostragem. Os sistemas de intensificação sustentável com uso da cratília promoveram melhorias na qualidade do solo, apresentando potencial de acúmulo de C e mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

Palavras-chave: *Cratylia argentea*. Intensificação sustentável. Matéria orgânica do solo. β -glicosidase. Carbono da biomassa microbiana.

BIOLOGICAL ATTRIBUTES AND SOIL CARBON AND NITROGEN STOCKS IN AGRICULTURAL SYSTEMS IN THE MINAS GERAIS CERRADO

ABSTRACT

Aiming to meet the goals related to the mitigation of climate change, stands out the important to study biological attributes, as well as carbon (C) and nitrogen (N) stocks, to assess the quality of soils cultivated with integrated production systems, mainly allied to the use of species that adapt to different edaphoclimatic conditions and have multiple uses in farming. Given the above, the objective was to evaluate the biological attributes and soil C and N stocks of different integrated production systems using *Cratylia argentea* in the Cerrado biome. Two experiments were carried out, being the experiment 1 consisting of 5 land uses: native vegetation (VN); conventional planting of maize (MAIZE); continuous pasture (PAST); cratylia integrated system + maize (CRAT); gliricidia integrated system + maize (GLIR). Experiment 2 was composed of 3 land uses: native vegetation (VN); continuous pasture (PAST); Cratylia integrated system + pasture (CRAT). Soil collection were carried out in two periods (December and July) to evaluate the following biological attributes: microbial biomass carbon (Cmic), microbial quotient (qMIC), labile carbon (CL), activity of urease and β -glucosidase enzymes, in the soil layers 0-5, 5-10 and 10-20 cm. Additionally, it was carried a soil collection out to determine total C and N, in layers 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm. C contents and stocks were influenced by soil use, with higher averages observed in PAST. In experiment 1, the integrated systems showed higher soil C stocks compared to MAIZE. Already in experiment 2, the values were similar between PAST and CRAT. Soil quality biological attributes were influenced by management and sampling time. In experiment 1, the highest levels of Cmic and qMIC in the December evaluation were observed in PAST. In the July evaluation, urease enzyme activity and CL content were higher in the PAST, while β -glucosidase activity was higher in the GLIR system, followed by the CRAT system. In experiment 2, the highest contents of cmic, qMIC and β -glucosidase enzyme activity were observed for PAST and CRAT, in the two sampling times. Sustainable intensification systems using cratylia promoted improvements in soil quality, presenting potential for C accumulation and mitigation of greenhouse gas emissions.

Keywords: *Cratylia argentea*. Sustainable intensification. Soil organic matter. β -glicosidase. Soil microbial carbon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistemas integrados nos dois experimentos localizados nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Morais, no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.....	28
Figura 2 - Precipitação e temperatura média anual no período de avaliação (2021-2022) nas áreas experimentais localizadas nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Morais, no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.....	29
Figura 3- Cronosequência do uso e manejo do solo no experimento 1: integração de cratília e gliricídia com cultura anual.....	30
Figura 4- Esquema dos arranjos dos sistemas integrados de produção nas duas áreas experimentais no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.....	30
Figura 5 - Cronosequência do uso e manejo do solo no experimento 2: integração de cratília com pastagem.....	31
Figura 6- Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo e relação carbono nitrogênio (C/N) em diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.....	34
Figura 7 - Teor de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo e relação carbono nitrogênio (C/N) em diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.....	36
Figura 8- Relação entre o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) discriminando diferentes sistemas de manejo e uso da terra segundo os atributos biológicos de qualidade do solo na camada 0-20 cm, no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.....	42
Figura 9- Relação entre o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) discriminando diferentes sistemas de manejo e uso da terra segundo os atributos biológicos de qualidade do solo na camada 0-20 cm, no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas de uso e manejo do solo no experimento 1: integração de cratília e gliricídia com cultura anual.....	29
Tabela 2 - Sistemas de uso e manejo do solo no experimento 2: integração de cratília com pastagem.....	31
Tabela 3 - Densidade do solo sob diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.....	33
Tabela 4 - Estoques de carbono e nitrogênio sob diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.....	35
Tabela 5 - Densidade do solo sob diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.....	35
Tabela 6 - Estoques de carbono e nitrogênio em diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.....	37
Tabela 7 - Resumo da análise de variância para os atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil	37
Tabela 8 - Atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.....	38
Tabela 9 - Resumo da análise de variância para os atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.....	40
Tabela 10 - Atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CH ₄	Metano
CL	Carbono Lábil
Cmic	Carbono da biomassa microbiana
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Equivalência em Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
GEE	Gases de Efeito Estufa
ILP	Integração Lavoura-Pecuária
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio gasoso
N ₂ O	Óxido Nitroso
NT	Nitrogênio Total
PIB	Produto Interno Bruto
qMIC	Quociente microbiano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.1 Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 Emissões de gases de efeito estufa na agropecuária.....	16
3.2 Sistemas integrados de produção	17
3.3 Intensificação de uso do solo com <i>Cratylia argentea</i>	18
3.4 Potencial de acúmulo de C e N em sistemas integrados de produção.....	19
3.5 Indicadores de qualidade do solo.....	19
3.5.1 Carbono lábil do solo	20
3.5.2 Biomassa microbiana do solo.....	20
3.5.3 Atividade enzimática do solo	20
3.6 Referências.....	22
4 ARTIGOS.....	26
4.1 Artigo 1 - Estoques de carbono e atributos biológicos do solo em sistemas integrados com <i>Cratylia argentea</i> no cerrado brasileiro.....	26
4.1.1 Introdução	27
4.1.2 Material e métodos	27
4.1.3 Resultados	33
4.1.4 Discussão	43
4.1.5 Conclusões	46
4.1.6 Referências.....	47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52

1 INTRODUÇÃO

A emissão de gases do efeito estufa (GEEs) é pauta constante em debates mundiais sobre a sustentabilidade (IPCC, 2021). Nesse contexto, a agropecuária é um dos segmentos dos quais se esperam mudanças e alternativas nos sistemas de produção, visando entre outros objetivos, a redução das emissões dos GEEs. Em busca da sustentabilidade econômica e ambiental, os sistemas integrados de produção, em suas diversas modalidades, buscam a consorciação e, ou rotação de cultivos, e apresentam grande potencial de mitigação das emissões de GEEs através da captura e armazenamento de carbono no solo (BESEN *et al.*, 2018; BRASIL, 2019).

Visando a intensificação sustentável do uso do solo, a introdução de componentes versáteis dentro de um sistema integrado pode promover diferentes ganhos, sejam eles qualitativos ou quantitativos. Visto isso, a *Cratylia argentea*, uma leguminosa forrageira, destaca-se por características relevantes, como por exemplo, a grande capacidade de rebrota, as múltiplas formas de condução, a adaptação às condições de solos distróficos, a tolerância à seca, entre outras (MATRANGOLO *et al.*, 2019; RAMOS *et al.*, 2003; VALLES-DE LA MORA *et al.*, 2014).

Essas mudanças de manejo em sistemas integrados promovem modificações positivas na qualidade do solo (FRAZÃO *et al.* 2021). Porém, são necessárias ferramentas sensíveis de avaliação da dinâmica da matéria orgânica, como os atributos biológicos do solo, que trazem respostas de curto prazo em relação ao manejo adotado dos diversos sistemas produtivos (DORAN; ZEISS, 2000; ACOSTA-MARTÍNEZ *et al.*, 2004).

Nesse sentido, a seleção correta de indicadores biológicos de qualidade do solo pode trazer respostas em relação ao sistema adotado, principalmente frente às emissões de GEEs, as quais permitem a compreensão do potencial de acúmulo de carbono no solo. Diversos estudos já avaliaram as respostas dos atributos biológicos do solo em sistemas de integração (ALMEIDA *et al.* 2021; PESSÔA *et al.* 2022), entretanto, ainda são necessárias pesquisas para obtenção de maiores informações sobre a contribuição da biomassa microbiana na qualidade do solo desses sistemas. Evidencia-se, ainda, maior necessidade de estudos quando são inseridos componentes versáteis, com múltiplas possibilidades de usos, como é o caso da *Cratylia argentea*, incluindo sua inserção no contexto da agricultura familiar.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os estoques de carbono e nitrogênio e os atributos biológicos do solo em diferentes sistemas integrados com o uso da *Cratylia argentea* no Cerrado mineiro.

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar os teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo em duas áreas de intensificação de uso da terra com *Cratylia argentea*.
- Quantificar o carbono da biomassa microbiana, o quociente microbiano e o carbono lábil do solo em dois períodos de amostragem.
- Determinar a atividade das enzimas urease e β -glicosidase nos diferentes sistemas de uso do solo em duas épocas de amostragem.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Emissões de gases de efeito estufa na agropecuária

As contribuições da agropecuária para a consolidação econômica, social e para a segurança alimentar no Brasil, assim como em todo o mundo, são inquestionáveis. Um exemplo disso é a participação do agronegócio no PIB nacional, que representou 24,8 % em 2022 (CEPEA, 2023). Entretanto, esse importante setor da economia brasileira também é responsável por intensificação de problemas ambientais, principalmente quando associado à mudança do uso da terra, na qual áreas de vegetação nativa são desmatadas para implantação de cultivos agrícolas ou pastagens. No Brasil, a agropecuária e a mudança do uso da terra são os setores que mais contribuem para emissões de gases do efeito estufa (GEEs) (IPCC, 2021). Os principais gases que fazem com que a agricultura e a pecuária sejam contribuintes para intensificação do efeito estufa são: o metano (CH₄), proveniente principalmente da fermentação entérica dos ruminantes e produção de dejetos de animais; o óxido nitroso (N₂O), também proveniente da produção de resíduos animais, queima de resíduos agrícolas, e principalmente o uso de fertilizantes nitrogenados e; o dióxido de carbono (CO₂), advindo da mudança de uso da terra em decorrência do desmatamento (MCTI, 2016; BESEN *et al.*, 2018; BRASIL, 2019).

Neste contexto, a agropecuária é um dos segmentos dos quais se esperam mudanças e alternativas nos sistemas de produção, visando entre outros objetivos, a redução das emissões dos GEEs para a atmosfera. Para que isso seja possível, práticas conservacionistas são estudadas e empregadas a fim de reforçar a sustentabilidade e adaptação dos sistemas produtivos, frente às mudanças climáticas e problemas econômicos, sociais e ambientais (BESEN *et al.*, 2018). As práticas conservacionistas seguem os princípios de redução do revolvimento do solo, manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, e a diversificação de espécies no sistema produtivo. São exemplos de práticas de conservação, o sistema plantio direto, a adubação verde, a utilização de plantas de cobertura, a rotação de culturas e os sistemas integrados de produção (ZONTA *et al.*, 2012). Essas práticas vêm sendo consolidadas ao longo dos anos, com crescente adesão de produtores, o que promove benefícios ambientais e econômicos (DENARDIN *et al.*, 2012).

A adoção ou manutenção de sistemas agropecuários conservacionistas estão preconizados no Plano Setorial de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, chamado de ABC+, que corresponde a segunda etapa do Plano ABC (realizado entre 2010 e 2020), e visa a redução da emissão de carbono equivalente (CO₂ eq)¹ em 1,1 bilhão de toneladas no setor agropecuário até 2030 (BRASIL, 2021). Entre as estratégias do Plano ABC+, encontra-se a continuação da promoção dos chamados “SPSABC” (Sistemas, Práticas, Produtos e Processos de produção Sustentáveis): sistemas plantio direto, fixação biológica do nitrogênio, florestas plantadas, recuperação de pastagens degradadas e os sistemas integrados de produção nas diversas modalidades (BRASIL, 2021).

¹ Equivalência em dióxido de carbono, é uma medida internacionalmente aceita que expressa a quantidade de gases de efeito estufa em termos equivalentes à quantidade de dióxido de carbono, levando em consideração o potencial de aquecimento global (PAG) de cada GEE.

3.2 Sistemas integrados de produção

Os sistemas integrados de produção são estratégias sustentáveis, que têm como premissa a intensificação da produção agrícola, pecuária e florestal em uma mesma área, em sucessão ou rotacionada, a fim de promover adequação ambiental, valorização social e viabilidade econômica (BALBINO *et al.*, 2011; BALBINO *et al.*, 2019). De acordo com Balbino *et al.* (2011), os sistemas podem ser classificados em quatro grupos: (i) integração lavoura-pecuária (ILP) ou agropastoril; (ii) integração pecuária-floresta (IPF) ou silvipastoril; (iii) integração lavoura-floresta (ILF) ou silviagrícola; (iv) integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou agrossilvipastoril.

Os benefícios dos sistemas integrados são inúmeros nos contextos social, econômico e ambiental, e pode-se destacar como reflexos positivos a intensificação no uso da terra, a recuperação de pastagens degradadas, diversificação dos sistemas de produção, aumento da renda e qualidade de vida do produtor, conservação e melhoria do solo e da água, eficiência no uso de insumos, mão-de-obra e recursos, adequação ambiental, quebra do ciclo de pragas e doenças (BALBINO *et al.*, 2019). Outra vantagem da adoção desses sistemas é a possibilidade de minimizar a perda de serviços ambientais, relacionados a água, solo, microclima, biodiversidade e sequestro de carbono (NICODEMO *et al.*, 2019). Exemplo desse último indicador é a estimativa de Nair (2011), inferindo que os sistemas agroflorestais podem armazenar de 30 a 300 t C ha⁻¹ ano⁻¹ até 1 metro de profundidade no solo.

Os sistemas integrados são alternativas para reverter as perdas de produtividade das pastagens brasileiras, que se encontram em sua maioria degradadas. Segundo Macedo *et al.* (2012), a ILP permite esquemas de rotação em uma mesma área, na qual se alternam períodos de pecuária com a produção de grãos ou fibras, com os produtos e subprodutos podendo ser destinados à alimentação humana e animal. Segundo levantamento feito pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LAPIG/UFG), entre os anos de 2016 e 2018 nas áreas de contrato do Plano ABC (que dentre as medidas adotadas encontravam-se os sistemas integrados de produção), houve redução de áreas de degradação severa de pastagens de 34,3% para 25,2%, e melhoria da qualidade da pastagem em 30,3% das áreas avaliadas (JÚNIOR *et al.*, 2020). Considerando as diversas vantagens da utilização desses sistemas, o potencial de mitigação de emissões de GEE vai além da recuperação de pastagens degradadas (ASSAD *et al.*, 2019). A redução nas emissões de N₂O e CH₄ em sistemas integrados em relação aos sistemas convencionais, também são observadas. Amadori *et al.* (2022) em estudo comparando diferentes estratégias de integração (silvipastoril, ILP e ILPF) com sistema extensivo de pastagem, relataram redução das emissões de N₂O em até 40%. Resultados semelhantes também foram encontrados por Piva *et al.* (2014), na redução da emissão de CH₄ em uma área de integração lavoura-pecuária, que atuou como sumidouro desse gás, em relação ao sistema de cultivo contínuo.

Os sistemas integrados promovem o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS), e conseqüentemente elevam o seu potencial de remoção de CO₂ da atmosfera (BUNGENSTAB *et al.*, 2019). Adicionalmente, quando os sistemas adotam os componentes florestais e/ou forrageiros, ocorre a retenção também na biomassa, adicionalmente ao incrementado no solo (ASSAD *et al.*, 2019).

O microbioma do solo é responsável por melhorias nas características físico-químicas, destacando-se o grupo de bactérias diazotróficas, que são responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio (TERRA *et al.*,

2019). Nesse sentido, destaca-se a importância das leguminosas, as quais formam associações com bactérias fixadoras de N₂, e são responsáveis pelo maior aporte desse nutriente no sistema solo-planta (MOREIRA *et al.*, 2010). Nos sistemas agroflorestais um grande desafio é a escolha de forrageiras que se adaptam a diferentes condições edafoclimáticas, principalmente a períodos de seca (MATRANGOLO *et al.*, 2018). Neste contexto, uma forrageira leguminosa com bons resultados em sistemas integrados é a *Cratylia argentea*, já testada em sistemas produtivos de agricultores familiares.

3.3 Intensificação de uso do solo com *Cratylia argentea*

A *C. argentea* é um arbusto forrageiro perene, pertencente à família *Fabaceae*, que pode ser encontrada vegetando naturalmente em diferentes regiões do Brasil, sendo popularmente chamada de cratília, camaratuba ou copada, nas regiões nordeste e sudeste, respectivamente (XAVIER *et al.*, 1995). Essa leguminosa se destaca pela grande capacidade de rebrota, adaptação às diversas condições de fertilidade do solo (crescendo mesmo em solos empobrecidos e ácidos), valor nutricional superior a outras leguminosas, com elevados teores de nitrogênio, e pequenas quantidades de taninos (VALLES-DE LA MORA *et al.*, 2014; RAMOS *et al.*, 2003).

Em regiões com problemas hídricos, a espécie se destaca pela tolerância à seca, a qual possibilita que a planta se mantenha verde e com folhas durante boa parte do ano, característica de grande relevância atribuída ao sistema radicular profundo da leguminosa. Nos sistemas integrados, a cratília pode ser conduzida em sistema de aleias, principalmente por apresentar uma arquitetura que possibilita a condução de acordo com a finalidade desejada, e ainda pela excelente capacidade de rebrota (MATRANGOLO *et al.*, 2019). Esses autores apresentaram como principais benefícios da condução da espécie em sistema de aleias, a conservação de água dentro do sistema, minimização da incidência direta de raios solares, com redução da temperatura, favorecendo o fluxo de nutrientes e a biodiversidade do solo. Valles-De la Mora *et al.* (2014) ao avaliarem diferentes acessos de *C. argentea* em sistema silvipastoril observaram um bom desempenho da espécie, com alto teor de proteína bruta e digestibilidade, principalmente na estação seca.

Além das vantagens acima mencionadas, a *C. argentea* apresenta benefícios ao solo e ao ambiente, uma vez que favorece o aporte de carbono e nitrogênio, e a ciclagem de nutrientes a partir da associação com bactérias fixadoras de N, reduzindo as necessidades de fertilizações nitrogenadas nos sistemas produtivos (CALAZANS *et al.*, 2016). Mosquera *et al.* (2012), ao compararem a dinâmica do carbono em diferentes usos da terra em área de recuperação de pastagem degradada, relataram aumento nos teores e estoques de C total, com utilização do banco de forragens, no qual dentre outros arbustos forrageiros estava a *C. argentea*.

Nesse sentido, diversos estudos vêm sendo realizados com a cratília na produção agropecuária e relatando resultados positivos, como sua utilização em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, relatado por Gama *et al.* (2014), no qual a leguminosa foi consorciada com milho (*Zea mays* cv. BRS 2020) e capim Massai (*Panicum maximum* cv. Massai).

3.4 Potencial de acúmulo de C e N em sistemas integrados de produção

O solo em um sistema integrado de produção pode ser considerado, segundo Anghinoni *et al.* (2013), como compartimento centralizador das modificações que ali ocorrem, capaz de capturar e/ou refletir as mudanças no manejo. Visto isso, relata-se melhorias nos atributos do solo com a implantação dos sistemas integrados de produção, o que afeta, por exemplo, o desenvolvimento radicular das culturas ali presentes, assim como seu potencial produtivo (SOUZA *et al.*, 2008). Além das melhorias nas propriedades químicas e físicas, os sistemas agroflorestais também promovem o incremento da matéria orgânica do solo (MOS), contribuindo diretamente para ganhos nos atributos biológicos. A proteção física da MOS em complexos organominerais possibilita o aumento de teores de C e N nesses sistemas, uma vez que reduz a biodisponibilidade para microrganismos e enzimas do solo. A introdução de sistemas integrados de produção pode resultar em aumentos de C nas frações humificadas, as quais apresentam maior tempo de permanência no solo, contribuindo com melhorias nos atributos físicos e químicos (SILVA *et al.*, 2011; VICENTE *et al.*, 2019).

Segundo Carvalho *et al.* (2010a), os teores de C e N podem aumentar com a implantação de sistemas integrados de produção, sendo esse aumento dependente das condições edafoclimáticas do local, tipo de solo e espécies cultivadas. Carvalho *et al.* (2010b) ao avaliarem a implantação de um sistema lavoura-pecuária em solo naturalmente fértil, observou acúmulo de C de 2,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

As melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo compreendem umas das principais funções dos sistemas integrados, o que pode ser evidenciado pelo aumento nos teores e conseqüentemente nos estoques de C e N. Frazão *et al.* (2021) relataram que a introdução de sistemas agrosilviculturais aumentou os estoques de C no solo, com melhoria da qualidade do solo nas camadas superficiais. Incrementos nos estoques de C em um sistema ILPF (1,72 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) em relação a uma pastagem bem manejada de *U. brizantha* cv. Marandu (0,32 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), também foram relatos por Freitas *et al.* (2020), que também observaram padrão semelhante dos estoques de N.

3.5 Indicadores de qualidade do solo

Além dos atributos físicos e químicos do solo, o manejo empregado em sistemas integrados influencia na dinâmica da biomassa microbiana. Os atributos biológicos são importantes indicadores a serem avaliados uma vez que são mais sensíveis, apresentando resposta rápida por mudanças no manejo solo (DORAN; ZEISS, 2000). Segundo Batista *et al.* (2018), entre os principais indicadores microbiológicos e bioquímicos, estão: os grupos microbianos funcionais, o C, o N e os demais nutrientes contidos na biomassa microbiana do solo, a taxa respiratória do solo e a atividade de enzimas envolvidas na ciclagem de C e N, como por exemplo a β -glicosidase e a urease. Esses indicadores, aliados às avaliações físico-químicas são ferramentas eficientes de monitoramento da qualidade do solo em sistemas integrados de produção (ACOSTA-MARTÍNEZ *et al.*, 2004).

3.5.1 Carbono lábil do solo

A matéria orgânica lábil do solo corresponde a uma pequena porção da matéria orgânica total, incluindo entre outros atributos, o carbono oxidável por permanganato de potássio (KMnO_4), ou carbono lábil (CL). O carbono lábil é caracterizado por períodos rápidos de permanência no solo e maior sensibilidade às mudanças que ali ocorrem, e tem como principais funções o fornecimento de nutrientes às plantas e de energia para os microorganismos (ZHANG *et al.* 2021; HAYNES 2005). Nesse sentido, o manejo do solo exerce grande influência sobre os teores de CL. Dhaliwal *et al.* (2022), em estudo realizado com áreas de longo e curto prazo de cultivo, relataram maior teor de CL em sistema integrado de lavoura-pecuária (milho/soja/pastagem) e pastagem, quando comparados com um sistema de rotação milho/soja sem pastagem e cobertura vegetal.

3.5.2 Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana é a porção ativa da matéria orgânica do solo, atuando em diversos processos, como na transformação da MOS, sendo fonte e dreno de C e N, assim como na mineralização desses nutrientes (SINGH *et al.*, 1989; SPARLING, 1992). Visto isso, e sendo a microbiota indicador sensível de alterações na qualidade do solo, as estimativas desses atributos são importantes para correlações com a produtividade e sustentabilidade de sistemas (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). Diversos métodos foram desenvolvidos a fim de avaliar a atividade microbiana do solo, tal como a respiração (evolução de CO_2), que apresenta grande sensibilidade e diz respeito à soma de todas as funções metabólicas onde o CO_2 é produzido (ALEF *et al.*, 1995).

Alguns estudos já validaram a influência dos sistemas integrados de produção sobre os atributos biológicos do solo. Almeida *et al.* (2021) observaram aumentos de C da biomassa microbiana (C_{mic}) nas camadas subsuperficiais de sistemas silvipastoris na estação chuvosa no Cerrado norte mineiro. Esses autores relataram ainda, a maior estabilidade da biomassa microbiana, evidenciada pelos baixos valores do quociente metabólico do solo ($q\text{CO}_2$). Segundo Oliveira *et al.* (2016), baixos valores de $q\text{CO}_2$ indicam menos perdas pela respiração do solo, e conseqüentemente acúmulo de C pelos processos de imobilização no tecido microbiano.

3.5.3 Atividade enzimática do solo

A atividade enzimática do solo é outra importante ferramenta de avaliação de mudanças em um sistema produtivo, seja em curto ou longo prazo (DICK *et al.*, 1996). Em sistemas conservacionistas, a atividade enzimática é incrementada em decorrência da maior preservação da matéria orgânica do solo (DICK *et al.*, 1996; SOUZA *et al.*, 2008). A atividade dessas biomoléculas fornece uma compreensão sobre as práticas de manejo adotadas e a resposta dos microorganismos (ACOSTA-MARTÍNEZ *et al.*, 2010). As enzimas catalisam reações durante a ciclagem dos elementos representando o nível metabólico da biomassa microbiana do solo

(BALOTA *et al.*, 2004). O solo apresenta grande variedade de enzimas, entre elas pode-se destacar a β -glicosidase, que atua na ciclagem do C, e a urease, que participa do ciclo do N.

A enzima β -glicosidase atua na etapa final da decomposição da celulose, pela hidrólise dos resíduos de celobiose, e pode ser considerada uma das mais importantes dentre as enzimas celulases, pois sua atividade tem como resultado a liberação de glicose para os microorganismos (WRIGHT *et al.* 1988). Visto essa relação direta com a atividade dos microorganismos, a β -glicosidase é utilizada como indicador de qualidade do solo (KNIGHT; DICK, 2004). Pires *et al.* (2022) associaram o aumento da atividade da enzima β -glicosidase em um sistema de integração lavoura-pecuária com diferentes estratégias de adubação, devido ao aporte de resíduos ao solo proveniente da maior produção de biomassa da pastagem, tanto da parte aérea, quanto das raízes.

A urease, por sua vez, é responsável por catalisar a hidrólise da ureia em dióxido de carbono e amônio. A atividade da enzima urease é de suma importância para a agricultura, uma vez que está atrelada ao nitrogênio, que corresponde a um dos nutrientes mais utilizados para adubação de solos agrícolas. Em estudo realizado por Stieven *et al.* (2020), a atividade da enzima urease foi de 9.871,31 e 13.297,94 mg N-NH₄ g solo⁻¹, no solo sob floresta nativa e um sistema ILPF, respectivamente, o que pode estar atribuído, segundo os autores, ao incremento de matéria orgânica nitrogenada aos sistemas, principalmente o resíduo bovino que é rico em ureia.

3.6 Referências

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; BELL, C. W.; MORRIS, B. E. L.; ZAK, J.; ALLEN, V. G. Long-term soil microbial Community and enzyme activity responses to an integrated cropping-livestock system in a semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 137, n. 3-4, p. 231-240, 2010.
- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; ZOBECK, T. M.; ALLEN, V. Soil microbial, chemical and physical properties in continuous cotton and integrated crop-livestock systems trade names and company names are included for the benefit of the reader and do not infer any endorsement or preferential treatment of the product. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1875-1884, 2004.
- ALEF, K. Estimation of soil respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. 1º ed. New York: Academic Press, 1995, p. 463-490.
- ALMEIDA, L. L. de S.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO, A. L. de C.; LANA, A. M. Q.; SOUZA, I. A. de; 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, n. 104785, jan. 2021.
- AMADORI, C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; ZAMAN, A.; BAYER, C. Nitrous oxide and methane emissions from soil under integrated farming systems in southern Brazil. **Sci Total Environ**, v. 828, n. 154555, 2022.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropico brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R., (Eds.) **Tópicos em Ciência do Solo**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2013. cap. 8, p. 221-278.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 835 p.
- BALBINO L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de. Sistemas de integração: conceitos, considerações, contribuições e desafios. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 835 p.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.
- BALOTA, E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Soil enzyme activities under longterm tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 35, p. 300-306, 2004.
- BATISTA, E. R.; ZANCHI, C. S.; FERREIRA, D. A.; SANTIAGO, F. L. A.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. V.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. In: SOUZA, E. D. de (Org.). **Sistemas Integrados de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. v. 1, p. 71-90.
- BESEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; MONTEIRO, A. N. T. R.; IWASAKI, G. S.; PIVA, J. T. Soil conservation practices and greenhouse gases emissions in Brazil. **Scientia Agropecuaria**, Trujillo, v. 9, n. 3, p. 429-439, jul. 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**: visão estratégica para um novo ciclo / Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. Brasília: MAPA, 2021. 28 p.

- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Secretaria de Políticas para a Formação e Ações Estratégicas. Coordenação-Geral do Clima. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil** / Coordenação-Geral do Clima. 5. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019. 71 p.
- BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta** (editores técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2019, 835 p.
- CALAZANS, G. M.; OLIVEIRA, C. A.; CRUZ, J. C.; MATRANGOLO, W. J. R.; MARRIEL, I. E. Selection of efficient rhizobial symbionts for *Cratylia argentea* in the cerrado biome. **Ciência Rural**, v. 46, n. 9, p. 1594-1600, 2016.
- CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, L. M. N.; MELLO, C. R. de; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277-289, 2010a.
- CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil e Tillage Research**, v. 110, p. 175-186, 2010b.
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA/ESALQ). Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária (CNA). **PIB do agronegócio brasileiro 2022**. 2023. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023.pdf>>. Acesso em 01 abr 2023.
- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 15 p.
- DHALIWAL, J. K.; LAXMISAGRA, S. K.; CHELLAPPA, J.; SEKARAN, U.; KUMAR S. Labile soil carbon and nitrogen fractions under short and long-term integrated crop-livestock agroecosystems. **Soil Research**, v. 60, p. 511-519, 2022.
- DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for assessing soil quality**. **Madson**: Soil Science Society of America, 1996. p. 247-272.
- DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, p. 3-11, 2000.
- FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; NETA, M. N. A.; 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, p. 794-805, 2021.
- FREITAS, I. C. de; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, M. V.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; AZEVEDO, A. M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangeland Ecology & Management**, v. 73, n. 6, p. 776-785, 2020.
- GAMA, T. C. M.; VOLPE, E.; LEMPP, B. Biomass accumulation and chemical composition of Massai grass intercropped with forage legumes on an integrated crop-livestock-forest system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 43, n. 06, p. 279-288. 2014.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; O., CAMARGO F. A. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, p. 159-170.
- HAYNES, R. J. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. **Advances in Agronomy**, v.85, p. 221-268, 2005.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report.** Cambridge University Press. 2021.

JÚNIOR, L. G. F.; SANTOS, C. O.; MESQUITA, V. V.; PARENTE, L. L. **Dinâmica das pastagens Brasileiras: Ocupação de áreas e indícios de degradação - 2010 a 2018.** Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LAPIG/UFG). 19 p. out. 2020.

Knight, T. R.; Dick, R. P. Differentiating microbial and stabilized β -glucosidase activity relative to soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 12, p. 2089-2096, 2004.

MACEDO, M. C. M.; ARAÚJO, A. R. de. Sistemas de integração lavoura-pecuária: alternativas para recuperação de pastagens degradadas. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável.** 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 27-48.

MATRANGOLO, W. J. R.; BRASILEIRO, B. P.; SILVA, C. J. da; NETTO, D. A. M.; MATTAR, E. P. L.; FRADE JÚNIOR, E. F.; SILVA, I. H. F. da; SILVA, I. S. da; CRIVELARO, J. C. B.; RIBEIRO, J. P. O.; FERRAZ, L. de C. L.; COSTA, L. S. C.; MALTA, P. da C. C.; CRUZ, S. C. B. da; GOMES, S. X.; GONÇALVES, V. A. D. **Aspectos de *Cratylia argentea* na região central de Minas Gerais e potencialidades em sistemas agrobiodiversos.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 41 p.

MATRANGOLO, W. J. R.; GONÇALVES, V. A. D.; GOMES, S. X.; SILVA, I. H. da; FERRAZ, L. C. L.; CAMPANHA, M. M. Produção de fitomassa por *Cratylia argentea* (fabaceae) em sistema de aleias na região central de Minas Gerais. In: AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M. **Ensaio nas ciências agrárias e ambientais 5.** v. 5, p. 200-213, 2019.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2016. **Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil.** 3ª edição. Brasília. 85 pp.

MOREIRA, F. M. S.; SILVA, K.; NÓBREGA, R. S. A.; CARVALHO, F. Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. **Comunicata Scientiae**, vol. 1, n. 2, p. 74-99. 2010.

MOSQUERA, O.; BUURMAN, P.; RAMIREZ, B. L.; AMEZQUITA, M. C. Carbon replacement and stability changes in short-term silvo-pastoral experiments in Colombian Amazonia. **Geoderma**, v. 170, p. 56-63, jan. 2012.

NAIR, P. K. R. Agroforestry Systems and Environmental Quality: Introduction. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, maio 2011.

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVESI, O. Serviços ambientais em sistemas silvipastoris. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta.** Brasília, DF: Embrapa, 2019. 835 p.

OLIVEIRA, W. R. D.; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M.; COSER, T. R.; SILVA, A. M. M.; LACERDA M. M.; SOUZA, K. W.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PULROLNIK, K. Dinâmica dos atributos microbiológicos do solo sob sistemas integrados de produção, pastagem contínua e cerrado nativo. **Pesq. Agropec. Bras**, v. 51, p. 1501-1510, 2016.

PESSÔA, G. C. M.; PISCOYA, V. C.; NETO, F. C. R.; FILHO, R. N. A.; MELO, R. C. P.; PESSÔA, U. C. M.; SILVA, L. J. S.; FILHO, M. C.; ALMEIDA, R. C. S.; PISCOYA, T. O. F.; MORAES, A. S.; FILHO, R. R. G.; MEDEIROS, R. M.; SABOYA, L. M. F.; PEDROTTI, A.; HOLANDA, F. S. R.; FERNANDES, M. M.; SANTOS, L. D. V. Carbon and Nitrogen Stocks and Microbiological Activity Under Forest-Pasture System and Traditional Pasture in Pernambuco. **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 2, e20210068, 2022.

PIRES, G. C.; DENARDIN, L. G. O.; SILVA, L. S.; FREITAS, C. M.; GONÇALVES, E. C.; CAMARGO, T. A.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 4487-4495, 2022.

- PIVA, J. T.; DIECKOW J.; BAYER C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; TOMAZI, M.; PAULETTI, V.; BARTH, G.; PICCOLO, M. C. Soil gaseous N₂O and CH₄ emissions and carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical Ferralsol. **Agric. Ecosyst. Environ**, v. 190, p. 87-93, 2014.
- RAMOS, A. K. B.; SOUZA, M. A. de; PIZARRO, E. A. **Algumas informações sobre a produção e o armazenamento de sementes de *Cratylia argentea***. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 4 p.
- SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T. F.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura pecuária, **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011.
- SINGH, J. S.; RAGHUBANSH, A. S.; SINGH, R. S.; SRIVASTAVA, S. C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, v. 338, n. 6215, p. 499-500, 1989.
- SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; LIMA, C. V.; ANGHINONI, I.; MEURER, E. J.; CARVALHO, P. C. F. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1273-1282, 2008.
- SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Soil Research**, v. 30, p. 195-207, 1992.
- STIEVEN, A. C.; MENDES, W. M.; WRUCK, F.; COUTO, E. G.; CAMPOS, D. T. S. Atributos do solo em sistemas diferenciados de uso e manejo do solo em Mato Grosso, MT, Brasil. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n.2, p.1-15, 2020.
- TERRA, A. B. C.; FLORENTINO, L. A.; REZENDE, A. V. de; SILVA, N. C. D. e. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Rev. de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 42, n. 2, p. 11-20, jun. 2019.
- VALLES-DE LA MORA, B. et al. *Cratylia argentea*: a potential fodder shrub in silvopastoral systems, yield and quality of accessions according to regrowth ages and climatic seasons. **Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v.20, n.2, p.277-293, 2014.
- VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, 104139, 2019.
- WRIGHT, J. D.; WYMAN, C. E.; GROHMANN, K. Simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulose. **Appl Biochem Biotechnol**, v. 18, p. 75–90, 1988.
- XAVIER, D. F.; CARVALHO, M. M.; BOTREL, M. de A. ***Cratylia argentea*: informações preliminares para sua utilização como forrageira**. Coronel Pacheco: Embrapa-CNPGL, 1995. 18 p.
- ZHANG, Y.; LI, Y.; LIU, Y.; HUANG, X.; ZHANG, W.; JIANG, T. Responses of Soil Labile Organic Carbon and Carbon Management Index to Different Long-Term Fertilization Treatments in a Typical Yellow Soil Region. **Eurasian Soil Sc**, v. 54, p. 605–618, 2021.
- ZONTA, J. H.; SOFIATTI, V.; COSTA, A. G. F.; SILVA, O. R. R. F.; BEZERRA, J. R. C.; SILVA, C. A. D. da; BELTRAO, N. E. de M.; ALVES, I.; CORDEIRO JUNIOR, A. F.; CARTAXO, W. V.; RAMOS, E. N.; OLIVEIRA, M. C. DE; CUNHA, D. DA S.; MOTA, M. O. S. DA; SOARES, A. N.; BARBOSA, H. F. **Práticas de conservação de solo e água**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2012. 24 p.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 - Atributos biológicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo em sistemas agropecuários no cerrado mineiro

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico *Agroforestry Systems*.

Resumo

Para contribuir com novos conhecimentos sobre a qualidade dos solos cultivados com sistemas de intensificação sustentável da agropecuária brasileira, o objetivo deste estudo foi avaliar os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) e atributos biológicos do solo em sistemas integrados de produção com o uso de *Cratylia argentea* no bioma Cerrado. Foram conduzidos dois experimentos, sendo o primeiro composto por cinco sistemas de uso do solo: vegetação nativa (VN); milho convencional (MILHO); pastagem nominal (PAST); sistema integrado cratília + milho (CRAT); sistema integrado gliricídia + milho (GLIR). O segundo experimento foi composto por três sistemas de uso do solo: vegetação nativa (VN); pastagem nominal (PAST); sistema integrado cratília + pastagem (CRAT). As coletas de solo foram realizadas em duas épocas, sendo elas dezembro (período chuvoso) e julho (período seco), para avaliação dos seguintes atributos biológicos: carbono da biomassa microbiana (Cmic), carbono lábil (CL), atividade das enzimas urease e β -glicosidase. Foi realizada ainda coleta para determinação de C e N total do solo. O uso do solo PAST apresentou maiores teores e estoques de C e N, semelhantes aos resultados observados na VN. Adicionalmente, os sistemas integrados de produção com leguminosas promoveram aumento nos teores e estoques de C em relação à área com cultivo e preparo convencional do solo (MILHO). Os sistemas integrados com uso de leguminosas, apresentaram maiores valores de Cmic, qMIC e atividade da enzima β -glicosidase. Assim, a intensificação do uso do solo com cratília pode promover melhorias na qualidade do solo, com potencial de incremento nos estoques de C e mitigação das emissões de gases do efeito estufa ao longo do tempo.

Palavras-chave: *Cratylia argentea*. Carbono da biomassa microbiana. Matéria orgânica do solo. β -glicosidase. Urease.

4.1.1 Introdução

O Brasil possui papel importante no abastecimento mundial de produtos de origem agropecuária, assim como na provisão de serviços ecossistêmicos (Brasil 2021). A introdução de práticas e sistemas conservacionistas na agropecuária é crescente, uma vez que esse importante segmento da economia tem grande contribuição nas emissões de gases do efeito estufa (GEEs) (IPCC 2021). Nesse sentido, as metas preconizadas no Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+) visam a redução da emissão de carbono equivalente (CO₂ eq) em 1,1 bilhão de toneladas no setor agropecuário até 2030 (Brasil 2021).

A adoção ou manutenção dos sistemas integrados de produção são metas do Plano ABC+, pois trata-se de estratégias sustentáveis e eficientes na mitigação das emissões de GEEs e aumento da produtividade, ao promover a intensificação da produção agrícola, pecuária e florestal (Bieluczyk et al. 2020). A valorização ambiental, social e econômica são reflexos da adoção desses sistemas, em razão do aumento e diversidade da produção, recuperação de pastagens degradadas, maximização de serviços ambientais, aumento da renda, entre outros (Balbino et al. 2019).

Atualmente, há ampla adoção e consolidação dos sistemas integrados de produção, entretanto, ainda são necessários estudos mais direcionados à introdução de componentes versáteis dentro dessas estratégias conservacionistas (Krishnamurthy et al. 2019). Nesse sentido, destaca-se a *Cratylia argentea*, que recebe diferentes nomes populares no Brasil, como cratília, camaratuba ou copada (Queiroz, 2022). A cratília é um arbusto forrageiro, pertencente à família Fabaceae, adaptado às condições de fertilidade do solo e tolerância à seca, e que pode ter diversas contribuições em sistemas de integração, como por exemplo, promover a fixação biológica de nitrogênio e ser utilizada para adubação verde e alimentação animal (Matrangolo et al. 2018).

Adicionalmente, os sistemas integrados podem melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo através do aporte constante de MOS pelos seus componentes produtivos. Esse fato pode ser evidenciado pelo aumento nos teores e estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo (Frazão et al. 2021; Freitas et al. 2020), teores de C lábil (Dhaliwal et al. 2021), C da biomassa microbiana (Almeida et al. 2021), atividade das enzimas β -glicosidase (Pires et al. 2022) e urease (Stieven et al. 2020). Nesse sentido, os indicadores biológicos de qualidade do solo são importantes parâmetros de avaliação, uma vez que possuem maior sensibilidade e apresentam respostas rápidas às mudanças de manejo em determinado ambiente (Zago et al. 2020).

Diante do exposto, e entendendo a necessidade de intensificação e diversificação da produção aliada a melhoria da qualidade do solo, o objetivo deste estudo foi avaliar os estoques de carbono e nitrogênio e os atributos biológicos do solo em dois experimentos com o uso de sistemas integrados com *Cratylia argentea* no bioma cerrado.

4.1.2 Material e métodos

4.1.2.1 Localização e caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado em duas áreas experimentais no bioma Cerrado (Fig. 1). O primeiro experimento foi implantado na Fazenda Experimental da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas-MG ($19^{\circ}27'15.56''\text{S}$ $44^{\circ}10'9.85''\text{W}$). O segundo experimento foi conduzido na Fazenda Santa Rita da Epamig, em Prudente de Morais-MG ($19^{\circ}27'7.45''\text{S}$ $44^{\circ}9'39.85''\text{W}$). O clima foi classificado como Cwa (Köppen), de savana com inverno seco e verão úmido com chuva, com temperatura média anual de $21,4^{\circ}\text{C}$ e precipitação média anual no período de avaliação (2021-2022) de 1549 mm (Fig. 2). O solo predominante nos dois locais avaliados é o Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa.

Fig. 1 Sistemas integrados nos dois experimentos localizados nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Morais, no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.

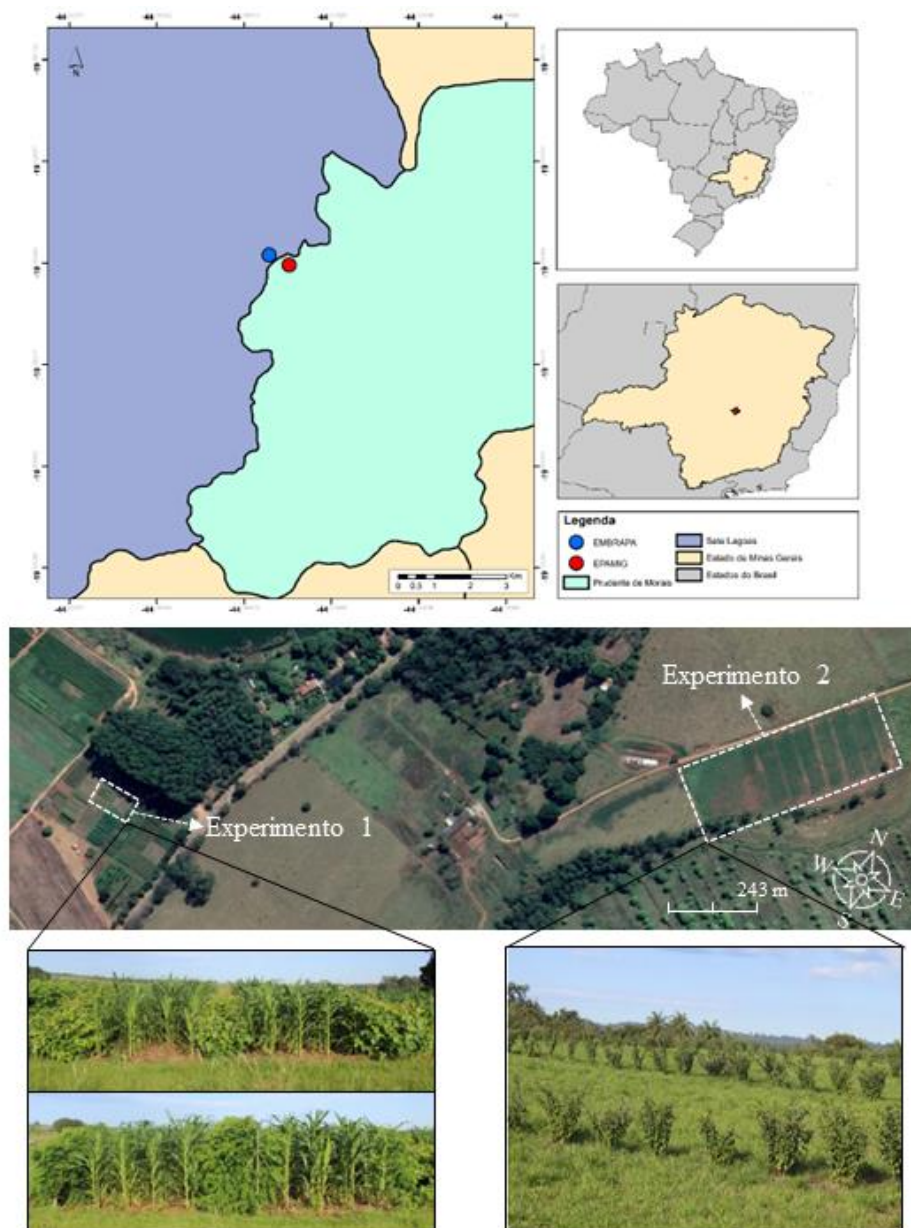
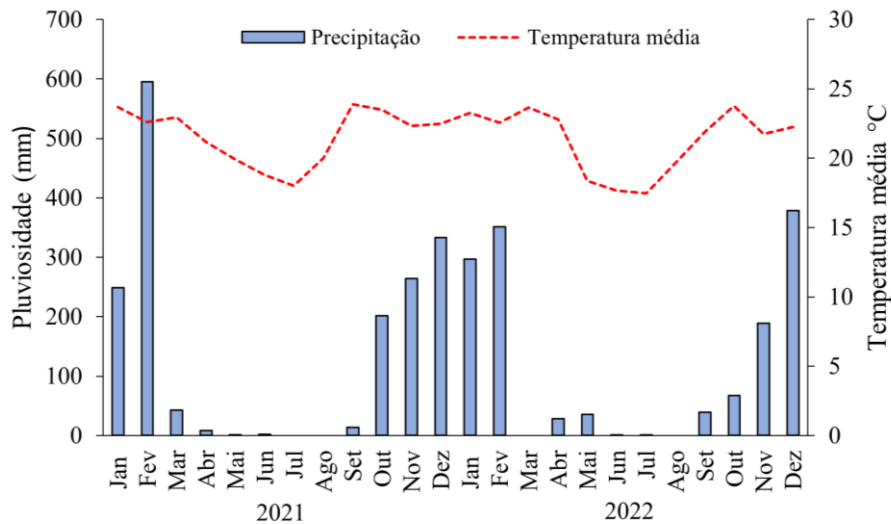


Fig. 2 Precipitação e temperatura média anual no período de avaliação (2021-2022) nas áreas experimentais localizadas nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Morais, no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.



4.1.2.2 Experimento 1: Integração de leguminosas com cultura anual

O experimento 1, localizado na Fazenda Experimental da Embrapa Milho e Sorgo, foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições e cinco sistemas de uso e manejo do solo, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Sistemas de uso e manejo do solo no experimento 1: integração de cratília e gliricídia com cultura anual.

Sistema de uso e manejo do solo	Descrição
VN	Área de referência composta por vegetação nativa típica de Cerrado.
MILHO	Área de cultivo anual de milho, irrigado, com preparo convencional do solo e adubação química.
PAST	Área de pastagem nominal de <i>Urochloa decumbens</i> cv. Basilisk, implantada em 2008, com pastejo de animais e com adubação de manutenção de 100 kg de N, 40 kg de K ₂ O e 50 kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹ ano ⁻¹ em 2015/2016.
CRAT	Sistema integrado de <i>Cratylia argentea</i> com a cultivar de milho BRS Caimbé, irrigado, sem aporte de insumos externos, com adubação verde e cobertura morta com resíduos provenientes da leguminosa.
GLIR	Sistema integrado de <i>Gliricidia sepium</i> com a cultivar de milho BRS Caimbé, irrigado, sem aporte de insumos externos, com adubação verde e cobertura morta com resíduos provenientes da leguminosa.

As áreas com cratília e gliricídia foram implantadas em 2013, com a conversão da área em sistemas integrados de leguminosas arbustivas e milho (Fig. 3). Foram implantados dois sistemas irrigados, com aleias da leguminosa cratília (*Cratylia argentea*) e gliricídia (*Gliricidia sepium*) (Fig. 1), ambos integrados com milho. Cada sistema tem uma área de 160 m², onde foram plantadas três fileiras de cada leguminosa com espaçamento entre linhas de 4 m e entre plantas de 0,5 m (Fig. 4a). Foram realizadas ao longo de cada ano, desde a implantação, de três a quatro podas drásticas das leguminosas, com posterior deposição de folhas e ramos sobre o solo. Nas épocas de plantio do milho, foi realizada a semeadura mecanizada direta sobre a palhada das leguminosas nas faixas de cultivo entre as aleias. O local do estudo não recebe aporte de insumo (adubo solúvel, herbicida, inseticida ou fungicida), desde o plantio das leguminosas. A análise química apresenta as seguintes características: pH em água = 6,6; M.O = 4,13 dag kg⁻¹; P disp = 70,6 mg dm⁻³; K = 224,9 mg dm⁻³; V = 86,7 %; CTC = 10,8 cmol_c dm⁻³.

Fig. 3 Cronossequência do uso e manejo do solo no experimento 1: integração de cratília e gliricídia com cultura anual.

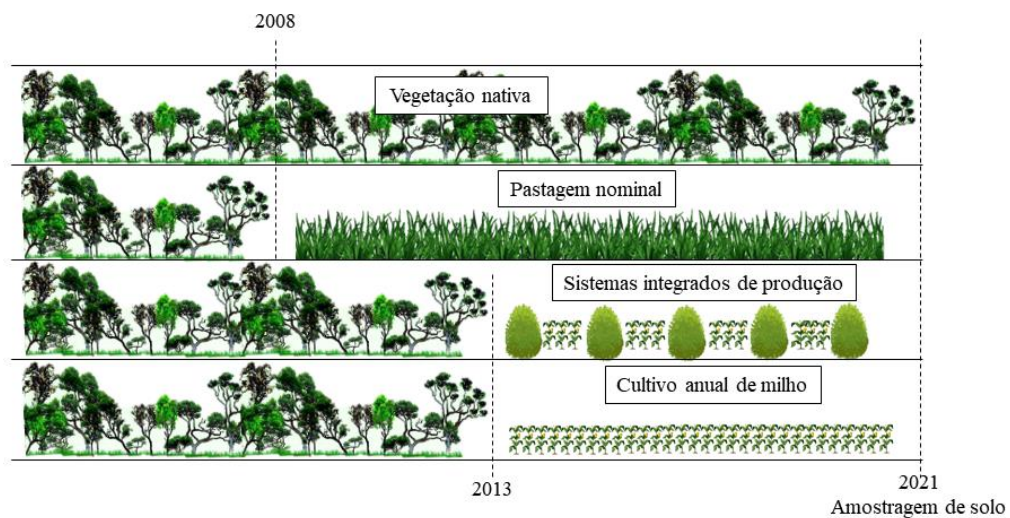
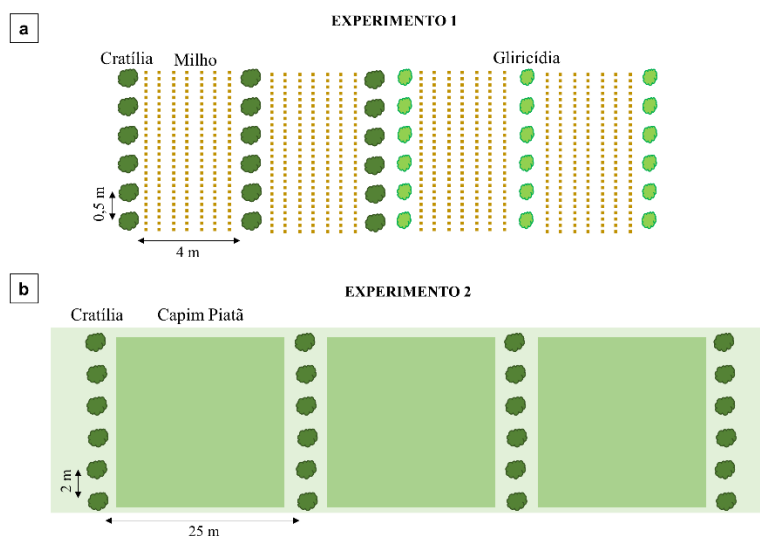


Fig. 4 Esquema dos arranjos dos sistemas integrados de produção com nas duas áreas experimentais no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.



4.1.2.3 Experimento 2: Integração de cratília com pastagem

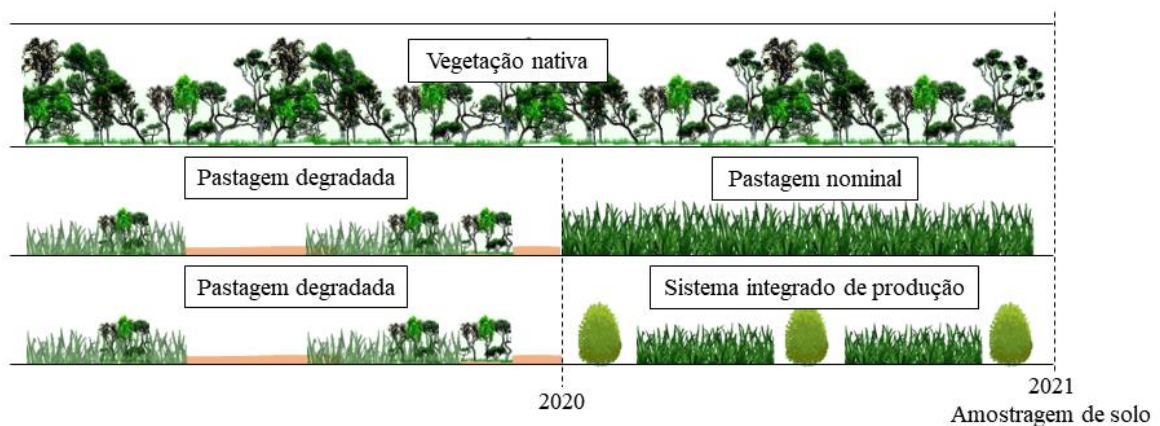
O experimento 2, localizado na Fazenda Santa Rita da Epamig, foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições e três sistemas de uso e manejo do solo, conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Sistemas de uso e manejo do solo no experimento 2: integração de cratília com pastagem.

Sistema de uso e manejo do solo	Descrição
VN	Área de referência composta por vegetação nativa típica de Cerrado
PAST	Área de pastagem nominal de <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Piatã implantada em 2020, junto à ocasião do plantio do sistema integrado.
CRAT	Sistema integrado de <i>Cratylia argentea</i> com <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Piatã, sequeiro, com preparo convencional do solo e adubação.

O sistema integrado e a pastagem foram implantados em janeiro de 2020 (Fig. 5), com a conversão de uma área caracterizada como uma pastagem degradada, por apresentar falhas na cobertura do solo e presença de plantas invasoras. O sistema implantado foi de integração da cratília com o capim piatã (*Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã), em sequeiro (Fig. 1). Em janeiro de 2020, foi realizado o plantio das mudas de cratília em sistema de aleias, espaçadas 25 m entre linhas e 2 m entre plantas (Fig. 4b), com adubação de plantio nas covas com 60 g de NPK (0-30-20). Em março do mesmo ano foi realizado o preparo do solo, com grade aradora e grade niveladora e posterior semeadura do capim piatã. Foi realizada poda de uniformização da cratília em agosto de 2020, e uma poda drástica em maio de 2021. A análise química apresenta as seguintes características: pH em água = 5,5; M.O = 2,8 dag kg⁻¹; P disp = 8,0 mg dm⁻³; K = 56 mg dm⁻³; V = 37 %; CTC = 9,84 cmol_c dm⁻³.

Fig. 5 Cronossequência do uso e manejo do solo no experimento 2: integração de cratília com pastagem.



4.1.2.4 Amostragem do solo e análises laboratoriais

Para determinação dos atributos microbiológicos do solo, foram coletadas amostras de solo em duas épocas de amostragem, dezembro de 2021 (período chuvoso) e julho de 2022 (período seco). Foram abertas mini trincheiras de 40 x 40 x 40 cm, e coletadas amostras simples de solo nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, em quatro repetições. Nos sistemas integrados foram coletadas amostras nas linhas e entrelinhas das leguminosas para obtenção de amostras compostas, a fim de garantir a representatividade. A amostragem para determinação dos teores e estoques de C e N do solo foi realizada em julho de 2022, também em mini trincheiras, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. Adicionalmente, amostras de solo foram coletadas para determinação da densidade do solo, utilizando o método do anel volumétrico (Blake e Hartge, 1986).

Para determinação dos teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), as amostras de solo foram previamente secas ao ar, passadas por peneiras em 2 mm, moídas, passadas novamente em peneiras de 0,150 mm e, posteriormente analisadas por combustão seca utilizando um analisador elementar (Leco CN-2000®, St. Joseph, MI, EUA). Com os valores obtidos, calculou-se a relação C:N.

Os estoques de COT e NT (Mg ha^{-1}) foram obtidos a partir da multiplicação desses elementos (%) pela densidade (g cm^{-3}) e espessura da camada de solo amostrada (cm). Posteriormente, os estoques de COT e NT foram corrigidos para a mesma massa de solo da área de referência (vegetação nativa) de acordo com a metodologia proposta por Ellert e Bettany (1995) e Moraes et al. (1996).

Para análise do carbono lábil do solo, as amostras foram secas ao ar, moídas e passadas por peneiras com malha de 0,150 mm, para determinação do teor de C oxidado por KMnO_4 segundo metodologia descrita por Shang e Tiessen (1997). O carbono da biomassa microbiana do solo (C_{mic}) foi quantificado pelo método da fumigação-extração proposto por Vance et al. (1987) e Silva et al. (2007). O quociente microbiano (q_{Mic}) foi estimado pela relação entre o C_{mic} e o COT. Para quantificação da atividade da enzima β -glicosidase foi utilizada a metodologia proposta por Tabatabai (1994), que se baseia na determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado por essas enzimas assim que o solo é incubado com uma solução tamponada de substrato específico. A atividade da enzima urease foi estimada conforme metodologia sugerida por Keeney e Nelson (1982), modificada por Kandeler e Gerber (1988). O método é baseado no princípio da determinação do N-NH_4^+ liberado após incubação do solo com solução tamponada e ureia.

4.1.2.5 Análise de dados

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificar a ocorrência de distribuições normais, e ao teste de Bartlett para verificar a homogeneidade de variâncias. Como as hipóteses de normalidade e homogeneidade não foram validadas para os teores e estoques de C e N, optou-se pelo uso de estatística não paramétrica para essas variáveis. Assim, foi aplicado o teste Kruskal-Wallis ($p < 0.05$). Para os atributos de qualidade do solo, as coletas foram realizadas em parcelas subdivididas, sendo os usos do solo distribuídos nas parcelas e as épocas de amostragem nas subparcelas. Para estes atributos as hipóteses foram validadas, portanto, foi realizada análise de variância (ANOVA) e, posteriormente, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância. Como complemento realizou-se

também análise de componentes principais (CPA) com elipses de confiança com intervalo de 95%. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R, versão 4.2.3 (R Core Team 2023).

4.1.3 Resultados

4.1.3.1 Densidade do solo, teores e estoques de C e N

No experimento 1, a densidade do solo foi influenciada pelo uso do solo nas camadas de 5-10 cm e 20-30 cm de profundidade (Tabela 3). Os menores valores para essas camadas foram para o tratamento com cultivo convencional de milho (MILHO).

Tabela 3. Densidade do solo sob diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

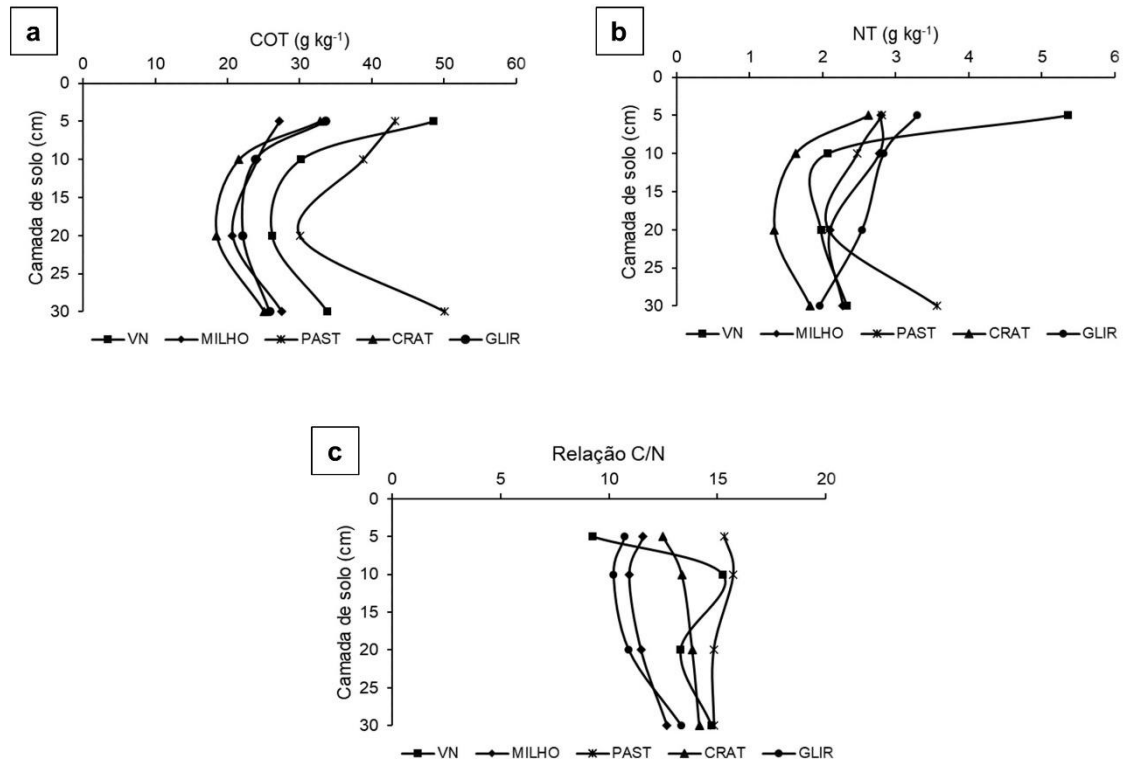
^a Usos do solo	Camadas do solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
VN	^b 0,94 A	1,04 A	1,00 A	1,02 B
MILHO	0,92 A	0,81 B	0,85 A	0,73 D
PAST	1,07 A	1,13 A	1,05 A	1,07 A
CRAT	1,03 A	1,04 A	1,03 A	1,00 C
GLIR	0,96 A	1,05 A	1,03 A	0,98 C

^aVN: vegetação nativa; MILHO: plantio convencional de milho; PAST: pastagem de *U. decumbens* cv. Basilisk; CRAT: Sistema integrado de *Cratylia argentea* com milho; GLIR: Sistema integrado de *Gliricidia sepium* com milho.

^b Os valores representam a média (n=4). Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Kruskal-Wallis ($p < 0.05$).

Os teores de COT foram influenciados pelo uso do solo em todas as camadas avaliadas (Fig. 6a), e todas as áreas manejadas apresentaram valores inferiores à VN (48,58 g kg⁻¹). Para os sistemas agrícolas, na camada de 0-5 cm, foram observados valores superiores na PAST (43,18 g kg⁻¹). Os sistemas integrados CRAT (32,83 g kg⁻¹) e GLIR (33,55 g kg⁻¹) não diferiram estatisticamente, e por sua vez, foram superiores ao MILHO (27,18 g kg⁻¹). Para as camadas seguintes, os maiores valores foram observados para a pastagem, entre 30,03 g kg⁻¹ e 50,10 g kg⁻¹. Os sistemas integrados apresentaram menores teores de COT assim como a área de plantio de milho. Os valores de NT (Fig. 6b) apresentaram diferenças significativas apenas para a camada 0-5 cm, na qual os sistemas agrícolas diferenciam-se da VN. A relação C/N (Fig. 6c) não apresentou diferenças significativas entre os usos do solo para nenhuma das camadas avaliadas.

Fig. 6 Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo e relação carbono nitrogênio (C/N) em diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.



Os resultados dos estoques de C (Tabela 4) também foram diferentes entre os sistemas de uso do solo para todas as camadas. Na camada 0-5 cm, a PAST apresentou valor superior aos demais tratamentos, e não diferiu significativamente da VN. Os sistemas integrados apresentaram maiores estoques de C em relação ao MILHO. Para a pastagem, nas camadas 5-10 cm e 10-20 cm os valores foram superiores em relação aos demais tratamentos. Já para a camada 20-30 cm, os sistemas integrados apresentaram valores inferiores aos sistemas MILHO e PAST. Apenas para PAST foram observados estoques totais de C semelhantes à VN. Estes usos do solo foram superiores, em média, 35,84 Mg ha⁻¹ aos demais sistemas avaliados.

Tabela 4 Estoques de carbono e nitrogênio sob diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

^a Usos do solo	Camadas do solo (cm)				Total
	0-5	5-10	10-20	20-30	
Estoque de C (Mg ha⁻¹)					
VN	^b 22,73 A	15,71 B	26,23 B	34,59 A	99,26 A
MILHO	12,46 C	9,73 D	17,67 C	33,98 A	73,84 B
PAST	23,15 A	22,01 A	31,65 A	42,89 A	119,70 A
CRAT	16,31 B	11,48 C	19,29 C	23,62 B	70,71 B
GLIR	15,12 B	12,46 C	23,29 B	25,46 B	76,33 B
Estoque de N (Mg ha⁻¹)					
VN	2,51 A	1,08 A	1,98 A	2,39 A	7,95 A
MILHO	1,28 B	1,12 A	1,80 A	2,81 A	7,01 A
PAST	1,51 B	1,40 A	2,19 A	3,06 A	8,16 A
CRAT	1,31 B	0,87 A	1,40 A	1,26 B	4,83 B
GLIR	1,49 B	1,48 A	2,67 A	2,50 A	8,14 A

^aVN: vegetação nativa; MILHO: plantio convencional de milho; PAST: pastagem de *U. decumbens* cv. Basilisk; CRAT: Sistema integrado de *Cratylia argentea* com milho; GLIR: Sistema integrado de *Gliricidia sepium* com milho. ^b Os valores representam a média (n=4). Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Kruskal-Wallis (p<0.05).

Os estoques de N (Tabela 4) foram influenciados pelos diferentes usos do solo apenas para as camadas 0-5 cm e 20-30 cm. Para a camada superficial (0-5 cm), os sistemas de manejos avaliados não diferiram entre si, com valores inferiores em relação à VN. A diferença para o estoque de N da vegetação nativa em relação aos outros manejos foi superior em média 1,1 Mg ha⁻¹. Na camada 20-30 cm, observou-se menores valores de N no sistema CRAT. Quando comparados os estoques totais de N na camada 0-30 cm, apenas o sistema CRAT se diferiu dos demais usos do solo apresentando valores menores.

No experimento 2 não foi observada diferença significativa para a densidade do solo entre os usos do solo avaliados para nenhuma camada (Tabela 5).

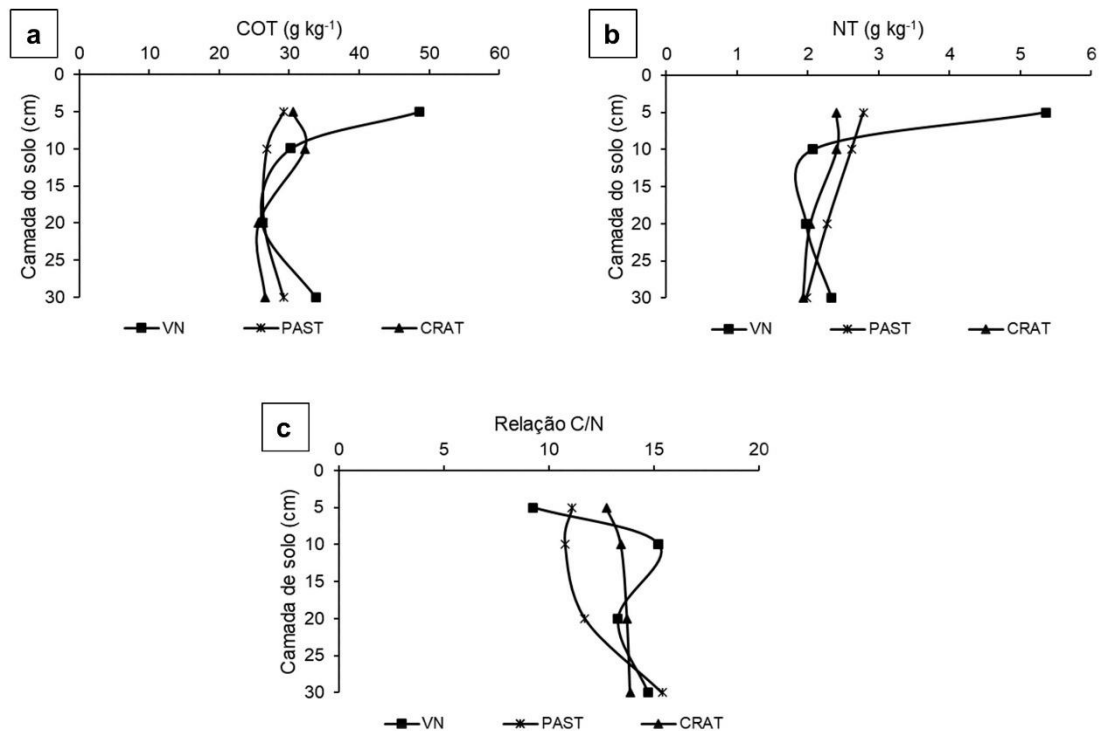
Tabela 5. Densidade do solo sob diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.

^a Usos do solo	Camadas do solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
VN	^b 0,93	1,04	1,00	1,02
PAST	1,01	0,99	1,00	0,98
CRAT	1,08	1,04	1,00	0,97

^a VN: vegetação nativa; PAST: pastagem de *U. brizantha* cv. BRS Piatã; CRAT: Sistema integrado de *Cratylia argentea* com *U. brizantha* cv. BRS Piatã. ^b Os valores representam a média (n=4). De acordo com o teste Kruskal-Wallis (p<0.05) não houve diferença significativa entre as médias.

Os teores de COT (Fig. 7a) foram influenciados pelos diferentes usos do solo apenas na camada 0-5 cm. Não houve diferença significativa entre a pastagem e o sistema integrado com cratília. Foi observado maior valor para a vegetação nativa (48,57 g kg⁻¹) em relação à pastagem (29,20 g kg⁻¹) e ao sistema CRAT (30,52 g kg⁻¹). Os teores de NT (Fig. 7b) seguiram o mesmo padrão que o COT, uma vez que os sistemas apresentaram diferença significativa apenas para a camada 0-5 cm. Os manejos PAST e CRAT não diferiram entre si, com valores observados de 2,78 g kg⁻¹ e 2,39 g kg⁻¹, respectivamente. Esses sistemas apresentaram valores inferiores à vegetação nativa (5,36 g kg⁻¹). A diferença entre os usos do solo não foi significativa para a relação C/N (Fig. 7c), em nenhuma camada avaliada.

Fig. 7 Teor de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo e relação carbono nitrogênio (C/N) em diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.



As diferenças entre os estoques de C do solo (Tabela 6) foram significativas para as camadas 0-5 cm e 20-30 cm. Em ambas as camadas os manejos PAST e CRAT não apresentaram diferença significativa entre eles. Entretanto, para a camada 0-5 cm foram observados valores inferiores em relação à vegetação nativa, para os dois usos do solo, já para a camada 20-30 cm apenas o sistema CRAT foi inferior à VN. Os estoques de N (Tabela 6) foram diferentes entre os usos do solo apenas na camada 0-5 cm. A vegetação nativa diferiu dos demais tratamentos com maior estoque observado. Quando avaliados os estoques totais de C e N na camada 0-30 cm, os diferentes usos do solo não apresentaram diferença significativa entre si.

Tabela 6 Estoques de carbono e nitrogênio em diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.

^a Usos do solo	Camadas do solo (cm)				
	0-5	5-10	10-20	20-30	Total
Estoque de C (Mg ha⁻¹)					
VN	^b 22,73 A	15,71 A	26,23 A	34,59 A	99,26 A
PAST	14,79 B	13,38 A	26,48 A	29,25 AB	83,89 A
CRAT	16,63 B	17,11 A	25,86 A	24,69 B	84,30 A
Estoque de N (Mg ha⁻¹)					
VN	2,51 A	1,08 A	1,98 A	2,39 A	7,95 A
PAST	1,41 B	1,31 A	2,28 A	1,98 A	6,98 A
CRAT	1,31 B	1,28 A	2,05 A	1,80 A	6,44 A

^a VN: vegetação nativa; PAST: pastagem de *U. brizantha* cv. BRS Piatã; CRAT: Sistema integrado de *Cratylia argentea* com *U. brizantha* cv. BRS Piatã. ^b Os valores representam a média (n=4). Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Kruskal-Wallis (p<0.05).

4.1.3.2 Atributos biológicos de qualidade do solo

O resumo da análise de variância para o experimento 1 pode ser consultado na Tabela 7. Os efeitos de interação entre os usos do solo e épocas de amostragem foram observados na camada 0-5 cm para todos os atributos de qualidade, exceto para qMIC. Para a camada 5-10 cm, a interação foi significativa para qMIC e urease, enquanto na camada de 10-20 cm apenas para urease. Quando não houve interação significativa, os efeitos simples de uso do solo e/ou época foram avaliados de forma independente.

Tabela 7. Resumo da análise de variância para os atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

FV ^a	Atributos de qualidade do solo ^b														
	Cmic			qMIC			CL			urease			β-glicosidase		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
U	ns	*	*	ns	ns	ns	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns
E	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
UxE	*	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns

^a FV: fonte de variação; U: usos do solo; E: épocas de amostragem. ^b cmic: carbono da biomassa microbiana; qMIC: quociente microbiano; CL: carbono lábil; urease: atividade da enzima urease; β-glicosidase: atividade da enzima β-glicosidase. ns: não significativo. * Significativo ao nível de 0,05 pelo teste F.

Os maiores teores de Cmic (Tabela 8) foram observados na camada 0-5 cm do tratamento PAST em dezembro/2021, e quando avaliados os efeitos simples de usos do solo para as camadas 5-10 cm e 10-20 cm. Para o qMIC, somente a VN diferiu dos demais manejos, quando avaliada em dezembro/2021, se apresentando menor valor na camada 5-10 cm. Estes dois atributos (Cmic e qMIC) apresentaram maiores valores para a amostragem em dezembro/2021. Foi observada diferença significativa entre os usos do solo para CL, apenas na camada 0-5 cm, na qual a VN apresentou maior teor em relação aos demais manejos. De forma geral, os maiores teores de CL foram observados na amostragem de julho/2022. Resultados parecidos também foram observados para a atividade de urease entre as épocas de amostragem. Para a camada 0-5 cm, a menor atividade dessa enzima foi observada para o MILHO, sendo que os demais usos do solo não diferiram entre si. Para as camadas 5-10 cm e 10-20 cm, os maiores valores foram observados para PAST. Já para atividade da enzima β -glicosidase os maiores valores foram observados para o sistema GLIR, seguido pelo sistema CRAT.

Tabela 8. Atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizados no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

(continua)

Usos do solo ^a	Camada do solo (cm)								
	0-5			5-10			10-20		
	Dez	Jul	média ^c	Dez	Jul	média	Dez	Jul	média
Cmic (mg kg⁻¹)									
VN	398 Ba ^b	269 Aa	333	257	182	219 B	199	113	156 B
MILHO	424 Ba	204 Ab	314	340	115	227 B	227	72	149 B
PAST	708 Aa	218 Ab	463	479	246	362 A	424	183	303 A
CRAT	481 Ba	110 Ab	296	367	63	215 B	297	50	173 B
GLIR	368 Ba	154 Ab	261	339	90	215 B	297	66	182 B
média^d	476	191		356 A	139 B		289 A	97 B	
qMIC (%)									
VN	0,82	0,55	0,68	0,87 Ba	0,62 Aa	0,75	0,74	0,44	0,59
MILHO	1,58	0,75	1,17	1,42 Aa	0,48 Ab	0,95	1,15	0,35	0,75
PAST	1,64	0,51	1,07	1,24 Aa	0,63 Ab	0,93	1,42	0,61	1,01
CRAT	1,49	0,34	0,91	1,69 Aa	0,29 Ab	0,99	1,62	0,27	0,95
GLIR	1,10	0,46	0,78	1,42 Aa	0,37 Ab	0,89	1,37	0,31	0,84
média	1,33 A	0,52 B		1,33	0,48		1,26 A	0,39 B	
CL (g kg⁻¹)									
VN	1,43 Ab	3,85 Aa	2,64	0,98	1,84	1,41 B	0,79	1,75	1,27
MILHO	1,21 Ab	2,67 Ba	1,94	0,97	2,08	1,53 B	0,67	1,58	1,13
PAST	1,60 Ab	3,06 Ba	2,33	1,26	2,62	1,94 A	0,83	1,52	1,17
CRAT	1,40 Ab	2,80 Ba	2,10	0,75	1,70	1,22 B	0,46	1,26	0,86
GLIR	1,31 Ab	3,06 Ba	2,18	0,88	1,90	1,39 B	0,52	1,55	1,04
média	1,39	3,09		0,97 B	2,03 A		0,66 B	1,53 A	

Tabela 8. Atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 1, localizados no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

(conclusão)

Usos do solo ^a	Camada do solo (cm)								
	0-5			5-10			10-20		
	Dez	Jul	média ^c	Dez	Jul	média	Dez	Jul	média
Urease ($\mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{2 h}^{-1}$)									
VN	126 Ab	270 Aa	198	101 Ab	172 Ba	136	71 Ab	159 Ba	115
MILHO	101 Ab	113 Ba	107	32 Aa	78 Ca	55	18 Ba	38 Ca	28
PAST	94 Ab	261 Aa	178	59 Ab	242 Aa	150	97 Ab	302 Aa	199
CRAT	99 Ab	271 Aa	185	36 Aa	77 Ca	56	19 Ba	27 Ca	23
GLIR	125 Ab	224 Aa	175	47 Aa	67 Ca	57	20 Ba	21 Ca	21
média	109	228		55	127		45	109	
β-glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)									
VN	134 Aa	136 Ca	135	75	47	61 B	47	36	41
MILHO	140 Aa	198 Ba	169	59	91	75 B	38	34	36
PAST	176 Aa	153 Ca	164	75	86	81 B	48	25	37
CRAT	189 Aa	221 Ba	205	88	62	75 B	59	26	42
GLIR	178 Ab	350 Aa	264	104	124	114 A	61	46	53
média	163	212		80	82		51 A	33 B	

^a VN: vegetação nativa; MILHO: plantio convencional de milho; PAST: pastagem de *U. decumbens* cv. Basilisk; CRAT: Sistema integrado de *Cratylia argentea* com milho; GLIR: Sistema integrado de *Gliricidia sepium* com milho. ^b Os valores representam a média (n=4). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, em uma mesma profundidade e para cada variável, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. ^c Os valores representam a média dos usos do solo para as duas épocas de amostragem. ^d Os valores representam a média das duas épocas de amostragem para todos os usos do solo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (usos do solo) e na linha (épocas), não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

O resumo da análise de variância para o experimento 2 pode ser consultado na Tabela 9. Na camada 0-5 cm não foi observada interação entre os usos do solo e épocas de amostragem apenas para a β -glicosidase. As interações foram significativas para Cmic e β -glicosidase na camada 5-10 cm do solo, entretanto, na camada 10-20 cm não foram observadas interações para nenhum dos atributos de qualidade. Para os atributos e profundidades nas quais não foram observadas interações, os usos do solo e/ ou épocas de amostragem foram avaliados de forma independente.

Tabela 9. Resumo da análise de variância para os atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizados no município de Prudente de Moraes, Minas Gerais, Brasil.

FV ^a	Atributos de qualidade do solo ^b														
	Cmic			qMIC			CL			Urease			β-glicosidase		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
U	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*	ns	*	*
E	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	ns	ns
UxE	*	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	ns	*	ns

^a FV: fonte de variação; U: usos do solo; E: épocas de amostragem. ^b cmic: carbono da biomassa microbiana; qMIC: quociente microbiano; CL: carbono lábil; urease: atividade da enzima urease; β-glicosidase: atividade da enzima β-glicosidase. ns: não significativo. * Significativo ao nível de 0,05 pelo teste F.

O Cmic apresentou diferença significativa entre os usos do solo apenas para a camada 5-10 cm quando avaliada em dezembro/2021, com menor teor observado para VN em relação aos demais manejos (Tabela 10). Para o qMIC foram observados resultados semelhantes, entretanto, com menor valor observado para VN na camada 0-5 cm do solo. Estes atributos, de forma geral, apresentaram maiores valores para a amostragem ocorrida em dezembro/2021. Para o CL, foi observado maior valor para VN na camada 0-5 cm quando avaliada em julho/2022. Resultados semelhantes foram observados para a atividade da enzima urease. A maior atividade da enzima β-glicosidase foi observada nos sistemas PAST e CRAT para as camadas de 5-10 cm e 10-20 cm do solo.

Tabela 10. Atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizados no município de Prudente de Moraes, Minas Gerais, Brasil.

(continua)

Usos ^a do solo	Camada do solo (cm)								
	0-5			5-10			10-20		
	Dez	Jul	média ^c	Dez	Jul	média	Dez	Jul	média
	Cmic (mg kg⁻¹)								
VN	398 Aa ^b	269 Ab	333	257 Ba	182 Aa	219	199	113	156
PAST	596 Aa	144 Ab	370	396 Aa	132 Ab	264	339	93	216
CRAT	566 Aa	182 Ab	374	495 Aa	154 Ab	324	368	109	238
média^d	520	198		383	156		302 A	105 B	
	qMIC (%)								
VN	0,82 Ba	0,55 Aa	0,68	0,87	0,62	0,75	0,74	0,44	0,59
PAST	2,09 Aa	0,52 Ab	1,30	1,56	0,51	1,03	1,41	0,37	0,89
CRAT	1,84 Aa	0,59 Ab	1,22	1,65	0,48	1,06	1,47	0,42	0,94
média	1,58	0,55		1,36 A	0,54 B		1,21 A	0,41 B	

Tabela 10. Atributos de qualidade do solo em diferentes épocas de amostragem e diferentes sistemas de uso do solo no Experimento 2, localizados no município de Prudente de Morais, Minas Gerais, Brasil.

(conclusão)

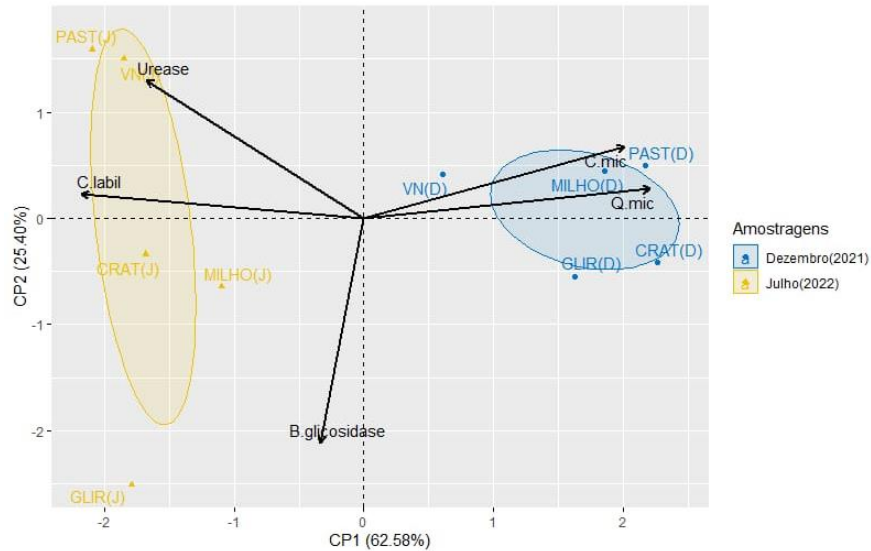
Usos ^a do solo	Camada do solo (cm)								
	0-5			5-10			10-20		
	Dez	Jul	média ^c	Dez	Jul	média	Dez	Jul	média
CL (g kg⁻¹)									
VN	1,43 Ab	3,85 Aa	2,64	0,98	1,84	1,41	0,79	1,75	1,27
PAST	1,05 Ab	2,15 Ba	1,60	0,81	1,80	1,30	0,75	1,81	1,28
CRAT	0,90 Ab	2,25 Ba	1,57	0,88	2,29	1,58	0,76	2,05	1,41
média	1,13	2,75		0,89 B	1,98 A		0,77 B	1,87 A	
Urease (µg NH₄⁺ g⁻¹ 2 h⁻¹)									
VN	126 Ab	270 Aa	198	101	172	136 A	71	159	115 A
PAST	73 Ab	149 Ba	111	56	107	81 B	43	89	66 B
CRAT	70 Ab	127 Ba	98	47	90	69 B	38	69	53 B
média	90	182		68 B	123 A		51 B	106 A	
β-glicosidase (µg pNP g⁻¹ h⁻¹)									
VN	134	136	135	75 Aa	47 Ba	61	47	36	41 B
PAST	111	169	140	113 Aa	98 Aa	105	68	82	75 A
CRAT	124	173	149	84 Ab	121 Aa	103	79	82	80 A
média	123 B	159 A		91	89		65	67	

^aVN: vegetação nativa; PAST: pastagem de *U. brizantha* cv. BRS Piatã; CRAT: Sistema integrado de *Cratylia argentea* com *U. brizantha* cv. BRS Piatã. ^bOs valores representam a média (n=4). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, em uma mesma profundidade e para cada variável, não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. ^cOs valores representam a média dos usos do solo para as duas épocas de amostragem. ^dOs valores representam a média das duas épocas de amostragem para todos os usos do solo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (usos do solo) e na linha (épocas), não apresentam diferença estatística entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Para o experimento 1, apenas os dois primeiros componentes principais explicaram 87,98% da variabilidade dos dados (Fig. 8), onde os componentes 1 e 2 explicaram 62,58% e 25,40%, respectivamente, para as duas épocas de amostragem na camada 0-20 cm do solo. Os sistemas de usos do solo apresentaram menores diferenças entre si, quando avaliados em dezembro. As variáveis Cmic e qMIC se correlacionaram positivamente entre si. Ao mesmo tempo que esses atributos foram negativamente correlacionados com a atividade da enzima urease e o CL. Foram observados maiores valores de Cmic e qMIC para PAST na amostragem do solo realizada em dezembro. O CL e a atividade da enzima urease foram maiores para VN,

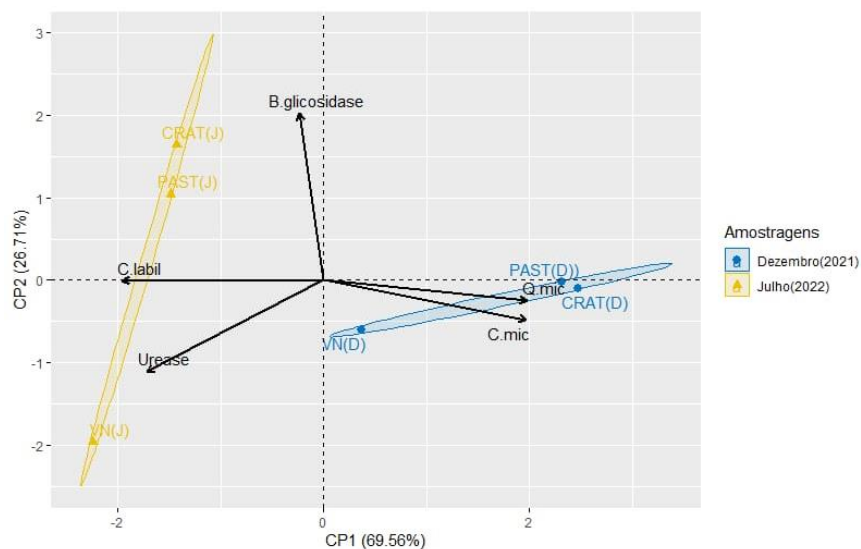
PAST e CRAT, enquanto a atividade da enzima β -glicosidase foi maior para GLIR, quando amostrados em julho.

Fig. 8 Relação entre o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) discriminando diferentes sistemas de manejo e uso da terra segundo os atributos biológicos de qualidade do solo na camada 0-20 cm, no Experimento 1, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.



Para o experimento 2, apenas os dois primeiros componentes principais explicaram 96,27% da variabilidade dos dados (Fig. 9), onde os componentes principais 1 e 2 explicaram 69,56% e 26,71%, respectivamente, para as duas épocas de amostragem na camada 0-20 cm do solo. Os maiores valores de Cmic e qMIC foram observados para PAST e CRAT avaliados em dezembro, sendo correlacionados positivamente entre si. O CL e a atividade da enzima urease foram maiores em VN, enquanto a atividade da enzima β -glicosidase foi maior para o sistema CRAT, na amostragem do mês de julho.

Fig. 9 Relação entre o componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) discriminando diferentes sistemas de manejo e uso da terra segundo os atributos biológicos de qualidade do solo na camada 0-20 cm, no Experimento 2, localizado no município de Prudente de Moraes, Minas Gerais, Brasil.



4.1.4 Discussão

4.1.4.1 Densidade do solo, teores e estoques de C e N

No experimento 1, os menores valores de densidade do solo para a área de plantio convencional de milho (Tabela 3) podem ser relacionados ao preparo do solo, uma vez que o revolvimento promove a maior desagregação nas camadas superficiais (Schaffrath et al. 2008). De forma geral, os demais manejos apresentaram valores de densidade do solo próximos aqueles da vegetação nativa, o que pode ser atribuído a deposição de resíduos e a cobertura vegetal, que contribuem para melhoria das propriedades físicas do solo (Ketema e Yemer 2014).

Os teores de COT para a pastagem não apresentaram diferença significativa em relação à VN na camada 0-5 cm (Fig. 6), sendo superior nas demais camadas, resultado que pode ser explicado pela presença de sistema radicular abundante e extenso, além da produção de exsudatos (Chen et al. 2017; Silva et al. 2022). Diversos estudos relataram maiores contribuições das forrageiras do gênero *Urochloa* para o incremento de C nas camadas superficiais do solo (Sarto et al. 2020; Freitas et al. 2020; Almeida et al. 2021). Neste estudo, a presença das leguminosas nos sistemas integrados contribuíram para obtenção de maiores teores de COT em relação a área de monocultivo de milho. O material vegetal proveniente das podas das leguminosas dos sistemas integrados que são posteriormente depositados sobre o solo, promove a maior cobertura e fornecimento de biomassa. Hazra et al. (2019), em estudo de longo prazo, observaram declínio do COT com adoção do cultivo contínuo de cereais, sendo a integração com leguminosas uma boa prática para melhoria dos estoques de COT e agregação do solo, uma vez que o maior fornecimento de biomassa contribui para maior aporte de MOS. Os manejos do solo apresentaram teores similares de NT e relação C/N para todas as camadas (Fig. 6). De acordo com Barros et al (2020), os sistemas integrados de produção com utilização de leguminosas como componentes, podem promover aporte de N no solo em decorrência da simbiose de bactérias diazotróficas com as raízes dessas plantas.

Os estoques de C e N seguiram os mesmos padrões observados para os teores, de forma que as maiores médias foram observadas na pastagem, diferindo daqueles encontrados para os sistemas integrados com as leguminosas (Tabela 4). Resultados diferentes foram observados por López-Santiago et al. (2019) entre um sistema silvipastoril composto por *Leucaena leucocephala* e *Panicum maximum*, que armazenou quantidades de C no solo semelhantes à vegetação nativa. Entretanto, as variações no armazenamento de C e N são influenciadas diretamente pelas condições edafoclimáticas locais, textura do solo, histórico de uso, idade do sistema, entradas e saídas de material orgânico (Aryal et al. 2015; López-Santiago et al. 2019).

No experimento 2, a densidade do solo para os sistemas de manejo PAST e CRAT similares à vegetação nativa (Tabela 5) evidenciam que manejos com aporte de resíduos e cobertura vegetal contínua, contribuem para a melhoria física do solo (Ketema e Yemer 2014).

Os teores de COT e NT, foram influenciados pelos manejos apenas para na camada 0-5 cm, com maiores valores observados para a vegetação nativa (Fig. 7). Esse resultado pode ser atribuído a entrada de resíduos orgânicos de forma contínua e diversificada no sistema natural (Ribeiro et al. 2019).

Os estoques de C e N do sistema CRAT foram semelhantes ao observado para a pastagem (Tabela 6), e embora inferior àquele encontrado para a vegetação nativa, evidencia potencial dos sistemas integrados

assim como de pastagens bem manejadas no sequestro de C no solo, uma vez que se trata de sistemas com curto prazo de implantação. Resultados promissores com a introdução de leguminosas em sistemas integrados também foram observados por Coser et al. (2018), em sistema composto por *Gliricidia sepium*, milho e *Panicum maximum* no cerrado, com estoque de 66,5 Mg ha⁻¹ de C na camada 0-40 cm do solo, após dois anos da implantação do sistema.

4.1.4.2 Atributos biológicos de qualidade do solo

No experimento 1, os valores de Cmic foram maiores na pastagem para a camada de 0-5 cm em dezembro (Tabela 8). As pastagens de *Urochloa* spp. quando bem manejadas aumentam a biomassa microbiana na rizosfera, uma vez que possuem abundante e volumoso sistema radicular, com contínua renovação (Alves et al. 2011). Além das características da forrageira, o pastejo animal também contribui para o aumento no carbono da biomassa microbiana, que segundo Silva et al. (2015), ocorre devido a uma série de fatores específicos, como a deposição de urina e fezes. No experimento 2, os teores de Cmic foram superiores na camada 5-10 cm do solo para PAST e CRAT em relação à vegetação nativa na avaliação em dezembro (Tabela 10). De acordo com Lira Júnior et al. (2020), sistemas silvipastoris com leguminosas arbustivas aumentam o Cmic principalmente na estação chuvosa com aumento da atividade dos microrganismos e consequente intensificação da decomposição da serapilheira. Esses mesmos autores observaram valores médios para Cmic de 700 mg kg⁻¹ em sistemas compostos pelas leguminosas, sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) e gliricídia, integrados com *U. decumbens* em período chuvoso.

Os valores de qMIC por serem diretamente relacionados aos teores de carbono da biomassa microbiana, tendem a apresentar redução no período de menor umidade do solo. Esse importante índice é utilizado para avaliação da qualidade da matéria orgânica nos sistemas de manejo. Em situações estressantes para os microrganismos do solo, a capacidade de utilização de C é menor, o que acarreta o decréscimo do qMIC, da mesma forma que a adição de MOS de qualidade promove o incremento da biomassa microbiana e consequentemente do qMIC, ainda que os conteúdos de COT não se alterem (Reis Junior e Mendes, 2007). Visto isso, a integração com as leguminosas pode ter contribuído para os valores observados (Tabelas 8 e 10), seja pela adubação verde e fixação biológica de N₂, ou pela deposição de cobertura morta, prática de manejo adotada no experimento 1.

Os menores teores de CL observados na camada 0-5 cm (Tabela 8) para os sistemas de manejo, quando comparados à VN (Experimento 1), podem ser relacionados à MOS no ambiente nativo, onde tem menor interferência antrópica e a constante e diversificada deposição de resíduos na superfície do solo (Oliveira et al. (2018). A constante cobertura do solo também pode explicar o maior teor de CL observada para PAST na camada 5-10 cm, corroborando com os resultados encontrados para o Cmic. Espera-se maiores teores de CL para a estação chuvosa, entretanto, os maiores valores foram encontrados para a estação seca. Brito et al. (2019) também observaram maiores valores de CL na estação seca para todos os manejos avaliados, e atribuíram o resultado à serapilheira acumulada no solo, proveniente da perda de folhas pelas plantas nesse período, o que promove o aumento da matéria orgânica e mantém a umidade do solo. No ano de 2022 ocorreram chuvas atípicas nos meses de abril e maio (Fig. 2), próximas a época de amostragem ocorrida em julho, o que pode explicar os resultados encontrados. Além disso, os sistemas de cultivo podem

ter sido influenciados pela irrigação no Experimento 1. A maior umidade do solo proporciona maior acúmulo de massa verde que posteriormente é convertida em material vegetal e depositado sobre o solo, influenciando no aporte de CL (Loss et al. 2013). Adicionalmente, a época de adubação verde nos sistemas integrados, realizada através da poda e deposição sobre o solo dos resíduos vegetais das leguminosas, também pode ter influenciado no resultado observado. A amostragem do solo realizada em dezembro de 2021 ocorreu nove meses após a última poda e deposição de resíduos como cobertura morta, enquanto a amostragem de julho de 2022 ocorreu cinco meses após o manejo. A cobertura morta possibilita maior deposição de materiais ricos em C prontamente acessível na superfície do solo, o que incrementa os teores de CL nessas áreas (Ansari et al. 2022)

No experimento 2 foram observados os mesmos padrões (Tabela 10). As chuvas atípicas ocorridas próximas à época de amostragem de julho podem ter contribuído para o aumento dos teores de CL, assim como observado para o experimento 1. A entrada de animais nos sistemas de manejo avaliados próxima à época de amostragem ocorrida em julho, também pode ter contribuído para os maiores valores observados neste período. Os resíduos animais podem fornecer matéria orgânica lábil mais facilmente disponível, além do pastejo que pode estimular o crescimento, renovação do sistema radicular e exsudatos radiculares das forrageiras (Vargas et al. 2015).

Os resultados da atividade da enzima urease (Tabela 8) semelhantes entre os sistemas integrados, VN e PAST no experimento 1 (0-5 cm), podem estar relacionados à presença das leguminosas, uma vez que a fixação biológica de N_2 nas leguminosas pode influenciar a atividade enzimática, assim como a deposição dos resíduos na forma de adubação verde e cobertura morta. A menor relação C/N favorece a decomposição mais rápida do material vegetal (Adetunji et al. 2017). Valores mais elevados da atividade de urease na VN em comparação com o sistema CRAT e PAST foram observados no experimento 2 (Tabela 10). Além do fato do aumento em quantidade e qualidade da MOS nessas áreas, já descrito neste estudo, outro fator que pode influenciar o aumento da atividade enzimática é o microclima na superfície do solo. Em áreas de vegetação nativa, geralmente, o microclima da superfície do solo (associado à temperatura e umidade) sofre menores alterações, como por exemplo em relação ao sombreamento, o que pode diminuir a limitação da atividade enzimática em relação às áreas manejadas (Kuscu 2019).

Assim como observado para os teores de CL do solo, a atividade da enzima urease foi superior em julho, e os fatores como a precipitação e as podas relatados anteriormente podem ter contribuído para manutenção da umidade do solo nessa época. Longo e Melo (2005), observaram maior velocidade de hidrólise da ureia nos meses mais quentes e úmidos. A atividade da enzima urease é altamente influenciada pela disponibilidade de ureia no solo (Yang et al. 2022), assim como pela temperatura, umidade e quantidade de material orgânico incorporado. Entretanto Yang et al. (2022) observaram que o estresse hídrico leve melhorou a atividade da urease no solo, e o estresse hídrico severo causou a inibição.

Para a atividade da enzima β -glicosidase, a quantidade de resíduos provenientes de cada leguminosa na cobertura do solo, pode ter sido a principal causa para a diferença observada entre os sistemas de manejo no experimento 1 (Tabela 8). A quantidade total de resíduos provenientes da poda da cratília foi de 41,44 Mg ha^{-1} de massa verde, enquanto da gliricídia foi de 74,08 Mg ha^{-1} . Nesse sentido, são necessários estudos que avaliem a taxa de decomposição dos resíduos das leguminosas. O aporte de material orgânico proveniente da adubação verde com os resíduos das leguminosas (Lupwayi e Soon, 2016), combinada ao suprimento de

água no período da seca, pode ter contribuído para maiores atividades de β -glicosidase nesses sistemas. Miguel et al. (2020), ao avaliarem diferentes usos do solo e épocas diferentes de amostragem, observaram maior atividade de β -glicosidase para um sistema agroflorestal ($80 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) em relação à vegetação nativa ($68 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) avaliada.

No experimento 2, as maiores atividades de β -glicosidase foram observadas para PAST e CRAT em relação à VN (Tabela 10). Turner et al. (2002) em estudo que avaliou o solo de 29 pastagens, associaram a atividade da β -glicosidase à abundância de substrato (celulose) nesses sistemas. Esses autores ainda relataram correlação entre a atividade dessa enzima e o qMIC, uma vez que a β -glicosidase é sintetizada pelos microrganismos do solo em resposta à presença do substrato adequado. A menor variabilidade sazonal quando comparada à enzima urease pode se relacionar a forma da enzima complexada na matriz do solo (Knight e Dick, 2004), sendo menos sensível às mudanças de temperatura, umidade e pH do que as enzimas livres (Yan et al. 2010). A entrada de animais e o pastejo também pode promover o aumento da atividade enzimática como já apontado anteriormente e validado por Vargas et al. (2015).

A análise de componentes principais permitiu identificar a sazonalidade dos atributos biológicos de qualidade do solo, e a influência dos manejos e fatores ambientais em ambos os experimentos. Nos experimentos 1 (Fig. 8) e 2 (Fig. 9), para as duas épocas de amostragem, as áreas com pastagem promoveram incremento nos valores da maioria dos atributos avaliados. Esses resultados evidenciam a importância de pastagens manejadas na manutenção da matéria orgânica acima do solo, com constante cobertura vegetal, ou abaixo do solo, através do abundante sistema radicular das forrageiras e constante renovação de raízes (Chen et al. 2017; Silva et al. 2022). Já os sistemas integrados de produção promoveram maiores teores de cmic e qMIC, assim como estímulo da atividade da enzima β -glicosidase. De acordo com Yadav et al. (2011) a biomassa microbiana do solo e a atividade enzimática podem ser aumentadas em sistemas integrados, ao melhorarem a qualidade do solo, com reflexos na melhoria da produtividade no longo prazo.

4.1.5 Conclusões

As pastagens contínuas aportaram mais C e N em relação aos demais sistemas de manejo nas camadas superficiais do solo, com teores e estoques comparáveis àqueles observados para a área de vegetação nativa. Adicionalmente, a intensificação da produção com introdução de leguminosas promoveu aumento nos teores e estoques de C em relação à área com cultivo e preparo convencional do solo.

Os atributos biológicos de qualidade do solo sofreram influência tanto pelas condições climáticas locais quanto pelo manejo e uso do solo, verificando-se a necessidade de estudos de longo prazo que incluam essas variações sazonais e eventos extremos.

O aporte de matéria orgânica pelos resíduos incorporados nos sistemas integrados com *Cratylia argentea*, embora não tenham aumentado os estoques de C do solo no curto prazo, promoveram incrementos no Cmic e contribuíram para o aumento na atividade da enzima β -glicosidase.

4.1.6 Referências

- Adetunji AT, Lewu FB, Mulidzi R, Ncube B (2017) The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. *J Soil Sci Plant Nutr* 17:794-807. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000300018>
- Almeida LLS, Frazão LA, Lessa TAM, Fernandes LA, Veloso ALC, Lana AMQ, Souza IA, Pegoraro RF, Ferreira EA (2021) Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Res* 205:104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>
- Alves TS, Campos LL, Elias Neto N, Matsuoka M, Loureiro MF (2011) Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum Agronomy* 33:341-347. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.4841>
- Ansari MA, Choudhury BU, Layek J, Das A, Lal R, Mishra VK (2022) Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India). *Soil and Tillage Research* 218:105318. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105318>
- Aryal DR, De Jong BHJ, Ochoa-Gaona S, Mendoza-Vega J, Esparza-Olguin L (2015) Successional and seasonal variation of litterfall and associated nutrient transfer in semi-evergreen tropical secondary forests of SE Mexico. *Nutr Cycl Agroecosyst* 103(1):45–60. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9719-0>
- Balbino LC, Kichel NA, Bungenstab DJ, Almeida RG (2019) Sistemas de integração: conceitos, considerações, contribuições e desafios. In: Bungenstab, DJ (ed) *ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta*, Embrapa, Brasília, pp 31-48
- Barros VD, Lira Junior MA, Fracetto FJ, Fracetto GG, Ferreira JD, Barros DJ, Silva Júnior AF (2020) Effects of different legume green manures on tropical soil microbiology after corn harvest. *Bragantia*. 2020 79:630-40. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200262>
- Bieluczyk W, Piccolo MC, Pereira MG et al (2020) Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma* 371:114368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>
- Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk density. In: Klute A (ed) *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, pp 363–376.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2021) Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo / Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/abc-english.pdf> Accessed 28 April 2023

- Brito GS, Bautista S, López-Poma R et al. (2019) Labile soil organic carbon loss in response to land conversion in the Brazilian woodland savanna (cerradão). *Biogeochemistry* 144:31–46. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00570-9>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.021>
- Coser TR, Figueiredo CC, Jovanovic B, Moreira TN, Leite GG, Cabral Filho SLS, Kato E, Malaquias JV, Marchão RL (2018) Short-term buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. *Agric Syst* 166:184-195. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.01.030>
- Dhaliwal JK, Laxmisagra SK, Chellappa J, Sekaran U, Kumar S (2021) Labile soil carbon and nitrogen fractions under short and long-term integrated crop-livestock agroecosystems. *Soil Res* 60:511-519. <https://doi.org/10.1071/SR21038>
- Ellert BH, Bettany JR (1995) Calculation of a organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. *Can J Soil Sci* 75:529-538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
- Frazão L A, Cardoso PHS, Neta MNA, Mota MFC, Almeida LLS, Ribeiro JM, Bicalho TF, Feigl BJ (2021) Carbon and nitrogen stocks and organic matter fractions in the topsoil of traditional and agrisilvicultural systems in the Southeast of Brazil. *Soil Res* 59:794-805. <http://dx.doi.org/10.1071/SR20150>
- Freitas IC, Ribeiro JM, Araújo NCA, Santos MV, Sampaio RA, Fernandes LA, Azevedo AM, Feigl BJ, Cerri CEP, Frazão LA (2020) Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangel Ecol Manag* 73:776-785. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>
- Hazra KK, Nath CP, Singh U, Praharaj CS, Kumar N, Singh SS, Singh NP (2019) Diversification of maize-wheat cropping system with legumes and integrated nutrient management increases soil aggregation and carbon sequestration. *Geoderma* 353:308:319. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.039>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report* (2021). Cambridge University Press. https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf Accessed 24 April 2023
- Kandeler E, Gerber H (1988) Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination ammonium. *Biol Fert Soils* 6:68-72. <https://doi.org/10.1007/BF00257924>
- Keeney DR, Nelson DW (1982) Nitrogen-inorganic forms. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR (eds) *Methods of Soil Analysis*, 2nd ed. Madison, WI Etats-Unis, pp 643-698.

Ketema H, Yimer F (2014) Soil property variation under agroforestry based conservation tillage and maize based conventional tillage in Southern Ethiopia. *Soil Tillage Res* 141:25-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.03.011>

Knight TR, Dick RP (2004) Differentiating microbial and stabilized β -glucosidase activity relative to soil quality. *Soil Biol Biochem* 36:2089-2096. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.06.007>

Krishnamurthy L, Krishnamurthy P, Rajagopal I, Solares AP (2019) Can agroforestry systems thrive in the drylands? Characteristics of successful agroforestry systems in the arid and semi-arid regions of Latin America. *Agrofor Syst* 93:503-513. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0143-0>

Kuscu ISK (2019) Changing of soil properties and urease–catalase enzyme activity depending on plant type and shading. *Environ Monit Assess* 191:178. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7304-8>

Lira Junior MA, Fracetto FJC, Ferreira JS, Silva MB, Fracetto GGM (2020) Legume silvopastoral systems enhance soil organic matter quality in a subhumid tropical environment. *Soil Sci Soc Am J* 84:1209–1218. <https://doi.org/10.1002/saj2.20106>

Longo RM, Melo WJ (2005) Hidrólise da uréia em latossolos: efeito da concentração de uréia, temperatura, pH, armazenamento e tempo de incubação. *Rev Bras Ciênc Solo* 29:651–657. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400018>

López-Santiago JG, Casanova-Lugo F, Villanueva-López G et al. (2019) Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforest Syst* 93:199–211. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>

Loss A, Coutinho FS, Pereira MG, Silva RAC, Torres JLR, Ravelli Neto A (2013) Fertilidade e carbono total e oxidável de Latossolo de Cerrado sob pastagem irrigada e de sequeiro. *Cienc Rural* 43:426–32. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300008>

Lupwayi NZ, Soon YK (2016) Soil microbial properties during decomposition of pulse crop and legume green manure residues in three consecutive subsequent crops. *Can. J. Soil Sci.* 96:413–426. <http://dx.doi.org/10.1139/cjss-2016-0039>

Matrangolo WJR (2018) Aspectos de *Cratylia argentea* na região central de Minas Gerais e potencialidades em sistemas agrobiodiversos. Embrapa, Sete Lagoas

Miguel DL, Silva EMR, Silva CF, Pereira MG, Leite LFC (2020) Soil microbiological properties and enzyme activity in agroforestry systems compared with monoculture, natural regeneration, and native Caatinga. *Biosci J* 36:1-16. <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n1a2020-42704>

- Moraes JFL, Volkoff B, Cerri CC, Bernoux M (1996) Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* 70:63-81. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0)
- Oliveira TP, Ensinas SC, Barbosa GF, Nanzer MC, Barreta PGV, Silva MFG, Queiroz GRSS, Prado EAF (2018) Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. *RBAS* 8:4. <https://doi.org/10.21206/rbas.v8i4.3068>
- Pires GC, Denardin LGO, Silva LS, Freitas CM, Gonçalves EC, Camargo TA, Bremm C, Carvalho PCF, Souza ED (2022) System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. *J Soil Sci Plant Nutr* 22:4487–4495. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01050-0>
- Queiroz LP (2022) *Cratylia* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB79034> Accessed 12 June 2023.
- R Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing (*software*). Version 4.2.3. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.Rproject.org/>
- Reis Junior FB, Mendes IC (2007) Biomassa microbiana do solo. Embrapa cerrados, Planaltina.
- Ribeiro JM, Frazão LA, Cardoso PHS, Oliveira ALG, Sampaio RA, Fernandes LA (2019) Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. *Ciênc Florest* 29:913–923. <https://doi.org/10.5902/1980509825310>
- Sarto MVM, Borges WLB, Sarto JRW et al. (2020) Deep soil carbon stock, origin, and root interaction in a tropical integrated crop–livestock system. *Agroforest Syst* 94:1865–1877. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00505-6>
- Schaffrath VR, Tormena CA, Fidalski J, Gonçalves ACA (2008) Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Rev Bras Ciênc Solo* 32(4):1369–77. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400001>
- 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* 11:795-807. <https://doi.org/10.1097/00010694-199711000-00004>
- Silva AS, Colozzi Filho A, Nakatani AS, Alves SJ, Andrade DS, Guimarães MF (2015) Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. *Rev Bras Ciênc Solo* 39:40–8. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150185>
- Silva IR, Mendonça ES (2007) Matéria orgânica do solo. In: Novais RF et al. (ed) *Fertilidade do solo*, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp 275-374.

Silva JF, Gontijo Neto MM, Silva GF, Borghi E, Calonego JC (2022) Soil Organic Matter and Aggregate Stability in Soybean, Maize and Urochloa Production Systems in a Very Clayey Soil of the Brazilian Savanna. *Agronomy*. 12:1652. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071652>

Stieven AC, Mendes WM, Wruck F, Couto EG, Campos DTS (2020) Atributos do solo em sistemas diferenciados de uso e manejo do solo em Mato Grosso, MT, Brasil. *Colloquium Agrariae* 16:1-15 <https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n2.a354>

Tabatabai MA (1994) Soil enzymes. In: Weaver RW, Scott A, Bottomeley PJ (eds) *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical Properties*, Soil Science Society of America, Madison, pp778-835.

Turner BL, Hopkins DW, Haygarth PM, Ostle N (2002) β -Glucosidase activity in pasture soils. *Appl Soil Ecol* 20:157-162. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00020-3)

Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. *Soil Biol Biochem* 19:703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)

Vargas RS, Bataioli R, da Costa PB, Lisboa B, Passaglia LMP, Beneduzi A, et al. (2015) Microbial quality of soil from the Pampa biome in response to different grazing pressures. *Genet Mol Biol* 38:205–12 <https://doi.org/10.1590/S1415-475738138120140230>

Yadav RS, Yadav BL, Chhipa BR, Dhyan SK, Ram M (2011) Soil biological properties under different tree based traditional agroforestry systems in a semi-arid region of Rajasthan, India. *Agrofor Syst* 81:195–202. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9277-z>

Yan J, Pan G, Li L, Quan G, Ding C, Luo A (2010) Adsorption, immobilization, and activity of β -glucosidase on different soil colloids. *J Colloid Interface Sci* 348:565-570. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.04.044>

Yang C, Feng M, Song L, Jing B, Xie Y, Wang C, Qin M, et al. (2022) Hyperspectral monitoring of soil urease activity under different water regulation. *Plant and soil* 477:779-792. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05476-4>

Zago LMS, Ramalho WP, Silva-Neto CM, Caramori SS (2020) Biochemical indicators drive soil quality in integrated crop–livestock–forestry systems. *Agrofor Syst* 94:2249-2260. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00547-w>

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização dos teores e estoques de C e N, assim como dos atributos biológicos de qualidade do solo, permitiram avaliar a dinâmica da matéria orgânica nos diferentes manejos e usos do solo no Cerrado mineiro. Os resíduos provenientes das leguminosas e o seu manejo promovem o aporte e manutenção da biomassa na superfície no solo, promovendo incremento dos atributos biológicos sob sistemas integrados, evidenciando a importância deste manejo de intensificação na qualidade do solo e, conseqüentemente, na produção.

Este estudo poderá contribuir para levantamentos relacionados ao potencial de recuperação e acúmulo de C no solo de sistemas integrados com uso de leguminosas, contribuindo com as metas preconizadas no Plano ABC+, ao possibilitar a identificação de práticas de manejo que promovem o sequestro de C no solo. Outra importante contribuição deste estudo é a possibilidade de ampliação do uso de leguminosas como a *Cratylia argentea* em nos sistemas de produção intensificados, contribuindo para sua maior adoção no contexto da agricultura familiar e de regiões com déficit hídrico.