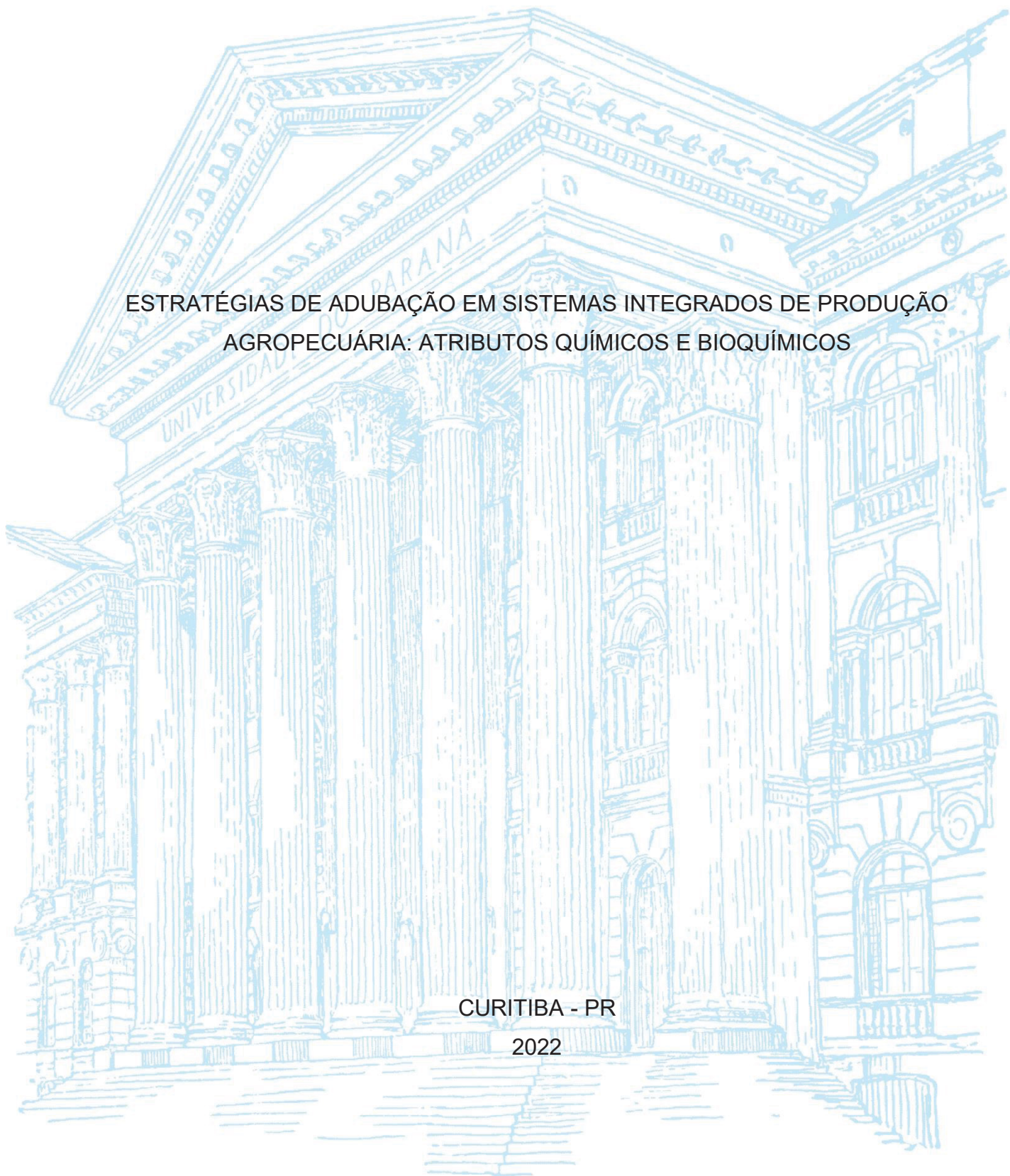


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TATIANE ANDREA DE CAMARGO

ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO  
AGROPECUÁRIA: ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

CURITIBA - PR  
2022



TATIANE ANDREA DE CAMARGO

ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO  
AGROPECUÁRIA: ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação em Agronomia, Setor de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em produção vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza

CURITIBA – PR

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Camargo, Tatiane Andrea de

Estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária: atributos químicos e bioquímicos / Tatiane Andrea de Camargo . – Curitiba, 2022.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza

1. Fertilidade do solo. 2. Sustentabilidade. 3. Produtividade agrícola. I. Carvalho, Paulo César de Faccio. II. Souza, Edicarlos Damacena. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal). IV. Título.

Bibliotecária: Telma Terezinha Stresser de Assis CRB-9/944



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRONOMIA  
(PRODUÇÃO VEGETAL) - 40001016031P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **TATIANE ANDREA DE CAMARGO** intitulada: **ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS**, sob orientação do Prof. Dr. PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Março de 2022.

Assinatura Eletrônica

02/04/2022 15:25:07.0

PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

29/03/2022 13:55:08.0

EDICARLOS DAMACENA DE SOUZA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS )

Assinatura Eletrônica

12/04/2022 09:20:10.0

LEANDRO PEREIRA PACHECO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS)

Assinatura Eletrônica

07/04/2022 08:08:53.0

MARCO AURELIO CARBONE CARNEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

---

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil  
CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5601 - E-mail: [pgapv@ufpr.br](mailto:pgapv@ufpr.br)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.  
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 169619

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 169619

A meus pais, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me acolhido, sustentado e me conduzido em todos os momentos, principalmente naqueles em que achei que não iria suportar todos os desafios que me confiou. E agradeço ainda por todas as bênçãos que colocou em meu caminho, durante esses anos de jornada acadêmica e profissional.

Agradeço aos meus pais, João Carlos e Claudete de Camargo por todo apoio, carinho, cuidado, preocupação e acima de tudo, por todo amor que a mim dedicaram. Esse trabalho só foi possível pois vocês estiveram sempre ao meu lado!

Ao meu irmão Thiago, por todas as vezes que foi me “esperar” durante esses anos de mestrado. Por todos os momentos que me alegrou, mas também me irritou...Pelo apoio e pela imensa ajuda nas árduas coletas realizadas para que este trabalho se realizasse.

A minha irmã Thaís, que a todo momento apoiou minhas decisões, que mesmo de longe se fez presente e contribuiu para que não desistisse dessa jornada.

A Millena e Alice, minhas queridas afilhada e sobrinha que sempre me ligaram alegres e animadas para contar suas descobertas que infelizmente não pude participar pela distância que nos separa.

Aos meus tios, Fátima e José Luiz, por todo apoio, carinho e cuidado dedicados a mim.

A minha querida prima Fernanda, por estar sempre me alegrando, ajudando e apoiando em todos os momentos.

Aos amigos que sempre estiveram me apoiando, torcendo, auxiliando e acima de tudo sendo não só amigos, mas parte da minha família em toda situação, em especial Mariane Borges Cordeiro e Henrique Tínel.

Aos professores Rodrigo Junqueira e Carolina Bremm pela paciência e tempo que dedicaram a me auxiliar nas análises estatísticas

Aos professores Normandes e Camila Mioto do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da UFR, por todo conhecimento, paciência e auxílio que dedicaram a mim, possibilitando esse trabalho.

Ao meu coorientador (também conhecido como um dos pais dos integrantes do GPISI), Edicarlos Damacena de Souza, por todos esses anos de amizade e ensinamentos que levarei sempre comigo. Obrigada pelo exemplo, pelos puxões de orelha, pelas oportunidades, pela confiança, carinho e principalmente por ter acreditado em meu potencial.

Ao meu orientador Paulo Cesar de Faccio Carvalho pelas enormes contribuições em minha formação em cada momento que tive a oportunidade de ouvir seus ensinamentos.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Agronomia – Produção vegetal e funcionários da Universidade Federal do Paraná que mesmo de longe contribuíram imensamente para a realização desse trabalho.

A Rubia e ao Luiz Gustavo Denardin que com tanta paciência e cuidado me auxiliaram a difícil tarefa de escrever uma dissertação mesmo estando trabalhando em tempo integral.

A todos os integrantes e ex-integrantes do melhor grupo de pesquisa do mundo, GPISI, que sempre me ensinaram e ajudaram, possibilitando a realização deste trabalho, em especial a Evelyn, Andressa, Gabriela, Caio, Jorge, João, Jessica Heloíza e Vivian.

Ao técnico do laboratório de Bromatologia da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), Vinícius por todo apoio e auxílio para que este trabalho fosse possível.

A UFR, Yara Fertilizantes, a Aliança SIPA e a a CAPES/CNPq pelo suporte de laboratórios, financeiro e pela bolsa concedida.

A Fazenda Guarita, especial ao Sr. Joel Strobel por ceder a área e dar todo o suporte para execução do protocolo experimental e os funcionários da Fazenda Guarita, Sr. Toninho e Everton Mann Appelt, por toda ajuda e suporte que foram essenciais a boa condução desse estudo.

Aos professores da banca, Leandro Pereira Pacheco e Marco Aurélio Carbone Carneiro, pelas imensas contribuições para esse trabalho.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se concretizasse.

Grata.

*Mesmo desacreditado e ignorado por  
todos, não posso desistir, pois para mim,  
vencer é nunca desistir.  
- Albert Einstein -*



## RESUMO

Com o crescimento da população mundial surge a necessidade de maior produção de alimentos por unidade de área e de forma sustentável. Com isso, torna-se essencial a utilização racional dos recursos ambientais, especialmente do solo e fertilizantes, que conciliem a sustentabilidade e aumento de produtividade. Nesse contexto, a ciclagem de nutrientes, potencializada pelo componente animal, tem importância crucial para a agricultura principalmente nos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA). As diferentes estratégias de adubação utilizadas em SIPA podem influenciar nos atributos relacionados a qualidade do solo e, conseqüentemente, na produtividade da soja. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito das diferentes estratégias de adubação sobre os atributos químicos e bioquímicos do solo e produtividade da soja em SIPA no Cerrado. O estudo foi conduzido na fazenda Guarita, em Rondonópolis - MT, em um Latossolo Vermelho distrófico, de textura argilosa. A área é conduzida em delineamento experimental em blocos casualizados com três repetições, totalizando 12 unidades experimentais. 1) Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja (AC-N), 2) Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem (AC+N), 3) Adubação com P e K aplicados na pastagem (AP-N) e 4) Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem (AS). No curto prazo, as estratégias de adubação, alternativas a AC-N, influenciaram na produção de forragem, carga animal, matéria seca total e aporte total de esterco. As estratégias AC+N, AP-N e AS proporcionaram incrementos significativos no qMIC (162 - 329%), C-BM (234 - 443%), N-BM (267 - 556%) e redução no  $qCO_2$  (214 - 473%). Foi observado ainda, maior atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase, arilsulfatase e FDA nesses tratamentos. A estratégia AC+N proporcionou incrementos de 28% no NT, de 60% no NP e de 24% no NOM. O índice de manejo do carbono foi 43% maior na estratégia AC+N quando comparada a AC-N. Essas melhorias nos atributos de qualidade do solo proporcionaram maior produtividade da soja, nas estratégias de adubação AC+N e AS. Com isso, as estratégias de AC+N, AP-N e AS favorecem a melhoria de atributos de qualidade do solo, com incrementos na produtividade da soja. Assim, com a utilização das diferentes estratégias de adubação, alternativas à adubação convencional, é possível melhorar a qualidade do solo e aumentar a produção de alimentos, de forma sustentável via otimização da utilização de fertilizantes.

Palavras-chave: SIPA. Fertilidade do solo. Gestão de nutrientes. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

With the growth of the world population, there is a need for greater food production in smaller areas and in a sustainable way. As a result, the rational use of environmental resources, especially soil and fertilizers, which reconcile sustainability and increased productivity, becomes essential. In this context, nutrient cycling, enhanced by the animal component, is of crucial importance for agriculture, especially in the Integrated Crop-livestock Systems (ICLS). The different fertilization strategies used in ICLS can influence the attributes related to soil quality and, consequently, soybean productivity. The objective of this work is to evaluate the effect of different fertilization strategies on soil quality and soybean yield in ICLS in the Cerrado. The study is carried out at the Guarita Farm, in Rondonópolis - MT, in a dystrophic Red Latosol with a clayey texture. The area is conducted in an experimental design in randomized blocks with three replications, totaling 12 experimental units. 1) Conventional fertilization with P and K applied to the soybean crop (AC-N), 2) Conventional fertilization with P and K applied to the soybean crop plus N in the pasture (AC+N), 3) Fertilization with P and K applied on pasture (AP-N) and 4) Fertilization of systems with N, P and K applied on pasture (AS). In the short term, fertilization strategies, alternatives to AC-N, influenced forage production, animal load, total dry matter and total manure input. The AC+N, AP-N and AS strategies provided significant increases in qMIC (162 - 329%), C-BM (234 - 443%), N-BM (267 - 556%) and reduction in qCO<sub>2</sub> (214 - 473%). It was also observed greater activity of  $\beta$ -glucosidase, phosphatase, arylsulfatase and FDA enzymes in these treatments. The AC+N strategy provided increments of 28% in NT, 60% in NP and 24% in NOM. The carbon management index was 43% higher in the AC+N strategy when compared to AC-N. These improvements in soil quality attributes provided greater soybean productivity in the AC+N and AS fertilization strategies. Thus, the AC+N, AP-N and AS strategies favor the improvement of soil quality attributes, with increases in soybean productivity. Thus, with the use of different fertilization strategies, alternatives to conventional fertilization, it is possible to improve soil quality and increase food production, in a sustainable way by optimizing the use of fertilizers.

Key-words: ICLS. Soil fertility. Nutrient management. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização da área de estudo na Fazenda Guarita em Rondonópolis, Mato Grosso. ....	32
FIGURA 2 - Precipitação mensal e temperatura média do ar durante o período experimental, no município de Rondonópolis, estado de Mato Grosso, Brasil. ....	34
FIGURA 3 - Histórico geral e detalhado da área experimental de 2010 a 2021 de um sistema integrado de produção agropecuária submetido a diferentes estratégias de adubação. ....	35
FIGURA 6 - Carbono orgânico total (a), nitrogênio orgânico total (b), suas diferentes frações em sistemas integrados de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação. ....	45
FIGURA 7 - Carbono (a) e nitrogênio (b) da biomassa microbiana sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense. ....	46
FIGURA 8 - Produtividade da soja sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense. ....	48

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Caracterização química, física e composição mineral da fração argila de um Latossolo vermelho na data de avaliação do solo (2021) em Rondonópolis, Mato Grosso. ....	32
TABELA 2 - Mínimo, máximo, média, coeficiente de variação (CV), desvio padrão e P valor dos atributos avaliados em sistemas integrados de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação. ....	42
TABELA 3 – Matéria seca total, número e diâmetro de placas de esterco, aporte total de esterco e carga animal em sistema integrado de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação .....	44
TABELA 4 - Carbono não lábil (CnL), labilidade do carbono (LC), índice de carbono (IC), índice de labilidade do carbono (ILC), índice de manejo de carbono (IMC), em sistema integrado de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação. ....	45
TABELA 5 - Respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e quociente microbiano ( $qMIC$ ) sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense. ....	47
TABELA 6 - Atividade das enzimas $\beta$ -glicosidase, fosfatase, arilsulfatase, hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) e urease sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense. ....	47
TABELA 7 - Atributos físicos do solo sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANOVA - Análise de variância  
C – Carbono  
Ca - Cálcio  
C-BMS - Carbono da biomassa microbiana do solo  
CnL - Carbono não lábil  
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento  
COT - Carbono orgânico total  
FDA - Hidrólise do diacetato de fluoresceína  
GEE – Gases de efeito estufa  
GCP - *Ground Control Points*  
ha - Hectare  
ICLS - Integrated crop livestock systems  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ILC - Índice de labilidade do carbono  
IC - Índice de carbono  
IMC – Índice de manejo do carbono  
K – Potássio  
kg - quilograma  
K<sub>2</sub>O - Óxido de potássio  
MO - Matéria orgânica  
Mg - Megagrama  
N - Nitrogênio  
N-BMS - Nitrogênio da biomassa microbiana do solo  
NT - Nitrogênio total  
ONU – Organização das Nações Unidas  
P – Fósforo  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - Pentóxido de fósforo (Adubo superfosfato simples)  
PV – Peso vivo  
qCO<sub>2</sub> - Quociente metabólico

qMIC - Quociente microbiano

RBS - Respiração basal

RTK - *Real Time Kinematic*

S - Enxofre

SIPA - Sistema integrado de produção agropecuária

SPD – Sistema de plantio direto

UTM - Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>16</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1.	CRESCIMENTO NA DEMANDA POR ALIMENTOS .....	18
2.2.	SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.....	19
2.3.	ADUBAÇÃO DE SISTEMAS EM SIPA.....	22
2.4.	ALTERAÇÕES NO SOLO E PLANTAS DECORRENTES DA ADUBAÇÃO DE SISTEMAS .....	24
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO I - ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO NA QUALIDADE DO SOLO DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.....</b>	<b>28</b>
3.1.	INTRODUÇÃO .....	29
3.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.2.1.	ÁREA DE ESTUDO .....	31
3.2.2.	DESENHO EXPERIMENTAL .....	35
3.2.3.	MANEJO E TRATOS CULTURAIS .....	37
3.2.4.	PERÍODO DE PASTEJO .....	37
3.2.5.	AVALIAÇÕES .....	38
3.2.6.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	42
3.3.	RESULTADOS.....	42
3.3.1.	APORTE DE RESÍDUOS E CARGA ANIMAL.....	43
3.3.2.	ALTERAÇÕES NO CARBONO E NITROGÊNIO .....	44
3.3.3.	ATIVIDADE E BIOMASSA MICROBIANA.....	46
3.3.4.	ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO.....	47
3.3.5.	PRODUTIVIDADE DA SOJA .....	48
3.4.	DISCUSSÃO.....	48
3.5.	CONCLUSÃO .....	54
3.6.	REFERÊNCIAS .....	54
<b>4.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>60</b>
<b>5.</b>	<b>PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>70</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Com o crescimento da população mundial surge a necessidade de aumentar a produção de alimentos por unidade de área e de forma mais sustentável. Com isso, torna-se essencial a utilização racional dos recursos ambientais, especialmente do solo e de insumos, como os fertilizantes, que concilie a sustentabilidade e aumento de produtividade. Nesse contexto, os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) são possíveis alternativas para potencializar a eficiência de uso dos nutrientes/fertilizantes através da maior ciclagem de nutrientes.

Os SIPA abrangem a exploração de culturas agrícolas e produção animal na mesma área, simultaneamente ou sequencialmente, em rotação ou sucessão (MORAES et al., 2014a; CARVALHO et al., 2014). Estes são projetados para explorar sinergismos e propriedades emergentes resultantes das interações nos compartimentos solo-planta-animal-atmosfera em áreas que integram atividades de produção agrícola e pecuária em diferentes escalas espaço-temporais (CARVALHO et al., 2018; MORAES et al., 2014b). Com isso, os SIPA promovem o aumento da produção de alimentos, fibras e energia, associados à promoção de serviços ecossistêmicos (MORAES et al., 2014b) que ocorrem devido diversidade dos componentes (ANGHINONI et al., 2013; CARVALHO et al., 2018).

Nos SIPA os nutrientes estão sempre em alternância com os diferentes compartimentos do sistema (CARVALHO et al., 2018). Diante disso, a fim de potencializar os benefícios relacionados à eficiência de uso dos nutrientes, surge o conceito da *adubação de sistemas*, que propõem a interação dos nutrientes fornecidos de forma orgânica, que gera sinergismo entre as culturas com influência do cultivo antecessor para com sucessor (FARIAS et al., 2020). Com isso, há interação entre a microbiota, resíduo orgânico e culturas em sucessão. Esse conceito de adubação leva em conta a intensificação da ciclagem de nutrientes e a reposição de nutrientes na cultura que apresenta maior absorção e menor exportação de nutrientes, como a pastagem, e faz com que as necessidades de fertilização direta na cultura de grãos sejam reduzidas e a produtividade seja mantida. Isso porque essa estratégia de adubação considera que cada nutriente deve permanecer o maior tempo possível dentro do sistema produtivo, para que seja ciclado e reciclado pelos componentes



solo-planta-animal. Essa estratégia pode ser uma forma de aumentar a eficiência do uso de fertilizantes proporcionando maior produção de alimentos com a mesma unidade de nutriente aportado.

As diferentes estratégias de adubação na pastagem, tanto com N quanto com P e K favorecem a produção da pastagem via parte aérea e radicular, possibilitam uma maior carga animal o que gera maior produção animal por unidade de área. Com isso, há maior quantidade de esterco e variabilidade na distribuição de nutrientes via esterco e urina, fatores estes que geram mudanças nos atributos de qualidade do solo, que podem afetar na produção de grãos (SILVA et al., 2014).

Contudo, ainda são escassos trabalhos que avaliem o efeito de diferentes estratégias de adubação em SIPA, especialmente nas alterações dos atributos bioquímicos e microbiológicos do solo, teores de C e N e produtividade das culturas. Diante disso, acredita-se que as diferentes estratégias de adubação utilizadas em SIPA podem influenciar nos atributos relacionados à química e bioquímica do solo e, conseqüentemente, na produtividade da soja. Com isso, esse estudo objetiva avaliar o efeito das diferentes estratégias de adubação sobre os atributos químicos, bioquímicos dos solo e produtividade da soja em SIPA no Cerrado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CRESCIMENTO NA DEMANDA POR ALIMENTOS

O crescimento da população mundial está estimado em cerca de 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos, passará dos atuais 7,7 bilhões de indivíduos para 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2019) e 11 bilhões de pessoas até 2100 (ONU, 2017). O crescimento populacional também acompanha a pressão social na produção de alimentos com menor impacto ambiental, de forma mais sustentável. Nesse contexto, as estratégias atuais em aumentar a produção de alimentos ainda estão focadas em incrementos nos níveis de adubação utilizados, baseados na adubação químico-mineralista.

Cenário que se agrava pelo fato de que os fertilizantes são recursos não renováveis e com a crise mundial enfrentada desde o início dos confrontos entre Rússia e Ucrânia em 2022. Essa crise desencadeou alta nos preços pela menor oferta de fertilizantes no mercado. Por outro lado, a intensificação e a especialização dos sistemas agropecuários, acrescidas da grande entrada de insumos, têm levado a impactos negativos no ambiente e são considerados inaceitáveis pela sociedade moderna (FRANZLUEBBERS et al., 2011).

No Brasil, principalmente nas regiões tropicais, as culturas agrícolas são altamente responsivas à adubação. Isso porque, os solos das regiões tropicais, utilizados para agricultura, geralmente Latossolos, são extremamente intemperizados (FONTES et al., 2001), mas que com o uso contínuo de fertilizantes já apresentam uma fertilidade construída. Com isso, o Cerrado é uma região de grande aptidão agrícola devido aos solos com excelentes características físicas, mas esses solos ainda são dependentes do uso de fertilizantes para resultados adequados de produtividade (ARAGÃO et al., 2020). No entanto, mesmo com essas características não se pode continuar a utilizar a mesma lógica de cultivar com utilização de mais insumos, já que os mesmos são recursos limitados e de elevado custo. Com isso, deve-se focar em formas mais eficientes de manejo, que visam melhorar a eficiência de utilização dos recursos.

No Cerrado brasileiro, comumente é cultivado soja durante a safra (setembro a fevereiro) e na segunda safra (fevereiro a julho) cultiva-se milho ou pasto. Nesse sentido, Balbinot Junior et al. (2009) salientam que a forragem pode ser utilizada como cobertura do solo, para a manutenção do sistema plantio direto, ou para exploração pecuária sob pastejo, o que caracteriza um SIPA.

Outro importante fator que deve ser levado em consideração é que a cultura do milho, normalmente utilizada como segunda safra no Mato Grosso, é uma cultura de alto custo e risco (OSAKI et al., 2019). Isso se dá pelo fato de que na região há uma instabilidade pluviométrica muito grande na época de cultivo dessa cultura. Com isso, em áreas com presença de veranicos mais frequentes ou com solos arenosos, a utilização da gramínea seria a opção mais segura.

Para a safra de 2021/22 estima-se uma produtividade média de soja no estado de Mato Grosso, de  $3.516 \text{ kg ha}^{-1}$ , um pouco menor que a média da região Centro-oeste ( $3.547 \text{ kg ha}^{-1}$ ), porém maior que média brasileira ( $3.478 \text{ kg ha}^{-1}$ ; CONAB, 2022). Nesse contexto, sistemas produtivos de alto rendimento, que podem manter safras estáveis em cenários ambientais variáveis, são essenciais para aumentar a segurança alimentar (NUNES et al., 2021). O desafio de alcançar altos rendimentos de soja depende de uma combinação complexa de condições ambientais, fatores de manejo da cultura e qualidade do solo, com ênfase no suprimento de nutrientes para as plantas (SILVA et al., 2014). Nesse sentido, os SIPA com pastagens bem manejadas são um caminho potencial e necessário para aumentar a produção de alimentos, melhorar a sustentabilidade e a produtividade do uso da terra sem expandir para novas terras (FARIAS et al., 2020). Isso porque, ao introduzir pastagens na segunda safra, pode-se produzir mais alimentos, pela produção animal, além de possibilitar a manutenção da cobertura do solo, por meio da palhada residual, essencial para a manutenção do sistema plantio direto.

## 2.2. SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Os desafios da agricultura moderna abrangem contornar os problemas decorrentes das práticas agrícolas com alto impacto ambiental, mitigar as emissões de gases de efeito estufa, reduzir a erosão e a redução da fertilidade do solo, e evitar

a poluição do solo e da água (MORAES et al., 2014a). A natureza deste desafio requer ações em nível mundial em várias frentes, o que inclui a promoção de uma expansão sustentável da produção de alimentos, por meio do aumento dos níveis de produtividade agrícola e maior intensidade de cultivo (PEREIRA et al., 2012), por meio da utilização sistemas como o plantio direto (SPD) e SIPA, que visam maior produção e conservam a qualidade ambiental (LEMAIRE et al., 2014).

Nesse contexto, os SIPA são reconhecidos como opção de sistema produtivo em que se pode alcançar sustentabilidade e intensificação da produção (FAO, 2010) e são caracterizados pela rotação, sucessão ou mistura de atividades agrícolas, pecuárias ou florestais, em sistema plantio direto (RIFERTE et al., 2021). Esses sistemas abrangem a exploração de culturas agrícolas e produção animal na mesma área, sequencialmente, em rotação ou sucessão (CARVALHO et al., 2013; MORAES et al., 2014b).

O incremento de diversidade desses sistemas, pode ser alcançado pela rotação de culturas ou pela utilização de consórcios, pela diversidade de plantas (PROMMER, et al., 2020). O aumento de diversidade e/ou as rotações levam ao aumento de complexidade do sistema, via maiores interações entre os componentes que leva ao sinergismo do sistema. O aumento da diversidade e complexidade do sistema, características próprias dos SIPA, promovem diversos benefícios ao solo, plantas e animais, por maximizar a exploração dos sinergismos e propriedades emergentes resultantes das interações nos compartimentos solo-planta-animal-atmosfera em áreas que integram atividades de produção agropecuária em diferentes escalas espaço-temporais (ANGHINONI et al., 2013; MORAES et al., 2014a; BONINI et al., 2016; CARVALHO et al., 2018).

Com isso, os SIPA promovem o aumento da produção de alimentos, fibras e energia, associados à promoção de serviços ecossistêmicos (MORAES et al., 2014b), que ocorrem devido à maior diversidade dos componentes (ANGHINONI et al., 2013; CARVALHO et al., 2018) e à melhoria da qualidade do solo (VARGAS et al., 2018). Além disso, esses sistemas promovem a redução de riscos associados a incertezas climáticas e o impacto ambiental, pela diversificação e complexidade (CARVALHO et al. 2018), que são propriedades inerentes a agroecossistemas naturais. Deve-se salientar que os SIPA transitam entre os princípios agroecológicos da agricultura

orgânica e de sistemas intensivos/especializados, por utilizar princípios ecológicos e por mimetizar a natureza por meio da intensificação de processos agroecológicos em sistemas produtivos que utilizam tecnologias como o plantio direto (SOUZA et al., 2018).

Esse aumento de complexidade, gerado pelo incremento de diversidade de plantas, leva a melhoria da qualidade do solo, decorrente da eficiente ciclagem de nutrientes no solo devido a diversificação da microbiota do solo (VARGAS et al., 2018). A diversidade dos sistemas também pode ser atingida pelas rotações agrícolas intercaladas a fases *pastoris*. Segundo Martins et al. (2018), a maior biodiversidade encontrada em sistemas complexos concebe um ambiente com maior resiliência, que é essencial para apoiar sistemas agrícolas intensivos. Estes sistemas são necessários para alcançar a segurança alimentar e reduzir a degradação ambiental (MORAES et al., 2014b).

A introdução do componente animal modifica e acelera o fluxo de nutrientes pela ingestão da biomassa, com retorno de 70 a 95% dos nutrientes da planta para o solo via fezes e urina (SOUZA et al., 2018) e pelo estímulo do crescimento radicular via processo de desfolha. O componente animal, por sua vez, desacopla C e N pelo processo de pastejo e libera metano para a atmosfera, por meio da ação dos microrganismos no rúmen. Com isso, faz com que o nitrogênio retorne ao sistema por meio dos excrementos gerados pela ingestão de biomassa da planta (CARVALHO et al., 2018). Dessa forma, o componente animal exporta quantidades mínimas de nutrientes e por meio da ciclagem e reciclagem de nutrientes, disponibiliza nutrientes via fezes e urina (HIGGINS et al., 2019), para a cultura em sucessão.

Nesse sentido, Martins et al. (2018) salientam que os SIPA garantem maior retorno econômico devido à maior produção de fibras e alimentos, em uma mesma área e com a mesma, ou até menor, quantidade de fertilizantes. Isso porque a diversificação da receita pode reduzir os riscos da variabilidade climática e nas flutuações do mercado, uma vez que os retornos anuais das *commodities* agrícolas e pecuárias são frequentemente não correlacionados (PETERSON et al., 2020). Uma estratégia para potencializar os benefícios da adoção dos SIPA é por meio da alteração do posicionamento da adubação, com o uso da *adubação de sistemas* (ASSMANN et al., 2017). Nesse contexto, esses sistemas garantem menores perdas

de nutrientes, por potencializarem seu uso e aproveitamento pela ciclagem e reciclagem de nutrientes.

### 2.3. ADUBAÇÃO DE SISTEMAS EM SIPA

Cerca de 60% das terras agrícolas do mundo são pastagens (FAO, 1999). O Brasil tem cerca de 158 milhões de hectares de pastagens semeadas (IBGE, 2017), dos quais 70% são do gênero *Urochloa spp.* No entanto, muitas dessas encontram-se em processo de degradação ou já se encontram degradadas (RODRIGUES et al., 2013). Esse fato se dá pela falta de práticas de manejo como a adubação de pastagens, ainda pouco adotadas pelos produtores e pecuaristas, já que poucos usam qualquer tipo de fertilizantes em suas pastagens desde o plantio inicial (BODDEY et al., 2020). Já em áreas agrícolas, as recomendações de fertilizantes atuais se baseiam na teoria químico-mineralista que visam atender às necessidades da cultura, como a soja, e aumentar os níveis de nutrientes do solo acima dos limites críticos (FARIAS et al., 2020), sem levar em consideração os nutrientes fornecidos via forma orgânica, pela decomposição de resíduos (matéria seca, raízes e esterco).

Em contrapartida a esse cenário, surge a filosofia da *adubação de sistema*. Essa considera a participação dos nutrientes fornecidos via forma orgânica, principalmente os contidos na biomassa microbiana do solo e na matéria orgânica lábil, devido à degradação de compostos orgânicos e a ciclagem de nutrientes (MIRANSARI, 2013).

Nesse contexto, Assmann et al. (2017) salientam que a *adubação de sistemas* se baseia no conceito de que o fertilizante deve ser aplicado na fase do sistema que apresenta menor exportação e maior capacidade de ciclagem de nutrientes, a fim de maximizar a produção total do sistema. Deve-se ressaltar que a utilização desse modelo de adubação só é possível pelo constante retorno e reutilização do mesmo nutriente dentro do sistema, entre os componentes solo-planta-animal. A ciclagem biológica de nutrientes entre as fases de um SIPA busca a máxima eficiência de uso de nutrientes, com o intuito de reduzir os insumos, evitar perdas e manter a fertilidade do solo a longo prazo (ASSMANN et al., 2017). Nesse sentido, tem-se como base o sistema de produção predominante no Cerrado brasileiro com soja adubada na safra

e na segunda safra a adubação é dependente da cultura (milho ou gramínea). A transferência da adubação da soja (primeira safra) para a adubação do sistema durante o período de segunda safra (fase pastagem) é uma alternativa racional do uso dos fertilizantes, pois esta pode favorecer a produção de pasto sem reduzir a produtividade da soja no verão. Isso só é possível devido aos benefícios da ciclagem de nutrientes, que fazem com que culturas como a soja em um SIPA sejam afetadas pela alteração da adubação fosfatada e potássica (FARIAS et al., 2020; DENARDIN et al., 2021)

Outro fator a levar em consideração nessa filosofia é que a adubação nitrogenada na fase pastagem promove maior produção de biomassa da gramínea, possibilita maior carga animal e, conseqüentemente, leva a maior quantidade de resíduos aportados ao solo. Essa maior quantidade de resíduos de alta qualidade, com baixa relação C/N, propicia maior atividade e biomassa da microbiota do solo, leva a uma maior ciclagem de nutrientes, que disponibiliza os nutrientes para a cultura de safra, o que pode propiciar altas produtividades nas culturas em sucessão, como a soja (BERNARDON, 2016).

Nesse contexto, o papel fundamental das pastagens na redução de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera e hidrosfera opera através do acoplamento dos ciclos C e N dentro da vegetação, matéria orgânica do solo e biomassa microbiana do solo (LEMAIRE et al., 2014).

A ciclagem de nutrientes constitui uma importante fonte de nutrientes e melhora de eficiência de uso de nutrientes (VENDRAMINI et al., 2014), garante maior produção de alimentos na forma de carne ou grãos, por unidade de nutriente utilizado. Conservar os nutrientes é a chave para o sucesso do agroecossistema, e o animal que pastoreia desempenha uma função crucial para a ciclagem de nutrientes e pode afetar positivamente o rendimento das culturas subseqüentes, como a soja, quando manejado sob intensidades moderadas de pastejo (SARTOR et al. 2018). Dessa forma, a *adubação de sistemas* considera os benefícios do período de pastejo bem manejado e inclui as quantidades reduzidas de nutrientes extraídos pelo gado além da ciclagem acelerada de nutrientes devolvidos ao solo via urina e fezes (HAYNES & WILLIAMS, 1993).

## 2.4. ALTERAÇÕES NO SOLO E PLANTAS DECORRENTES DA ADUBAÇÃO DE SISTEMAS

Os SIPA podem proporcionar serviços ecossistêmicos pois os animais aumentam a fertilidade do solo pelo aporte de nutrientes via urina e fezes, enquanto que os resíduos das culturas e animais são uma valiosa fonte de alimento para a microbiota do solo (RUFINO et al., 2011). Além disso, quando há diferenças nas estratégias de adubação adotadas, como no caso da *adubação de sistemas*, pode-se influenciar diretamente na produção de pasto, já que com a adubação com N, P e K a gramínea pode expressar seu máximo potencial produtivo. Com isso, há uma maior capacidade de suporte da pastagem, aumenta a taxa de lotação animal, o que reflete diretamente no aumento de quantidade de placas de esterco distribuídas nos piquetes.

O esterco dos animais na área é uma fonte de nutrientes lábeis, prontamente disponível, que podem aumentar a biomassa microbiana (HATCH et al. 2000), e uma excelente fonte de nutrientes para as culturas em sucessão (HIGGINS et al., 2019). No entanto, o padrão de distribuição das excreções bovinas depende de fatores como a taxa de lotação, método de pastoreio, tipo de animal (idade, sexo, espécie) e fatores relacionados ao comportamento dos animais em relação as condições ambientais como temperatura, declividade do terreno, característica da pastagem, posicionamento dos bebedouros, sombras e saleiros, além da forma do piquete (FRANZLUEBBERS, 2000; RODRIGUES et al., 2008). Além disso, as fezes bovinas são heterogêneas em sua composição e cria uma situação em que a distribuição de nutrientes do solo e o crescimento do pasto na escala subcampo e entre campos podem variar (HIGGINS et al., 2019).

Nesse contexto, Silva et al. (2014) demonstraram que áreas com maior presença de esterco bovino em SIPA, aumentou em cerca de 38% a disponibilidade de fósforo (P) e 122% na disponibilidade de potássio (K) do solo, o que refletiu em maior presença desses nutrientes nas plantas de soja, cultivadas em sucessão ao período de pastejo. Isso refletiu em incremento de 23% na produtividade da soja, quando comparado a áreas sem a presença de esterco, demonstrando que há a criação de um gradiente de fertilidade que reflete diretamente na resposta da cultura.



Além disso, os dejetos animais promovem incrementos de matéria orgânica e afeta a atividade bioquímica e da microbiota do solo (RATKE et al., 2021). Isso porque, resíduos com melhor qualidade (maior teor de N) podem resultar em maior eficiência na conversão dos resíduos pela microbiota e contribuir para o acúmulo de C e N no solo (COTRUFO et al., 2015). Um maior aporte de resíduos ao solo, resulta em maior quantidade de alimento para os microrganismos, que propicia maior estabilidade na microbiota do solo, e faz com que os microrganismos emitam menos CO<sub>2</sub> via respiração, que resulta em maior incorporação de C em seu organismo.

A *adubação de sistemas* possibilita aumentar a produção de forragem, conseqüentemente, aumenta a produção de carne, sem que haja perdas na cultura da soja no verão (FARIAS et al., 2020). Dessa forma, uma elevada quantidade de resíduos na superfície do solo e na subsuperfície por meio das raízes, leva a uma alta quantidade de nutrientes disponíveis aos microrganismos entre a fase pastagem e a fase lavoura (ALVES et al., 2015), os quais os disponibilizam para a cultura sucessora. Isso porque o pastoreio estimula a produção de raízes e exsudação de compostos orgânicos da raiz que promovem maior atividade e biomassa microbiana (DAVINIC et al., 2013).

Além disso, o processo de pastejo influencia diretamente na dinâmica de nutrientes e microbiota do solo. Já que com este, há um aumento no solo rizosférico que propicia maior quantidade de exsudatos radiculares. Com isso há maior quantidade de nutrientes prontamente disponíveis aos microrganismos, o que torna essencial o uso de indicadores microbiológicos. Isso porque estes são importantes componentes dos estudos que envolvem a avaliação de mudanças na qualidade dos solos agrícolas (SOUZA et al., 2014), devido à sua alta sensibilidade para detectar, alterações que ocorrem em função do seu uso e manejo (DICK, 1993; MATSUOKA et al. 2003; CARNEIRO et al., 2009).

Nesse contexto, a microbiota do solo desempenha um papel fundamental na sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos (FRANCO et al., 2020). Isso porque os microrganismos atuam na manutenção de processos importantes, como decomposição, mineralização de resíduos orgânicos e liberação de nutrientes para a nutrição de plantas (PROBER et al., 2015; BASHRI et al., 2018, CARLOS et al., 2020). A atividade da microbiota do solo pode ser avaliada pela medição da sua biomassa,

atividade de enzimas no solo, medidas da respiração basal (TÓTOLA & CHAER, 2002).

Os microrganismos do solo produzem enzimas extracelulares que mineralizam a matéria orgânica e liberam carbono e nutrientes em formas que podem ser assimiladas (ALLISON & VITOUSEK, 2005). Estas são o principal meio de degradação de compostos orgânicos complexos em pequenas moléculas que podem ser assimiladas (ALLISON & VITOUSEK, 2005).

Mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo causam variações na atividade enzimática e podem estar relacionadas a práticas de manejo ou diferentes produções de massa seca pelas plantas de cobertura (PIRES et al., 2020). Com isso a avaliação da atividade enzimática é amplamente utilizada, pois possibilita a medição da degradação de componentes orgânicos e minerais no solo. Além disso, as enzimas, assim como a produtividade das culturas, são altamente sensíveis e capazes de fornecer informações sobre mudanças nas principais funções do solo (LISBOA et al., 2012), em curtos períodos de tempo, são consideradas bioindicadores sensíveis no manejo e uso do solo, que podem ser aplicadas para o monitoramento dos agroecossistemas (MENDES et al., 2018, 2019).

Nesse contexto, as atividades enzimáticas foram identificadas como principais indicadores biológicos do solo por serem sensíveis às mudanças relacionadas à ciclagem biogeoquímica e à dinâmica da matéria orgânica do solo (ACOSTA-ARTÍNEZ et al., 2019). Dentre as principais enzimas do solo, estão as que estão envolvidas no ciclo de nutrientes essenciais as plantas, como C, P, N e S e são responsáveis pela mineralização de compostos orgânicos simples e mais lábeis, como açúcares, aminoácidos, proteínas e lipídios (XIAO et al., 2018).

A enzima  $\beta$ -glicosidade está relacionada à quebra de moléculas orgânicas complexas e a mineralização de compostos ricos em carbono, como a celulose (ACOSTA-ARTÍNEZ et al., 2019). A hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) é hidrolisada por várias enzimas e está relacionada com a atividade de lipases, proteases e esterases (BURNS et al., 2013). A urease atua na quebra de compostos orgânicos nitrogenados (CARLOS et al., 2020). A fosfatase ácida atua na mineralização de compostos que contêm fósforo orgânico, está geralmente associada à baixa disponibilidade de fósforo no solo (MNDZEBELE et al., 2020) e incrementos

na atividade dessa enzima indica aumento das frações de fósforo orgânico e microbiano (ALI et al., 2019).

### **3. CAPÍTULO I - ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO NA QUALIDADE DO SOLO DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

#### **RESUMO**

Diferentes estratégias de adubação utilizadas em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) influenciam na produção de pasto e taxa de lotação animal, refletem em alterações nos atributos microbiológicos do solo, conseqüentemente, na produtividade da soja. Em SIPA, isso pode refletir positivamente na produtividade da cultura em sucessão ao período de pastejo, como a soja. Esse estudo objetivou avaliar diferentes estratégias de adubação sobre atributos químicos, bioquímicos e a produtividade de soja em SIPA no Cerrado brasileiro. A área foi conduzida em delineamento experimental de blocos casualizados com três repetições, com 12 unidades experimentais. 1) Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja (AC-N), 2) Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem (AC+N), 3) Adubação com P e K aplicados na pastagem (AP-N) e 4) Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem (AS). As estratégias de adubação, alternativas a AC-N, proporcionaram maior lotação animal pela maior produção total de forragem (em média 39% superior a AC-N), o que refletiu em uma carga animal média 19% superior nessas estratégias. As estratégias alternativas a AC-N influenciaram nos teores de C e N do solo, na atividade enzimática e microbiana do solo. As estratégias de adubação, alternativas a convencional, propiciaram maior C (+426 mg C kg<sup>-1</sup> de solo) e no N (+77 mg N kg<sup>-1</sup> de solo) da biomassa microbiana e proporcionaram efeitos positivos na produtividade da soja, com acréscimos de 463 e 385 kg ha<sup>-1</sup> na produtividade das estratégias AC+N e AS, quando comparadas a AC-N. Com isso, as estratégias de AC+N, AP-N e AS favorecem a melhoria nos teores de C e N do solo, nos atributos bioquímicos e biológicos do solo, refletindo na produtividade da soja.

Palavras-chave: Agricultura de conservação, Sustentabilidade, adubação de sistema.

#### **FERTILIZATION STRATEGIES ON SOIL QUALITY AND SOYBEAN PRODUCTIVITY IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS**

#### **ABSTRACT**

Different fertilization strategies used in integrated crop-livestock systems (ICLS) influence pasture production and animal stocking rate, reflecting changes in soil microbiological attributes, consequently, in soybean productivity. In ICLS, this can reflect positively on the productivity of the crop in succession to the grazing period,

such as soybeans. This study aimed to evaluate different fertilization strategies on soil quality and soybean yield in ICLS in the Brazilian Cerrado. The area is conducted in a randomized block design with three replications, with 12 experimental units. 1) Conventional fertilization with P and K applied to the soybean crop (AC-N), 2) Conventional fertilization with P and K applied to the soybean crop plus N in the pasture (AC+N), 3) Fertilization with P and K applied on pasture (AP-N) and 4) Fertilization of systems with N, P and K applied on pasture (AS). The fertilization strategies, alternatives to AC-N, provided greater animal stocking due to the higher total forage production (on average 39% higher than AC-N), which reflected in an average animal load 19% higher in these strategies. Alternative strategies to AC-N influenced soil C and N contents, enzymatic and soil microbial activity. The fertilization strategies, alternatives to the conventional one, provided higher C (+426 mg C kg<sup>-1</sup> of soil) and N (+77 mg N kg<sup>-1</sup> of soil) of the microbial biomass and provided positive effects on soybean productivity, with increases of 463 and 385 kg ha<sup>-1</sup> in the productivity of the AC+N and AS strategies, when compared to AC-N. Thus, the AC+N, AP-N and AS strategies favor the improvement in soil C and N contents, in the biochemical and biological attributes of the soil, with increases in soybean productivity.

Key-words: Conservation agriculture, Sustainability, System fertilization.

### 3.1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial sugere necessidade de aumento na produção de alimentos. No entanto, esse aumento deve ser de forma sustentável, por meio da verticalização da produção, e possibilitar maior produção nas mesmas áreas e com menor unidade de insumos (LEMAIRE et al., 2015). Os SIPA são uma alternativa de intensificação sustentável de sistemas produtivos comerciais especializados, que podem aumentar a produtividade dos agroecossistemas e melhorar a ciclagem de nutrientes por meio do pastejo animal (FARIAS et al., 2020).

No Cerrado brasileiro, comumente é cultivado soja durante a safra (outubro a fevereiro) e milho ou pasto na segunda safra (fevereiro a maio). A forragem pode ser utilizada como cobertura do solo, para a manutenção do sistema plantio direto, ou para exploração pecuária sob pastejo, o que caracteriza os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). Nesse sentido, o manejo da adubação pode afetar diretamente a eficiência de uso dos fertilizantes, por meio da alteração das reações no solo e, conseqüentemente, na disponibilidade de nutrientes para as plantas (FIORIN et al., 2016). Nesse contexto, com a possibilidade de produzir duas safras

sucessivas em um mesmo ano agrícola nas regiões tropicais brasileiras, surge a necessidade de utilizar os fertilizantes de forma mais eficiente.

No entanto, em SIPA, as práticas de adubação ainda são realizadas com base na exigência das culturas agrícolas, e desconsidera as alterações promovidas no solo, como na microbiota e, conseqüentemente, na ciclagem de nutrientes do solo, além da dinâmica espaço-temporal dos sistemas de rotação de culturas (FARIAS et al., 2020; MACCARI et al., 2021). Com isso, surge a filosofia de '*adubação de sistema*', que parte do princípio que o fertilizante deve ser aplicado na fase do sistema que apresenta menor exportação e maior capacidade de ciclagem de nutrientes para maximizar a produção (ASSMANN et al., 2017).

Esse novo conceito de adubação considera que cada nutriente deve permanecer o maior tempo possível dentro do sistema, para que seja ciclado e reciclado entre os componentes solo-planta-animal. Dessa forma, leva-se em consideração a participação dos nutrientes fornecidos via forma orgânica, principalmente os contidos na biomassa microbiana do solo e na matéria orgânica lábil (MIRANSARI, 2013). Assim, os nutrientes aplicados em uma safra podem ser aproveitados na safra seguinte em um contínuo processo de ciclagem e reciclagem de nutrientes, que pode ser uma forma de viabilizar a maior produção de alimentos com a mesma unidade de nutriente aportado.

A adubação com nitrogênio (N) em SIPA realizada na pastagem que antecede a safra de grãos, pode favorecer a nutrição da cultura agrícola, como soja e milho (ASSMANN et al., 2003; BALBINOT JUNIOR et al., 2011). Outros estudos têm demonstrado que a produtividade de grãos não é afetada pela adubação de fósforo (P) e potássio (K) na cultura da soja cultivada após pastagens adubadas e bem manejadas em SIPA em solo de fertilidade construída (DENARDIN et al., 2020; FARIAS et al., 2020).

A menor resposta dos cultivos de grãos à adubação mineral em SIPA ocorre devido à potencialização do processo de ciclagem e reciclagem de nutrientes, já que o animal atua como um catalizador de reações por meio do processamento da forragem e deposição de dejetos na pastagem (FRANZLUEBBERS & STUEDEMANN, 2009). Com isso, pode haver alterações na atividade e biomassa microbiana do solo (YANG et al., 2012; LAROCCA et al., 2018), na atividade enzimática (LAROCCA et al.,

2018; FRANCO et al., 2020) e, conseqüentemente, na produtividade da soja cultivada em sucessão.

Nesse contexto, a fertilização do pasto, tanto com N, como com P e K, pode aumentar a produção da gramínea forrageira, influenciar na deposição de resíduos, alterar atributos bioquímicos do solo, aumentar os teores de C e N no solo e contribuindo com a produtividade da soja em sucessão. Com isso, esse estudo objetivou avaliar diferentes estratégias de adubação sobre os atributos químicos, bioquímicos e a produtividade de soja em SIPA no Cerrado brasileiro.

## 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1. Área de estudo

O experimento está instalado na Fazenda Guarita desde 2019 (16°34'2.15"S, 54°41'54.83"W), localizada no município de Rondonópolis, Mato Grosso - Brasil (FIGURA 1), em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (SANTOS et al., 2018), com a caracterização química, física e composição mineral da fração argila apresentada na TABELA 1. O clima da região é classificado como Aw, segundo Koeppen (ALVARES et al., 2013), com período chuvoso entre os meses de outubro a abril e seco entre maio a setembro (FIGURA 2). Antes da instalação do experimento a área era manejada com rotações de soja na safra, milho ou pecuária na entressafra (FIGURA 3).

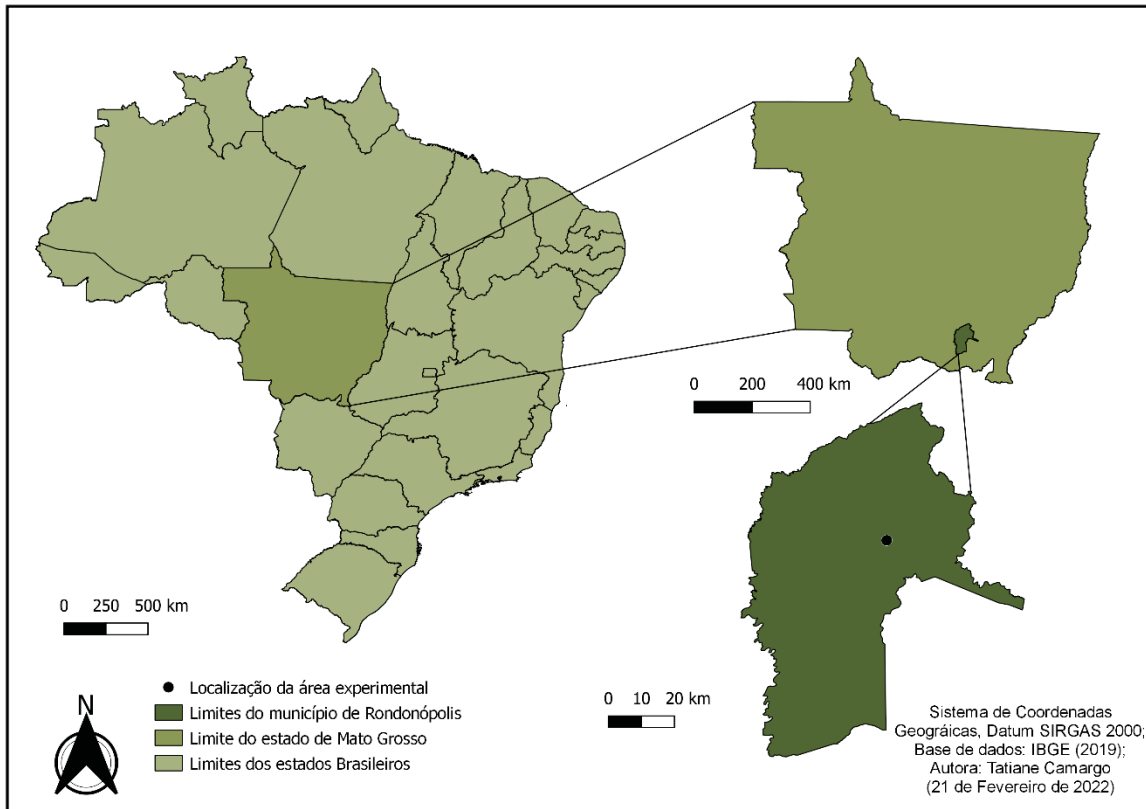


FIGURA 1 - Localização da área de estudo na Fazenda Guarita em Rondonópolis, Mato Grosso. (Fonte: A autora)

TABELA 1 - Caracterização química, física e composição mineral da fração argila de um Latossolo vermelho na instalação do experimento (2019) e na data de avaliação do solo (2021) em Rondonópolis, Mato Grosso.

Atributo	0,0 - 0,2 m		Classificação <sup>1</sup>	
	2019	2021	2019	2021
pH (CaCl <sub>2</sub> )	5,5	5,8	Adequado (4,9 - 5,5)	Alto (5,6 - 5,8)
P (mg dm <sup>-3</sup> )	30,8	67,2	Alto (>18)	Alto (>18)
K (mg dm <sup>-3</sup> )	69,2	100,7	Adequado (51 a 80)	Alto (> 80)
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	2,5	3,7	Adequado (1,5 - 7,0)	Adequado (1,5 - 7,0)
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,3	2,2	Adequado (0,5 - 2,0)	Alto (> 2,0)
H + Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	--	1,2	-	-
CTC (cmolc dm <sup>-3</sup> )	6,8	8,5	Adequada (6,1 - 9,0)	Adequada (6,1 - 9,0)
V (%)	59,9	71,3	Adequada (36 a 60)	Muito alta (≥71)
SB (cmolc dm <sup>-3</sup> )	-	5,8	-	-



S (mg dm <sup>-3</sup> )	--	6,7	Médio (5,0– 9,0)	Médio (5,0– 9,0)
MO (g kg <sup>-1</sup> )	15,1	25,3	Média (1,6 – 2,0)	Adequada (2,1 – 3,0)
Areia (g kg <sup>-1</sup> )		508,0	-	-
Silte (g kg <sup>-1</sup> )		86,0	-	-
Argila (g kg <sup>-1</sup> )		390,0	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		172,0	-	-
Fed		64,0	-	-
Feo		0,9	-	-
Caulinita		932,0	-	-
Gibbsita		68,0	-	-
Ct/(Ct+Gb)		0,9	-	-
Goethita		4,4	-	-
Hematita		23,0	-	-
Maghemita		0,0	-	-

\*CaCl<sub>2</sub>: Cloreto de Cálcio; MO: Matéria orgânica; P: fósforo disponível (Mehlich 1); K, Ca, K<sup>+</sup> trocável, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, respectivamente; S: Enxofre; SB: Soma de Bases; CTC: capacidade de troca catiônica em pH<sub>7,0</sub>; V%: saturação de base. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Ferro total obtido por digestão com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1); Fed: Conteúdo de ferro total cristalino ditionito; Feo: Conteúdo de ferro de baixa cristalinidade oxalato; Ct: caulinita; Gb: gibbsita. <sup>1</sup> Classificação segundo Sousa & Lobato (2004).

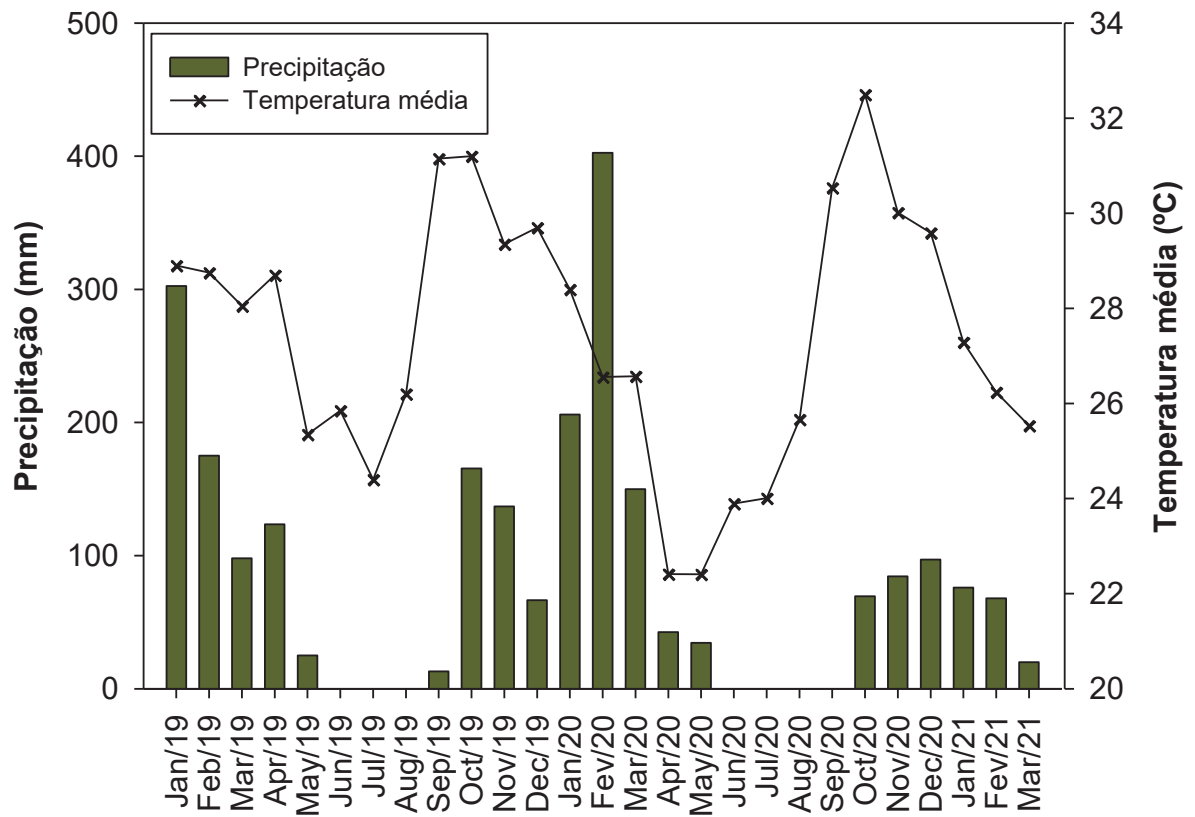


FIGURA 2 - Precipitação mensal e temperatura média do ar durante o período experimental, no município de Rondonópolis, estado de Mato Grosso, Brasil.  
Fonte: INMET, Estação automática – A907- Rondonópolis

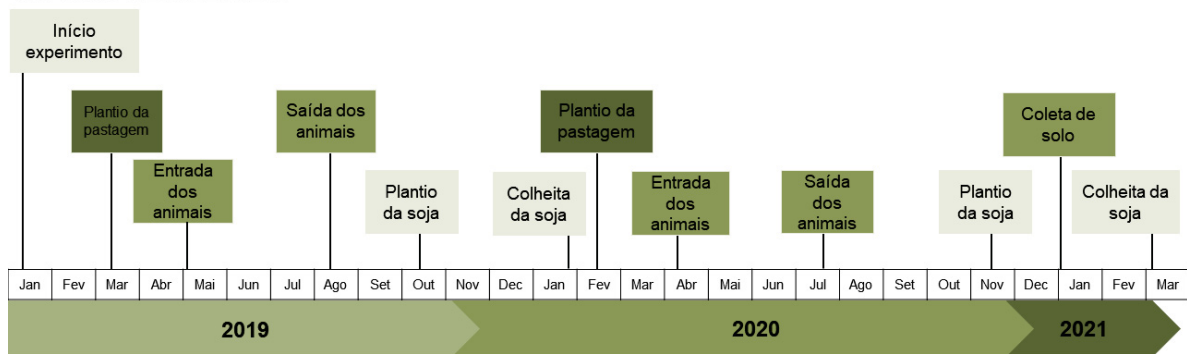
**HISTÓRICO GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL:****HISTÓRICO DETALHADO:**

FIGURA 3 - Histórico geral e detalhado da área experimental de 2010 a 2021 de um sistema integrado de produção agropecuária submetido a diferentes estratégias de adubação.

### 3.2.2. Desenho experimental

O experimento teve início em março de 2019 com a semeadura do pasto (*Urochloa brizantha*, cv. BRS Piatã) após a cultura da soja (*Glycine max*) que é implantada no mês de outubro em sistema plantio direto. A área total do experimento é de 22,8 hectares, conduzido em delineamento experimental em blocos casualizados com três repetições, totalizando 12 unidades experimentais (FIGURA 4). Os tratamentos consistem em diferentes estratégias de adubação: 1) Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja (AC-N), 2) Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N no pasto (AC+N), 3) Adubação com P e K aplicados no pasto (AP-N) e 4) Adubação de sistemas com N, P e K aplicados no pasto (AS; FIGURA 5).

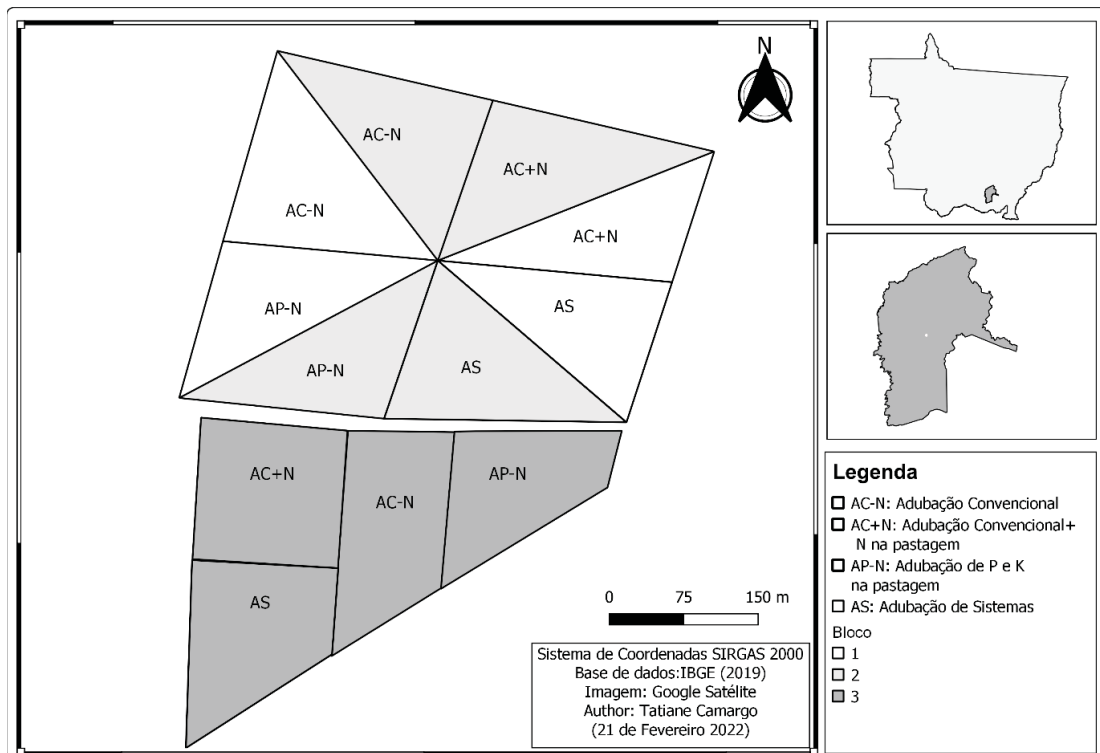


FIGURA 4 - Croqui da área experimental localizado na fazenda Guarita em Rondonópolis – MT

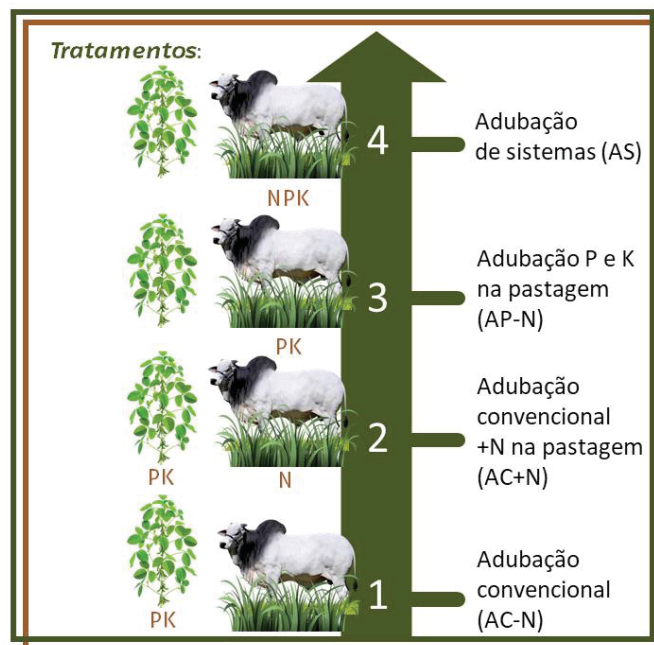


FIGURA 5 - Estratégias de adubação em sistema integrado de produção agropecuária.

### 3.2.3. Manejo e tratos culturais

Na safra de 2019/20 foi utilizada a cultivar de soja NS 7670 RR (semeadura em 10 de outubro de 2019) e na safra 2020/21 foi implantada em 10 novembro de 2020, logo após a dessecação da área, a cultivar Brasmax Ultra IPRO, semeada com espaçamento entre linhas de 50 cm nos dois anos. A semeadura da gramínea *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã foi realizada após a colheita da soja (18 de março de 2019 e 24 de fevereiro de 2020) com a utilização de semeadora de precisão com espaçamento de 17 cm e taxa de semeadura de 8,8 kg ha<sup>-1</sup> de sementes com valor cultural de 68%, para alcançar taxa de semeadura de 6 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras e viáveis.

A adubação fosfatada e potássica foi calculada a partir de uma estimativa de produtividade de 4,8 Mg ha<sup>-1</sup> de soja (SOUSA & LOBATO; 2004). Para isso são aplicados 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de K<sub>2</sub>O. A adubação com P e K foi feita na segunda safra (no estabelecimento da gramínea) ou no verão (na semeadura da soja) de acordo com os tratamentos. A adubação nitrogenada é aplicada no pasto no momento em que a gramínea está em fase vegetativa com quatro folhas totalmente expandidas, na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, como fonte o nitrato de amônio.

### 3.2.4. Período de pastejo

Para o pastejo no período da entressafra foram utilizados três animais *testes* mais animais reguladores, com as mesmas características dos *testes*, por bloco. Foram bovinos machos da raça nelore com peso médio de 246 kg (2019) e 260 kg (2020). O pasto foi manejado de acordo com os princípios do pastoreio Rotatínuo (CARVALHO et al., 2013; SAVIAN et al., 2018) em lotação contínua de forma com que as médias de altura do pasto foram mantidas em 32 cm, e para isso os animais reguladores eram inseridos ou retirados do pasto conforme a necessidade.

Em 2019, os animais entraram na área em 13 de março e saíram em 23 de agosto, que totaliza 132 dias de pastejo. Já em 2020 os animais pastejaram entre 21 de março e 17 de julho, que totaliza 118 dias de pastejo. Com o decorrer do período

de pastejo e redução da precipitação (FIGURA 2) houve diminuição na produção e qualidade da forragem ao longo do período de utilização do pasto, com necessidade de realizar a suplementação dos animais a pasto. Em 2019, a suplementação proteíco/energética foi de 0,3% do peso vivo (PV) e se iniciou quando o pasto teve diminuição na proteína bruta (PB) abaixo de 7%, após 86 dias de pastejo. Em 2020, a suplementação iniciou após 72 dias de pastejo com 0,5% do PV e foi gradativamente regulada para 0,8% do peso vivo (PV) até o final do ciclo de pastejo.

### 3.2.5. Avaliações

A pesagem dos animais foi realizada na entrada dos animais na área e mensalmente durante o período de pastejo. Antes de cada pesagem os animais ficaram em jejum total por 16 horas, para avaliação da carga animal por unidade de área e ganho de peso animal por área. O ganho de peso animal foi de 429 kg de peso vivo ha<sup>-1</sup> na estratégia de Adubação AC-N, 539 kg de peso vivo ha<sup>-1</sup> na AC+N, 494 kg de peso vivo ha<sup>-1</sup> na AP-N) e 493 kg de peso vivo ha<sup>-1</sup> na AS.

A determinação da massa de forragem residual (Mg ha<sup>-1</sup>) foi realizada após o final do ciclo de pastejo com a coleta de cinco amostras (0,25 m<sup>2</sup>) aleatórias por parcela. Após o corte as amostras foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados e levadas para o laboratório, onde ficaram em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 h até obtenção de peso constante, e então pesadas em balança analítica.

Durante o período de pastejo foram realizadas as medições do diâmetro das placas de esterco. Para isso, foram realizadas em cada unidade experimental 50 medições em placas de esterco frescas.

No final do ciclo de pastejo (agosto de 2020), realizou-se o levantamento da distribuição espacial das placas de esterco, por meio de imageamento com Drone da Marca DJI modelo PHANTOM 4 equipado com uma câmera CMOS de 1/2,3" e com 12,4 Mega Pixels efetivos. A escolha de georreferenciar as placas de fezes apenas uma vez se deram pelo fato de que nessa época não há chuvas na região, assim não há presença intensa de fatores (como besouros coprófagos) que possam levar a degradação das placas de esterco.

No momento do imageamento, cada placa de esterco foi identificada com uma folha de papel branca A4 e suas coordenadas foram determinadas a partir da criação de um ortomosaico de fotos, que foi corrigido por meio de pontos de controle georreferenciados com RTK (*Real Time Kinematic*) e suas coordenadas conhecidas no sistema de referência (SIRGAS 2000 / Zona UTM 21 S).

Após isso, foi realizado a classificação de imagens para identificar cada folha A4 por meio do método de classificação voltada a objetos, no software QGIS versão 3.12. As 3 bandas RGB (*Red, Green e Blue*) de cada pixel da imagem retrata um valor (de 0 a 255) foi possível identificar, por meio da calculadora raster, as placas de esterco para separação dos demais elementos (gramíneas, solo exposto e sombra). Após isso, converteu-se a imagem raster para vetor e foi gerado pontos para cada folha A4 que representa um alvo (placa de esterco). Automaticamente, para cada alvo foi criado suas informações de georreferenciamento (tabela de atributos).

Após esse procedimento, os dados vetoriais gerados foram utilizados para a determinação do número de placas de esterco por área em cada unidade experimental, densidade de placas de esterco e percentual de área ocupada pelas placas de esterco.

A densidade (D) de esterco depositada pelos animais na pastagem, foi calculada de acordo com a equação:

$$D = \frac{N * a}{A}$$

Onde, "A" é a área total de cada piquete, "N" é o número total de esterco animal no final da amostragem e "a" é a área média ocupada por cada placa de esterco animal.

O valor da densidade de esterco animal foi usado para calcular a porcentagem (P) de área coberta pelo esterco definida como:

$$P = 100 * D$$

O aporte total de esterco por unidade de área foi calculado pela multiplicação do número de placas pelo peso médio de placa de fezes, este último foi considerado como 200,5 g (em base de MS) para bovinos com peso médio de 300 kg (BRAZ et al., 2002).

A amostragem para as análises do solo foi realizada na camada de 0,0 - 0,1 m do solo, no pleno florescimento da soja. Foram coletados 12 pontos em cada unidade experimental e todos os pontos foram georreferenciados, para posterior coleta de dados durante a colheita da soja no mesmo local. As amostras de solo para as determinações dos atributos biológicos foram acondicionadas em sacos de plástico, devidamente identificadas e armazenadas sob refrigeração a 4°C até a realização das análises.

Os atributos microbiológicos avaliados foram: o carbono (VANCE et al., 1987) e o nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BROOKES, 1995); a respiração basal do solo (ALEF & NANNIPIERI, 1995); o quociente metabólico (ANDERSON & DOMSH, 1993); e o quociente microbiano (SPARLING & WEST, 1988). Avaliou-se a atividade da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA; DICK, 1996), da urease (TABATABAI & BREMNER, 1972), da  $\beta$ -glicosidase (EIVAZI & TABATABAI, 1988), da fosfatase ácida (DICK et al., 1996) e da arilsulfatase (TABATABAI & BREMNER, 1970).

Posteriormente, as amostras de solo foram secas e tamisadas em peneira de 2 mm e armazenadas. O fracionamento físico da matéria orgânica foi realizado segundo Cambardella & Elliot (1992) e analisado para C e N (TEDESCO et al., 1995). Os teores de carbono orgânico total foram determinados por oxidação em dicromato e os teores de N total por micro Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995).

O índice de manejo de carbono (IMC) foi calculado para a camada 0 a 0,10 m de profundidade, considerando a adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja (AC-N) como referência (IMC=100). O COP foi considerado como a fração lábil do carbono (C na matéria orgânica particulada), enquanto o carbono orgânico associado aos minerais (diferença entre o COT e o COP) foi considerado como a fração não-lábil do carbono (C na matéria orgânica associada aos minerais), de acordo com Blair et al. (1995), adaptado por Dieckow et al. (2005). As equações utilizadas foram:

$$LC = \frac{\textit{Carbono lábil}}{\textit{Carbono não lábil}}$$



Onde: “LC” é labilidade de carbono; Carbono lábil é o estoque de COP; Carbono não lábil (CnL) é a fração associada a minerais;

$$IC = \frac{COT \text{ das estratégias de adubação}}{COT \text{ de referênica}}$$

Onde: “IC” é o índice de carbono; “COT das estratégias de adubação” é o carbono das estratégias de adubação avaliadas; “COT de referênica” é o carbono da área de referênica (AC-N);

$$ILC = \frac{LC \text{ das estratégias de adubação}}{LC \text{ de referênica}}$$

Onde: “ILC” é o índice de labilidade do carbono; “LC das estratégias de adubação” é a labilidade do carbono das estratégias de adubação e “LC de referênica” é a labilidade do carbono do tratamento de referênica (AC-N);

$$IMC = IC * ILC * 100$$

Onde: “IMC” é o índice de manejo do carbono; “IC” é o índice de carbono e “ILC” é o índice de labilidade do carbono.

Na mesma data de coleta de solo foi realizada a coleta de matéria seca da soja no florescimento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), e em cada parcela foram coletados 12 metros lineares de plantas de soja. As amostras foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados e levadas para o laboratório, onde ficaram em estufa de circulação forçada de ar a  $65^\circ\text{C}$  por 72 h até obtenção de peso constante, e então pesadas em balança analítica.

A matéria seca total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) foi calculada pela soma da produção de matéria residual da forragem e a produção de matéria seca no florescimento da soja.

A colheita da soja foi realizada em 09 de março de 2021, em plena maturação fisiológica (estádio fenológico R8). O corte de plantas para as avaliações de produtividade foi realizado por meio da coleta de todas as plantas de quatro metros lineares por ponto (os mesmos em que foram realizadas as coletas de solo). As

plantas foram trilhadas, a massa de grãos limpa foi pesada e ajustadas ao conteúdo de 13% de umidade.

### 3.2.6. Análise estatística

As variáveis de solo foram submetidas aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk,  $P > 0,05$ ), homogeneidade de variâncias (Bartlett,  $P > 0,05$ ) e análise visual de independência de resíduos. Foi realizada análise de variância considerando um modelo misto, usando a função *lmer* do pacote *lme4* do programa estatístico R (v.4.1.1), sendo a estratégia de adubação considerada efeito fixo, e como efeitos aleatórios foram considerados o bloco e o ponto de coleta. Quando os efeitos aleatórios não foram significativos ( $P > 0,05$ ), foi realizada uma simplificação do modelo, conforme descrito por Pinheiro e Bates (2000) e Pinheiro et al. (2018). As médias, quando significativas em nível de 5%, foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A correlação de Pearson foi calculada para determinar a relação entre os atributos avaliados, por meio do software R versão 4.1.1, com o pacote *Vegan*.

## 3.3. RESULTADOS

As diferentes estratégias de adubação, alternativas à convencional (AC-N), influenciaram na adição de resíduos no solo, o que afetou diretamente nos atributos microbiológicos, enzimáticos e frações de C e N do solo, o que refletiu em maior produtividade da soja (TABELA 2).

TABELA 2 - Mínimo, máximo, média, coeficiente de variação (CV), desvio padrão e P valor dos atributos avaliados em sistemas integrados de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação.

Atributo	Mínimo	Máximo	Média	CV %	Desvio Padrão	P
C-BMS (mg de C kg <sup>-1</sup> solo)	71,4	1313,8	464,6	62,4	297,9	***
N-BMS (mg de N kg <sup>-1</sup> solo)	4,4	239,1	78,1	68,4	54,5	***
β-glicosidase (μg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> solo seco h <sup>-1</sup> )	55,6	586,3	279,6	42,2	118,1	**
Fosfatase ácida (μg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> solo seco h <sup>-1</sup> )	81,4	564,8	339,3	33,4	113,6	***

Arilsulfatase ( $\mu\text{g}$ nitrofenol $\text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	6,8	94,2	49,9	39,5	36,9	**
FDA ( $\mu\text{g}$ Fluoresceína $\text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	5,0	19,3	10,7	32,0	3,4	**
Urease ( $\mu\text{g}$ $\text{NH}_4\text{-N}$ $\text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	0,3	3,0	1,5	46,1	0,7	ns
RBS ( $\text{mg}$ C- $\text{CO}_2$ $\text{kg}^{-1}$ solo hora $^{-1}$ )	0,2	1,1	0,6	38,4	0,2	*
qCO <sub>2</sub> ( $\text{mg}$ C- $\text{CO}_2$ $\text{kg}^{-1}$ solo hora $^{-1}$ )	0,2	7,5	1,7	94,1	3,9	***
qMIC (%)	0,5	7,3	3,1	56,2	1,7	***
NT/N-BM						
Carga animal ( $\text{kg}$ PV $\text{ha}^{-1}$ )	1215	1665	1500	5,4	141,4	*
Peso placa ( $\text{kg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	229,2	371	313	5,9	40,7	**
Número de placas (ha)	1.134	1.852	1.561	5,9	203,2	**
Diâmetro de placas (cm)	0,17	0,20	0,19	4,8	0,008	ns
Matéria seca total ( $\text{kg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	10.838,0	12.236,0	11.669,0	2,2	427,1	*
Produção total de forragem ( $\text{Mg}$ MS $\text{ha}^{-1}$ )	13,2	20,7	17,3	7,2	2,7	*
COT ( $\text{Mg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	11,4	19,8	14,4	13,0	1,9	ns
COP ( $\text{Mg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	1,9	5,4	3,8	25,4	0,9	ns
COM ( $\text{Mg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	8,1	13,7	10,9	12,7	1,4	**
NT ( $\text{Mg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	1,4	5,6	2,3	18,0	0,4	**
NP ( $\text{Mg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	0,2	1,0	0,5	30,0	0,1	***
NOM ( $\text{Mg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	1,2	2,9	2,0	18,5	0,3	*
Produtividade da soja ( $\text{kg}$ $\text{ha}^{-1}$ )	3.324,0	4.842,0	4.147,0	7,5	313,6	***
CnL	6,9	14,6	10,8	15,0	1,6	ns
Lab	0,1	0,7	0,3	31,9	0,1	ns
IC	0,8	1,4	1,1	13,0	0,1	ns
llab	0,5	2,0	1,1	31,9	0,3	ns
IMC	79,0	197,0	121,0	21,3	25,8	***

FDA: Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína; RBS: Respiração basal do solo; qCO<sub>2</sub>: Quociente metabólico; qMIC: Quociente microbiano; C-BMS: Carbono da biomassa microbiana; N-BMS: Nitrogênio da biomassa microbiana do solo; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono particulado; COM: Carbono associado aos minerais; NT: Nitrogênio orgânico total; NP: Nitrogênio particulado; NOM: Nitrogênio associado aos minerais; CnL: carbono não lábil; LC: labilidade do carbono; IC: índice de carbono; ILC: índice de labilidade do carbono; IMC: Índice de manejo do carbono. CV: Coeficiente de variação; P: nível de significância; ns: não significativo; \* P < 0,05; \*\* P < 0,01; \*\*\* P < 0,001;

### 3.3.1. Aporte de resíduos e carga animal

As estratégias de adubação, alternativas a AC-N, proporcionaram maior lotação animal, maior produção total de forragem (em média 39% superior a AC-N), o que

refletiu em uma carga animal média 19% superior nessas estratégias (TABELA 3). Como consequência da maior carga animal, houve maior adição de resíduos, via placas de esterco (29%), percentual de área ocupada (44%) e aporte total de esterco (32%), média das estratégias de adubação em comparação a AC-N (TABELA 3). O diâmetro de placas (0,1861 – 0,1977 m) foi afetada pelas diferentes estratégias de adubação adotadas.

TABELA 3 – Matéria seca total, número e diâmetro de placas de esterco, aporte total de esterco e carga animal em sistema integrado de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação

Atributo	Estratégia de adubação			
	AC-N	AC+N	AP-N	AS
Produção total de forragem (Mg MS ha <sup>-1</sup> )	13,4 b	19,6 A	18,2 a	18,1 a
Matéria seca total (kg MS ha <sup>-1</sup> )	11.103,4 b	11.748,7 ab	12.057,7 a	11.748,7 ab
Número de placas de esterco (ha)	1.257,4 b	1.744,3 a	1.638,3 a	1.695,5 a
Diâmetro de placas de esterco (cm)	18,9 ns	18,6	19,7	19,6
Aporte total de esterco (kg de MS ha <sup>-1</sup> )	252,2 b	349,7 a	328,1 a	321,9 a
Carga animal (kg PV ha <sup>-1</sup> )	1.305 b	1.575 a	1.500 ab	1.620 a

\*Mg: megagrama; MS: Matéria seca. PV: Peso vivo. AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ . ns: não significativo.

A matéria seca total das estratégias de adubação, alternativas a convencional, apresentaram maior matéria seca, quando comparadas a AC-N (TABELA 3).

### 3.3.2. Alterações no carbono e nitrogênio

O carbono da matéria orgânica associada aos minerais foi maior na estratégia AS (+18%), já na AC+N (+6%) apresentou teores intermediários, quando comparado a AC-N (FIGURA 6). No curto prazo, as diferentes estratégias de adubação não influenciaram o carbono da matéria orgânica particulada (3,3 – 4,2 Mg ha<sup>-1</sup>) e o carbono orgânico total (13,5 – 15,0 Mg ha<sup>-1</sup>). Assim, a fração lábil do C da matéria

orgânica representa em média 27% do C total da matéria orgânica do solo nas estratégias de adubação alternativas a AC-N (FIGURA 6a).

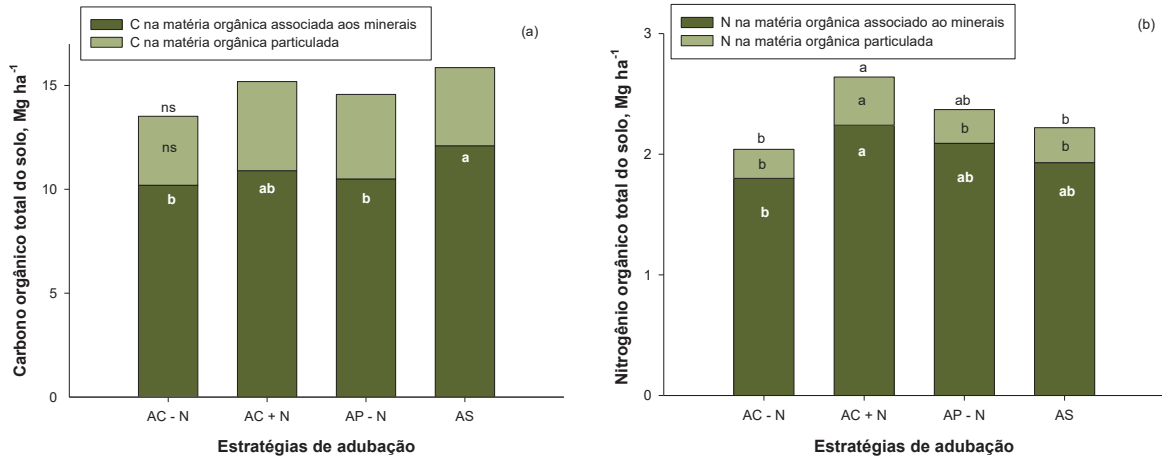


FIGURA 4 - Carbono orgânico total (a), nitrogênio orgânico total (b), suas diferentes frações em sistemas integrados de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação.

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ . ns: não significativo

O NT variou de 2,0 – 2,6 Mg ha<sup>-1</sup>, o nitrogênio da matéria orgânica particulada variou de 0,2 – 0,4 Mg ha<sup>-1</sup> e o nitrogênio da matéria orgânica associada aos minerais de 1,8 – 2,2 Mg ha<sup>-1</sup> (FIGURA 6b). A estratégia AC+N proporcionou maior nitrogênio total (+28%), nitrogênio particulado (+60%) e nitrogênio da matéria orgânica associada aos minerais (+24%), quando comparado a AC-N (FIGURA 6b).

O posicionamento da adubação com P, K e N na fase pastagem não influenciou no carbono não lábil (CnL), na labilidade do carbono (LC), no índice de carbono (IC) e índice de labilidade do carbono (ILC) (TABELA 4). No entanto, o índice de manejo do carbono (IMC) foi alterado, seguiu o comportamento: AC-N ≤ AS (13% maior que AC-N) ≤ AP-N (27% maior que AC-N) ≤ adubação convencional + N na pastagem (43% maior que AC-N) conforme a TABELA 4.

TABELA 4 - Carbono não lábil (CnL), labilidade do carbono (LC), índice de carbono (IC), índice de labilidade do carbono (ILC), índice de manejo de carbono (IMC), em sistema integrado de produção agropecuária sob diferentes estratégias de adubação.

Estratégia de adubação	CnL	LC	IC	ILC	IMC
------------------------	-----	----	----	-----	-----

AC-N	10,2 ns	0,3 ns	1,0 ns	1,0 ns	100 c
AC+N	10,7	0,4	1,1	1,3	143 a
AP-N	10,8	0,4	1,1	1,1	127 ab
AS	11,8	0,3	1,1	0,9	113 bc

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ . ns: não significativo.

### 3.3.3. Atividade e biomassa microbiana

As estratégias de adubação, alternativas a convencional, propiciaram maior C (+426 mg C kg<sup>-1</sup> de solo) e no N (+77 mg N kg<sup>-1</sup> de solo) da biomassa microbiana (FIGURA 7). O N-BMS foi superior nos seguintes tratamentos: AC+N (556%) ≥ AP-N (360%) ≥ AS (267%), quando comparados à AC-N (FIGURA 7b).

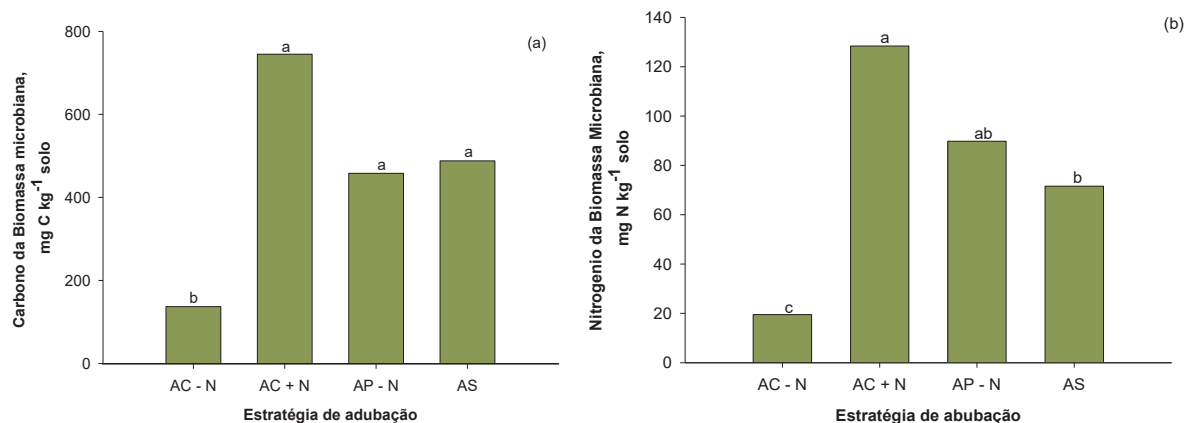


FIGURA 5 - Carbono (a) e nitrogênio (b) da biomassa microbiana sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense.

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ .

As estratégias AC+N, AP-N e AS apresentaram qCO<sub>2</sub> 324% inferior, em relação ao tratamento AC-N (TABELA 5). O qMIC apresentou incrementos de 329% na AC+N em relação a AC-N (TABELA 5). Já a AP-N e AS, não diferiram entre si, mas foram 162% e 180% superiores a AC-N, respectivamente. As estratégias de adubação não promoveram alterações na respiração basal do solo (RBS) (TABELA 5).

TABELA 5 - Respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e quociente microbiano ( $qMIC$ ) sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense.

Estratégia de adubação	RBS	$qCO_2$	$qMIC$
	mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> solo hora <sup>-1</sup>	mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> solo hora <sup>-1</sup>	%
AC-N	0,7 ns	4,5 a	1,1 c
AC+N	0,5	0,8 b	4,9 a
AP-N	0,5	1,1 b	2,9 b
AS	0,7	1,4 b	3,2 b

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AP+N: Adubação com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ . ns: não significativo.

### 3.3.4. Atividade enzimática do solo

O posicionamento da adubação com P, K e N na fase pastagem promove estímulo à atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase (+75%), fosfatase ácida (+77%), arilsulfatase (+72%) e FDA (+53%), em relação a adubação convencional realizada na cultura da soja (TABELA 6). A atividade da enzima urease não foi afetada pelas diferentes estratégias de adubação.

TABELA 6 - Atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase, arilsulfatase, hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) e urease sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense.

Estratégia de adubação	$\beta$ -glicosidase	Fosfatase ácida	Arilsulfatase	FDA	Urease
	$\mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$	$\mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$	$\mu\text{g } \rho\text{-nitrofenol } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$	$\mu\text{g Fluoresceína } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$	$\mu\text{g NH}_4\text{-N } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$
AC-N	179 b	215 b	32,6 b	7,5 b	1,5 ns
AC+N	279 ab	373 a	58,9 a	11,7 a	1,6
AP-N	333 a	401 a	59,8 a	12,7 a	1,6
AS	328 a	368 a	50,4 ab	10,3 ab	1,4

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ . ns: não significativo.

### 3.3.5 Produtividade da soja

As diferentes estratégias de adubação proporcionaram efeitos na produtividade da soja que variou de 3.093 a 4366 kg ha<sup>-1</sup> (FIGURA 8). Foram observados acréscimos de 463 e 385 kg ha<sup>-1</sup> na produtividade das estratégias AC+N e AS, respectivamente, em relação a AC-N.

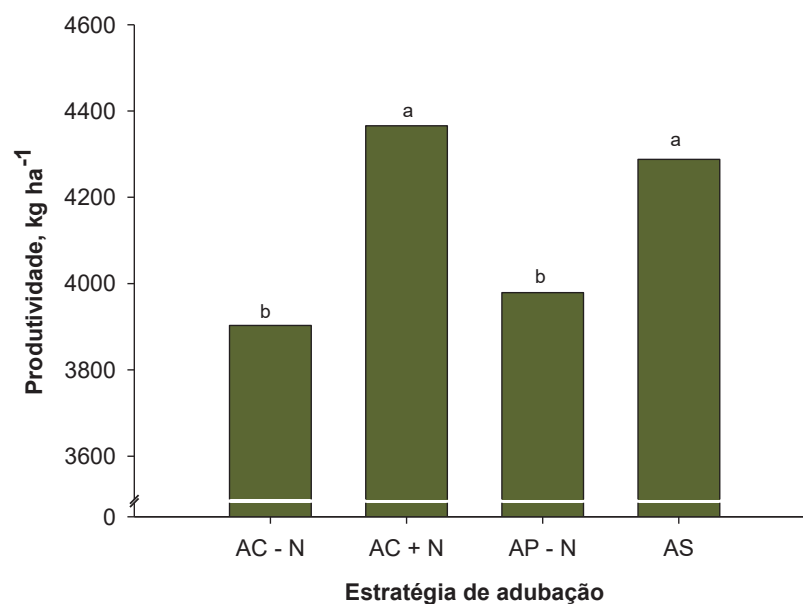


FIGURA 6 - Produtividade da soja sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense.

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. ns: não significativo.

## 3.4. DISCUSSÃO

Independentemente da estratégia de adubação e mesmo com o estresse hídrico (FIGURA 2), obtiveram-se altas produtividades de soja (com produção média de 4.122 kg ha<sup>-1</sup> obtida nesse estudo e 3.485 kg ha<sup>-1</sup> a produção média do estado na mesma safra; CONAB, 2022) em solo de fertilidade média a alta.

As estratégias de adubação, AC+N (11,8%) e AS (9,8%) refletiram em incrementos na produtividade da soja, quando comparadas a AC-N (FIGURA 8). Com



isso, pode-se perceber que com a presença de P e K na adubação da pastagem (AS) utilizar N na pastagem (AC+N) parece ter sua eficiência reduzida. Esses resultados, podem ser atribuídos à alta atividade microbiana que promove a decomposição e mineralização dos resíduos orgânicos (ciclagem de nutrientes) ocorrida na fase lavoura, proveniente da adubação nitrogenada na fase pastagem.

Isso porque, grande parte dos nutrientes fornecidos, como o N, são ciclados e disponibilizados para a cultura da soja em sucessão, com isso pode-se dispensar a adubação no seu cultivo em solos de fertilidade construída (DENARDIN et al., 2020; FARIAS et al., 2020). Até o momento, esses são os primeiros resultados que demonstram influência de diferentes estratégias de adubação, incluído *adubação de sistemas*, com efeitos positivos na produtividade da soja. Isso porque, os resultados reportados até o momento, não encontraram diferenças na produtividade da cultura da soja como Zanella et al. (2020), ao avaliarem a antecipação total ou parcial da fertilização da cultura da soja para a pastagem de aveia preta, por Denardin et al. (2020) também observaram ausência de resposta da soja à adubação com P e K em terras baixas sob SIPA no sul do Brasil, da mesma forma que Farias et al. (2020) ao estudarem diferentes estratégias de adubação no sul do Brasil.

As estratégias de adubação alternativas a AC-N, levaram a maiores teores de N da matéria orgânica total, particulada e associada aos minerais e nos teores de C da matéria orgânica particulada e no IMC (FIGURA 6; TABELA 4). Isso porque o acúmulo de C e N é representado pelo equilíbrio entre as entradas e saídas de C e N no sistema (PROMMER et al., 2020). Estes são determinados pela produção de biomassa vegetal, resíduos que são aportados ao solo, decomposição e transformações (imobilização, liberação e mineralização) desse nutriente. Nesse contexto, para a manutenção de teores de C orgânico do solo, em solos tropicais, são necessários aportes iguais ou superiores a 12 Mg MS ha<sup>-1</sup> em sistemas de plantio direto sem pastejo (BAYER et al., 2006).

Com a matéria seca total + aporte total de esterco os requisitos de adição de resíduos previamente estabelecidos (12 Mg MS ha<sup>-1</sup>) são supridos em todas as estratégias de adubação (TABELA 3). Além disso, deve-se ressaltar que o retorno de resíduos orgânicos na forma de esterco foi em média 32% maior nas estratégias AC+N, AP-N e AS, quando comparadas a AC-N. Esse aumento, deve-se a maior

produção total de forragem dessas estratégias (TABELA 3), decorrente da adubação com N, P e K na fase pastagem que resultou em maior carga animal e, conseqüentemente, em maior número e aporte total de esterco (TABELA 3).

Sabendo-se a importância que os dejetos têm, considerando sua maior eficiência em conversão e manutenção de C e N do solo (ASSMANN et al., 2014; SILVA et al., 2014), acredita-se que as estratégias de adubação, alternativas à convencional, possam ser eficientes para potencializar os acúmulos de C e N no solo com o passar do tempo, em médio e longo prazo e principalmente ativar a microbiota do solo que exercerá sua função em relação aos serviços ecossistêmicos. Visto que além das alterações na adição de resíduos essas estratégias também afetaram na atividade microbiana, enzimática e frações de C e N do solo. Fatores esses, que contribuíram para a maior produção de soja nas estratégias AC+N e AS (FIGURA 8).

As alterações no aporte de resíduos resultaram em incrementos na biomassa e na atividade microbiana do solo. Isso porque, matéria seca em maior quantidade, pela fertilização de N, P e K, resulta em alta adição de resíduos com baixa relação C/N (APOLINÁRIO et al., 2013; VARGAS et al., 2018) que são facilmente decompostos, mineralizados e/ou imobilizados por meio da microbiota do solo favorecendo a ciclagem de nutrientes e liberação de nutrientes em formas prontamente disponíveis na solução do solo para a absorção de plantas, corroborando com outros autores (ALI et al., 2019) e torna a utilização desses nutrientes mais eficiente. Deve-se levar em consideração o regime climático da região (FIGURA 2), com clima seco entre os meses de maio a setembro, como um fator não potencializador da decomposição, mineralização e imobilização dos nutrientes.

A antecipação da adubação para a fase pastagem, com ou sem N, favoreceu a biomassa e atividade microbiana e enzimática do solo (FIGURA 7; TABELA 5; TABELA 6). Com isso, maiores teores de C e N da biomassa microbiana, observados nesse estudo nas estratégias de adubação alternativas à AC-N, são positivos para a manutenção de C e N no sistema (FIGURA 7). Isso porque a biomassa microbiana, considerada a fração viva do COT do solo, exerce diferentes serviços ecossistêmicos, como a decomposição de resíduos de culturas e mineralização (BALOTA et al., 2008; SOUZA et al., 2010). Esses fatores são importantes para manutenção de reservatórios de nutrientes (imobilizados) e sustentabilidade do solo, assim, uma maior biomassa

microbiana é desejável (BATISDA et al., 2012; PROBER et al. 2015; BASHRI et al. 2018; FRANCO et al., 2020).

No entanto, pelo fato de o C e N estarem na biomassa microbiana, durante um curto período de tempo, se encontram em forma imobilizada, forma indisponível para a absorção do N pelas plantas, mas que conserva esses nutrientes no agroecossistema (BATISDA et al., 2012; PROBER et al. 2015). Com isso, cerca de 109 kg ha<sup>-1</sup> de N e 608 kg ha<sup>-1</sup> de C (FIGURA 7) estão temporariamente imobilizados na biomassa microbiana, forma em que não resulta em perdas, mas com o tempo esse N pode ser disponibilizado para as plantas. Já que este estudo não foi avaliado ao longo do tempo, outra possível explicação é que a biomassa microbiana já esteja em processo de mineralização desses elementos da solução do solo.

Nesse estudo, o  $qMIC$  nas estratégias alternativas a AC-N variou de 2,9 – 4,9% (TABELA 5), e demonstra que o percentual de reserva de C do solo, indicando aumento da incorporação do carbono no sistema é maior nas estratégias de adubação alternativas a AC-N. Estudos demonstram que o  $qMIC$  pode variar de 0,27 a 7% e que esse indicador reflete a mudança de padrão de entrada de MOS via imobilização do C, eficiência na conversão de C microbiano, perdas de C no solo e a estabilização de C pela fração mineral (SPARLING, 1992; ANDERSON & DOMNSH, 1993) ou seja, no presente estudo está ocorrendo uma eficiência maior nesses sistemas de antecipação de adubação na conversão do carbono contido no resíduo orgânico em COT, já que a biomassa é considerada a parte viva.

Maiores percentuais de  $qMIC$ , aliados a baixos teores de  $qCO_2$ , como observados nas estratégias AP-N e AS pode indicar incorporação/sequestro de carbono nos sistemas como observado por Laroca et al. (2018). Valores acima de 4%, como observado na estratégia AC+N (TABELA 5), indicam que o C está sendo incorporado no carbono orgânico na fração associada aos minerais (SPARLING, 1992). Isso porque, essa estratégia possibilitou que os microrganismos incorporassem mais C em sua estrutura (INSAM & DOMSCH, 1988; PRIMIERI et al., 2017), ocasionando menores perdas via respiração microbiana o que aponta ser um ambiente próximo ao equilíbrio (LAROCCA et al., 2018).

Com isso, deve-se ressaltar que a estratégia AS apresentou o maior teor de C associado aos minerais (FIGURA 6), com indícios de que no momento avaliado o C

das estratégias AC+N e AP-N o C associado aos minerais estava adsorvido na superfície das argilas impedindo sua decomposição. Isso ocorre por meio da liberação do C que estava na biomassa microbiana para a solução do solo, e este pode se associar a minerais por ser dependente da mineralogia do solo (SOKOL et al, 2019), ou ficar na própria solução do solo. Nesse contexto, a decomposição de folhas e raízes em estágio inicial contribuem com uma quantidade relativamente grande de C na matéria orgânica associada aos minerais do solo (BIRD et al., 2008; RUBINO et al., 2010) que leva o C a uma forma mais estável (TENELLI et al., 2019; PROMMER et al., 2020).

Os incrementos no IMC (TABELA 4) nas diferentes estratégias de adubação, alternativas a AC-N, e mais acentuados na estratégia AC+N podem ser reflexo dos incrementos observados no C-BMS aliado ao carbono da matéria orgânica particulada. Isso porque o IMC leva em conta a fração de C lábil que é aportado ao solo (DIEKOW et al., 2005), carbono na matéria orgânica particulada, que é justamente a fração de C mais sensível (SOUZA et al., 2008) que são substratos para os microrganismos heterotróficos do solo (TÓTOLA & CHAER, 2002). Além dessa fração, os microrganismos também utilizam como fonte de alimento compostos lábeis provenientes de resíduos de plantas (exsudatos radiculares e matéria seca) e ácidos orgânicos com baixo peso molecular como glicose e aminoácidos (SOARES & ROUSK, 2019).

As enzimas extracelulares  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida, arilsulfatase e FDA apresentaram maiores atividades quando a adubação de N, P e K foi posicionada na fase pastagem (TABELA 6). Isso porque, cada uma dessas enzimas atua em um ciclo biogeoquímico, responsável pela ciclagem e liberação de nutrientes como de C, P, N ou enxofre, que são essenciais ao desenvolvimento das plantas. Assim, maiores atividades dessas enzimas indicam maior decomposição de fitomassa e, conseqüentemente, maior ciclagem dos nutrientes associados as mesmas. Isso ocorre pelo fato de que essas enzimas podem controlar a taxa de decomposição de resíduos (AGUMAS et al., 2021) e, conseqüente, liberação de nutrientes para as plantas.

Ressalta-se que os maiores teores observados na  $\beta$ -glicosidase (enzima que atua no ciclo do C) estão diretamente relacionados à qualidade do resíduo orgânico

adicionado ao solo (STIEVEN et al., 2014), sendo que essa enzima atua na etapa final do processo de decomposição da celulose (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

A biomassa, atividade microbiana e enzimática do solo têm se mostrado mais sensíveis do que o C orgânico total à perturbação do solo resultante do manejo de resíduos e estratégias de adubação (GEISSELER & HORWATH, 2009). Assim, o aumento da biomassa microbiana e atividade da  $\beta$ -glicosidase pode refletir no aumento da entrada de C no solo nas estratégias alternativas a AC-N (GALINDO et al., 2022).

Incrementos nos teores de N já eram previstos, uma vez que a aplicação desse nutriente foi um dos fatores que diferiu entre as diferentes estratégias de adubação, e duas delas receberam N na pastagem (FIGURA 6). No entanto, não era esperado que as duas estratégias de adubação que receberam N na adubação da pastagem (AS e AC+N), apresentassem comportamentos distintos. As duas estratégias (AC+N e AS) receberam mais N do que as demais estratégias, o que proporcionou maior estoque de N total, particulado e associado aos minerais na estratégia de adubação AC+N (FIGURA 6). No entanto, isso não ocorreu na AS, muito pelo fato de que o N total que é ciclado e liberado pelos microrganismos de forma mais rápida, pode estar retido nas cargas do solo (ANGST et al., 2021), visto que é um solo com grande quantidade de cargas denotado pelos óxidos de ferro da fração argila (TABELA 1), ou, em último caso, perdido do solo via lixiviação.

Outro fato que deve ser ressaltado é o teor de nitrogênio total ser maior na AC+N do que na AC-N (FIGURA 6) equivale a um acréscimo de 590 kg de N por hectare quando se adiciona N na adubação da pastagem e mantém a adubação de P e K na cultura safra. Esse resultado, pode ser reflexo da adubação nitrogenada na fase pastagem desse sistema que influencia na maior produção de resíduos e, conseqüentemente, na conversão em N microbiano que será liberado para a solução do solo, tornando-se o teor de N total.

Com esse estudo foi possível compreender os benefícios da antecipação da adubação de N, P e K para os atributos de qualidade do solo. Isso porque com diferentes estratégias de adubação alternativas a AC-N, há maior disponibilização de nutrientes no solo, via ciclagem de nutrientes que é realizada pelas enzimas extracelulares que são liberadas pela microbiota do solo. Outro grande benefício

dessas estratégias é a maior produtividade da soja, que é um importante indicador de sustentabilidade desses sistemas produtivos que utilizam o reposicionamento da adubação com N, P e K. Além disso, com a utilização das diferentes estratégias de adubação, alternativas à adubação convencional, é possível aumentar a produção de alimentos de forma sustentável. Podendo-se considerar as mesmas como ferramentas para a intensificação sustentável da produção agrícola, por meio da produção de mais alimentos com a otimização do uso de fertilizantes.

### 3.5. CONCLUSÃO

As estratégias de AC+N, AP-N e AS potencializam a produção de forragem, possibilitam maior carga animal, favorecem o aporte de resíduos e melhoram dos atributos bioquímicos e biológicos do solo.

Os SIPA com AC+N aumentam teores de N total, particulado e associado aos minerais do solo e potencializa os incrementos no índice de manejo de carbono. Isso refletiu em maior produtividade da soja nas estratégias AC+N e AS.

### 3.6. REFERÊNCIAS

ALEF, K. & NANNIPIERI, P., 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. 1995. London, **Academic Press**. ISBN: 978-0-12-513840-6 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-513840-6.X5014-9>

ALVARES, C.A., et al., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. 22: 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ANDERSON, J.P.E. & DOMSCH, K.H., 1993. The metabolic quotient (qCO<sub>2</sub>) as specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 25: 393-395. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)

ANGST, G.; MUELLER, K.E.; NIEROP, K.G.J.; SIMPSON, M.J. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter, **Soil Biology and Biochemistry**, Volume 156, 2021, 108189, ISSN 0038-0717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.

APOLINÁRIO, V.X.O.; DUBEUX JR, J.C.B.; MELLO, A.C.L.; VENDRAMINI, J.M.B.; LIRA, M.A.; SANTOS, M.V.F.; MUIR, J.P. Deposition and decomposition of signal

grass pasture leaf litter under varying nitrogen fertilizer and stocking rates. **Agron. J.**, 105, 2013, pp. 999-1004, DOI: 10.2134/agronj2012.0433

ARAÚJO WF, SAMPAIO RA, MEDEIROS RD. Resposta de cultivares de soja à adubação fosfatada. **Revista Ciência Agronômica**. 2005 May; 36(2)129-34.

ASSMANN, T.S.; SOARES, A.B.; ASSMANN, A.L.; HUF, F.L., LIMA, R.C. de. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. In: JAMHOUR, J; ASSMANN, T.S. Palestras: intensificação com sustentabilidade. Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária, 1.; Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, 4. 2017. Cascavel. Pato Branco: UTFPR Câmpus Pato Branco, 2017. p. 67–84. Disponível em: <http://www.pb.utfpr.edu.br/coagr/eventos>

ASSMANN, T.S.; RONZELLI, P.; MORAES, A.; ASSMANN, A.L.; KOEHLER, H.S.; SANDINI, I. Corn yield on no tillage crop-pasture rotation in presence and absence of white clover, grazing and nitrogen. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, 27, 2003, pp. 675-683. DOI: 10.1590/S0100-06832003000400012

ASSMANN, J.M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A.P.; COSTA, S.E.V.G. de A.; CECAGNO, D.; CARLOS, F.S.; CARVALHO, P.C.F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.52-59, 2014a. DOI: 10.1016/j.agee.2013.12.003.

BALBINOT JUNIOR, A.; MORAES, A.; PELISSARI, A.; VEIGA, M.; DIECKOW, J. Different soil use in the winter season and its effect on the maize crop in succession. **Revista Brasileira de Agrociencia**, 17, 2011, pp. 94-107, 10.18539/cast.v17i1.2036

BIRD, J.A.; KLEBER, M.; TORN, M.S. C-13 and N-15 stabilization dynamics in soil organic matter fractions during needle and fine root decomposition. **Organic Geochemistry**, 39, 465–477, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.12.003>

BROOKES, P.C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biol. Fert. Soils**, 1995, 19: 269-279.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2009; 33: 147-157.

CARVALHO P. C. F. Harry Stobbs Memorial Lecture: Can grazing behavior support innovations in grassland management **Tropical Grasslands – Forrajes Tropicales**, 1, 137-155, 2013

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim de Monitoramento dos Cultivos de Verão** - Janeiro 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/monitoramento-agricola>>. Acessado em 20 de Janeiro de 2022.

COTRUFO, M.F.; WALLENSTEIN, M.D.; BOOT, C.M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. **Glob Change Biol**, 19: 988-995. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>

DENARDIN, L.G.D.O.; MARTINS, A.P.; BASTOS, L.M.; CIAMPITTI, I.A.; ANGHINONI, I.; MOOJEN, F.G.; CARVALHO, P.C.D.F.; HUANG, M.; CHABBI, A. Soybean Yield Does Not Rely on Mineral Fertilizer in Rotation with Flooded Rice under a No-Till Integrated Crop-Livestock System. **Agronomy**, 2020, 10, 1371. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091371>

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., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Science Society of America**, p.247-272, 1996.

DUARTE TC, CRUZ SCS, SOARES GF, JÚNIOR DGS, MACHADO CG. Spatial arrangements and fertilizer doses on soybean yield and its components. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** 2016 Sept 29; 20(11):960-4.

EIVAZI, F. & TABATABAI, M.A., 1988. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, p.601-606. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1)

FARIAS, G.D., DUBEUX, J.C.B., SAVIAN, J.V. ET AL. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agron. Sustain. Dev.** 40, 39, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>

FIORIN JE, VOGEL PT, BORTOLOTTO RP. Métodos de aplicação e fontes de fertilizantes para a cultura da soja. **Agraria** 2016 11(2):92-7.

FRANCO, A.J. et al. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 2020, v. 50, DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5064026>.

FRANZLUEBBERS, A.J., STUEDEMANN, J.A. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA, Agriculture, **Ecosystems & Environment**, Volume 129, Issues 1–3, 2009, Pages 28-36, ISSN 0167-8809, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.06.013>.

GALINDO, F.S., STROCK, J.S. & PAGLIARI, P.H. Impacts of corn stover management and fertilizer application on soil nutrient availability and enzymatic activity. **Sci Rep** 12, 1985 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06042-9>



GEISSELER, D., HORWATH, W.R. Short-term dynamics of soil carbon, microbial biomass, and soil enzyme activities as compared to longer-term effects of tillage in irrigated row crops. **Biol Fertil Soils** 46, 65–72 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0400-0>

INSAM, H. & DOMSCH, tK. H., 1988. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. **Microbial Ecology**, v. 15, n. 4, p. 177-188. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02011711>

LAROCA, J.V.S. et al. 2018. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 11, p. 1248-1258. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018001100007>.

LEMAIRE, G.; GASTAL, F.; FRANZLUEBBERS, A.; CHABBI, A.; Grassland–cropping rotations: an avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. **Environ Manage** 56:1065–1077, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0561-6>

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. DEBROY S.; SARKAR, D.; R Core team. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. **R package version 3**, p.1-93, 2018.

PINHEIRO, J.; BATES, D.M. Mixed effects models in S and S-PLUS. **Statistical and computing**. New York: Springer-Verlag, 528p. 2000.

PRIMIERY, S., MUNIZ, A.W., LISBOA, H., 2017. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecosistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floresta Ambient**. Seropédica, v. 24, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.110314>.

MACCARI, M.; ASSMANN T.S.; BERNARDON, A.; SOARES, A.B.; FRANZLUEBBERS, A.; BORTOLLI, M.; BORTOLLI, B.B.; GLIENKE, C.L. Relationships between N, P, and K in corn biomass for assessing the carryover effects of winter pasture to corn, **European Journal of Agronomy**, Volume 129, 2021,126317, ISSN 1161-0301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126317>.

MIRANSARI, M. Soil microbes and the availability of soil nutrientes. *Acta Physiologia e Plantarum*, Paris, v.35, p. 3075-3084, 2013.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 3a ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p

RUBINO, M.; DUNGAIT J.A.J.; EVERSLED, R.P. et al. Carbon input belowground is the major C flux contributing to leaf litter mass loss: evidences from a (13)C labelled-leaf litter experiment. **Soil Biology & Biochemistry**, 42, 1009–1016, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.018>

SANTOS H.G. et al., 2018. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª ed. Brasília, DF: Embrapa.

SAVIAN, J.V.; SCHONS, R.M.T.; MARCHI, D.E.; FREITAS, T.S.; SILVA NETO, G.F.; MEZZALIRA, J.C.; BERNDT, A.; BAYER, C. CARVALHO, P.C.F. Rotatinoous stocking: A grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep, **Journal of Cleaner Production**, Volume 186, 2018, Pages 602-608, ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.162>.

SOARES, M.; ROUSK, J. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: Links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry, **Soil Biology and Biochemistry**, Volume 131, 2019, Pages 195-205, ISSN 0038-0717, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.010>.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., 2004. **Cerrado: Correção do solo e adubação**, 2ª Edição, ISBN: 85-7383-230-4

SOUZA, E.D. et al. 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**. 2008, v. 32, n. 3. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300035>

SOKOL, NW, SANDERMAN, J, BRADFORD, MA. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. **Glob Change Biol**. 2019; 25: 12– 24. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14482>

SPARLING, G.P.; WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and <sup>14</sup>C labeled sells. **Soil Biology and Biochemistry**. 1988, 20: 337-343. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(2888\)2990014-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(2888)2990014-4)

SPARLING, G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Austr. J. Soil Res**, 30:195–207, 1992.

STIEVEN, A. C.; OLIVEIRA, D. A.; SANTOS, J. O.; WRUCK, F. J.; CAMPOS, D. T. S. Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. **Agrária**, v. 9, n. 1, p. 53-58, 2014.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M., 1972. Assay of urease activity in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.4, p.479-487. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(72\)90064-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(72)90064-8)

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, p. 225-229, 1970.

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R;

BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. **Tópicos em ciência do solo - Volume II**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.

VARGAS, G.R., et al. Ciclagem de biomassa e nutrientes em plantios florestais. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, 2018, v.11, n.2, p.111-123. DOI: 10.5935/PAeT.V11.N2.12

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**.1987, 19: 703-707. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

ZANELLA, R. et al. System Fertilization: a Viable Practice for Black Oat-soybean Crop. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. 2020, v. 63, n. spe Epub 11 Dec 2020. ISSN 1678-4324. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-solo-2020190063>.

YANG, D. et al. Chemical and microbial properties in contaminated soils around a magnesite mine in northeast china. **Land Degradation and Development** 23: 256-262, 2012.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferentes estratégias de adubação, alternativas a adubação convencional, são importantes para a intensificação sustentável, melhoria da qualidade do solo e produtividade da soja em sistemas integrados de produção agropecuária. Isso pode ser comprovado nesse estudo por meio da avaliação em protocolo experimental de curta duração sob diferentes estratégias de adubação.

Além disso, com esse trabalho foi possível compreender, a nível de fazenda e em curta duração, quais são as consequências e benefícios para o solo da utilização de diferentes estratégias de adubação. Isso porque, pode-se comprovar que antecipar a adubação de N, P e K para a pastagem altera os atributos de qualidade do solo, com maior incorporação de C e N no solo, refletindo em equilíbrio do sistema produtivo.

Como benefício da alteração dos atributos de qualidade do solo, tem-se maior disponibilização de nutrientes no solo, via ciclagem de nutrientes que é realizada pelas enzimas extracelulares que são liberadas pela microbiota do solo, refletindo na maior produtividade da soja, que é um importante indicador de sustentabilidade desses sistemas produtivos que utilizam o reposicionamento da adubação com N, P e K.

Assim, com a utilização das diferentes estratégias de adubação é possível aumentar a produção de alimentos, de forma sustentável. Podendo-se considerar as mesmas como ferramentas para a intensificação sustentável da produção agrícola, por meio da produção de mais alimentos com a otimização do uso de fertilizantes.

## 5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Pelo fato de ainda ter poucos estudos publicados que envolvem diferentes estratégias de adubação em SIPA e por ser um tema recentemente estudado, para estudos futuros deve-se entender mais sobre essa temática em solos argilosos e arenosos. Deve-se considerar o efeito temporal nas diferentes estratégias em SIPA no que se refere a produção de resíduos, deposição de placas de esterco, dinâmica de C e N no solo, produtividade das culturas e produção animal.

Sugere-se ainda realizar estudos, nessas mesmas condições com outras culturas, como milho, para que os efeitos encontrados nesse estudo possam ser confirmados em outros cenários produtivos. Também deve-se considerar que as estratégias de adubação tornam os SIPA mais eficientes na conversão de resíduos em C e N do solo, podem desempenhar um importante fator na mitigação de gases de efeito estufa, o que deve ser avaliado.

## REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; JOHNSON, J.M.F. Simultaneous determination of  $\beta$ -glucosidase,  $\beta$ -glucosaminidase, acid phosphomonoesterase, and arylsulfatase activities in a soil sample for a biogeochemical cycling index, **Applied Soil Ecology**, Volume 142, 2019, Pages 72-80, ISSN 0929-1393, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.001>.

ALLISON, S.D., VITOUSEK, P.M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs, **Soil Biology and Biochemistry**, Volume 37, Issue 5, 2005, Pages 937-944, ISSN 0038-0717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.09.014>.

ALVES, R. C.; BREMM, C.; NUNES, C. L. R.; BARRO, R.S.; NETO, A.B.; SCHONS, R.M.T.; CAETANO, L.A.M.; CARVALHO, P.C. de F. Suprimento de nitrogênio para culturas de verão pela aplicação antecipada em azevém pastejado por ovinos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.1406-1415, 2015

ALI, W., NADEEM, M., ASHIQ, W., ZAEEM, M., GILANI, S. S. M., RAJABI-KHAMSEH, S., CHEEMA, M. The effects of organic and inorganic phosphorus amendments on the biochemical attributes and active microbial population of agriculture podzols following silage corn cultivation in boreal climate. **Scientific Reports**, 9, 1–17. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53906-8>

ARAGÃO, O.O.S.; OLIVEIRA-LONGATTI, S.M.; CAPUTO, P.S.C.; RUFINI, M., CARVALHO, G.R.; CARVALHO, T.S.; MOREIRA, F.M.S. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region, **Ecological Indicators**, Volume 113, 2020, 106205, ISSN 1470-160X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106205>.

ASSMANN TS, SOARES AB, ASSMANN AL, et al (2017) Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. In: **Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil**, 4, p. 67–84, ISBN - 978-85-99584-10-1. Disponível em: <<http://www.pb.utfpr.edu.br/coagr/eventos>>

ASSMANN, T.S.; SOARES, A.B.; ASSMANN, A.L.; HUF, F.L., LIMA, R.C. de. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. In: JAMHOUR, Jorge; ASSMANN, Tangriani Simioni (Org.). Palestras: **Intensificação com sustentabilidade. Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária**, 1.; Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, 4. 2017. Cascavel. Pato Branco: UTFPR Câmpus Pato Branco, 2017. p. 67–84.

ANGHINONI, I, et al. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.8, p.325-380, 2013.

BALOTA, E.L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S. & HUNGRIA, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:641-649, 1998.

BALBINOT JUNIOR, ALVADI ANTONIO et al. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural* [online]. 2009, v. 39, n. 6 [Acessado 23 Janeiro 2022], pp. 1925-1933. Epub 29 Maio 2009. ISSN 1678-4596. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000107>.

BERNARDON, A. Altura do pasto e adubação nitrogenada sobre a produção de forragem e eficiência no uso de nutrientes em sistema de integração lavoura-pecuária. 2016. 96 f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia)** – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016

BASHRI, G.; PATEL, A.; SINGH, R.; PARIHAR, P.; PRASAD, S. M. Mineral solubilization by microorganism: mitigating strategy in mineral deficient soil. **Microbial Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 265-285, 2018.

BASTIDA F, JINDO K, MORENO JL, HERNÁNDEZ T, GARCÍA C. Effects of organic amendments on soil carbon fractions, enzyme activity and humus-enzyme complexes under semi-arid conditions. **Eur J Soil Biol.** 2012; 53:94-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.09.003>

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.46, p.1459-1466, 1995.

BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A.; MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments, **Soil and Tillage Research**, Volume 91, Issues 1–2, 2006, Pages 217-226, ISSN 0167-1987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.12.006>.

BONINI, C.S.B. et al. Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, 2016 p. 1695-1698.

BODDEY, RM, CASAGRANDE, DR, HOMEM, BGC, ALVES, BJR. Forage legumes in grass pastures in tropical Brazil and likely impacts on greenhouse gas emissions: A review. **Grass Forage Sci.** 2020; 75: 357– 371. DOI: <https://doi.org/10.1111/gfs.12498>

BURNS RG, DEFOREST JL, MARXSEN J, SINSABAUGH RL, STROMBERGER ME, WALLENSTEIN MD, WEINTRAUB MN, ZOPPINI A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biol Biochem.** 2013;58:216-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>

CAMBARDELLA, C.A., ELLIOTT, E.T., 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 56:777-783. DOI:10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x

CARLOS, F.S., DE OLIVEIRA DENARDIN, L.G., MARTINS, A.P., et al. Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degrad Dev.** 2020; 31: 2962– 2972. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3653>

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2009; 33: 147-157.

CARVALHO P. C. F. Harry Stobbs Memorial Lecture: Can grazing behavior support innovations in grassland management Tropical Grasslands – **Forrajes Tropicales**, 1, 137-155, 2013

CARVALHO PC D F, PETERSON CA, NUNES PA D A ET AL. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **J Anim Sci.** 2018, 96:3513–3525. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky085>

CARVALHO, Paulo César de Faccio et al. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza , v. 45, n. 5spe, p. 1040-1046, 2014 .

CARVALHO, Paulo César de Faccio et al. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **R. Bras. Zootec.**, Viçosa, v. 47, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/rbz4720170001>.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim de Monitoramento dos Cultivos de Verão** - Janeiro 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/monitoramento-agricola>>. Acessado em 20 de Janeiro de 2022.

DA SILVA, F.D.; AMADO, T.J.C.; BREDEMEIER, C.; BREMM, C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F. Pasture grazing intensity and presence or absence of cattle dung input and its relationships to soybean nutrition and yield in integrated crop–livestock systems under no-till. **Eur. J. Agron.** 2014, 57, 84–91.

DAVINIC, M., FULTZ, L.M., ACOSTA-MARTINEZ, V., CALDERÓN, F.J., COX, S.B., DOWD, S.E., ALLEN, V.G., ZAK, J.C., MOORE-KUCERA, J. Pyrosequencing and mid-infrared spectroscopy reveal distinct aggregate stratification of soil bacterial communities and organic matter composition. **Soil Biol. Biochem.**, 46, 2012, pp. 63-72, DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.11.012

DENARDIN, L.G.D.O.; MARTINS, A.P.; BASTOS, L.M.; CIAMPITTI, I.A.; ANGHINONI, I.; MOOJEN, F.G.; CARVALHO, P.C.D.F.; HUANG, M.; CHABBI, A. Soybean Yield Does Not Rely on Mineral Fertilizer in Rotation with Flooded Rice under



a No-Till Integrated Crop-Livestock System. **Agronomy** 2020, 10, 1371. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091371>

DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, v.268, p.319-328, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0330-4>.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal Soil Science*, Ottawa, v. 75, p. 529-538. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>.

FAO, 2017. *Climate Smart Agriculture Sourcebook*. Disponível em: <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/production-resources/module-b5-integrated-production-systems/chapter-b5-1/en/> acessado em 06 de janeiro de 2022.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Livestock and the environment. Meeting the challenge. Available in: <http://www.fao.org/3/x5304e/x5304e00.htm> (1999), Acessado em 02/01/2022

FARIAS, G.D., DUBEUX, J.C.B., SAVIAN, J.V. ET AL. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agron. Sustain. Dev.** 40, 39, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**. 2001, v. 58, n. 3 Epub 18 Jul 2001. ISSN 1678-992X. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>.

FRANCO, A.J. et al. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 2020, v. 50 DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5064026>.

FRANZLUEBBERS, A. J.; SULC, R. M.; RUSSELLE, M. P. Opportunities and challenge for integrating North-American crop and livestock systems. In: LEMAIRE, G.; HODGSON, J.; CHABBI, A. (Ed.). **Grassland productivity and ecosystem services**. Wallingford: CABI, 2011. p. 208-218.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A.; SCHOMBER, H. H. Spatial distribution of soil carbon and nitrogen pool under grazed tall fescue. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n.2, p. 635-639, 2000.

HATCH DJ, LOVELL RD, ANTIL RS, JARVIS SC, OWEN PM (2000) Nitrogen mineralization and microbial activity in permanent pastures amended with nitrogen

fertilizer or dung. **Biol Fertil Soils** 30:288–293. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740050005>

HAYNES, R.; WILLIAMS, P. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. In: **Advances in Agronomy**. pp 119–199, 1993.

HIGGINS, S.; SCHELLBERG, J.; BAILEY, J.S. Improving productivity and increasing the efficiency of soil nutrient management on grassland farms in the UK and Ireland using precision agriculture technology, **European Journal of Agronomy**, Volume 106, 2019, Pages 67-74, ISSN 1161-0301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.001>.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Banco de dados agregados. 2017. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acesso em: 12 de janeiro de 2022.

LEMAIRE, G. et al. Integrated crop-livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014.

LISBOA, Bruno Brito et al. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2012, v. 36, n. 1, pp. 33-44. ISSN 1806-9657. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100004>.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 425-433, 2003.

MARTINS, Amanda; VELOSO, Murilo & DENARDIN, Luiz Gustavo & Freitas, Thais & ANGHINONI, Ibanor & BAYER, Cimélio & TIECHER, Tales & KUNRATH, Taise & DE FACCIO CARVALHO, Paulo. 2018. MELHORIAS AMBIENTAIS PROPORCIONADAS PELOS SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. In book: **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**, pp.45-70

MENDES, I. C., SOUSA, D. M. G., REIS JUNIOR, F. B. D., AND LOPES, A. A. C. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Vol. **Circular Técnica 38**, pp. 24p. EMBRAPA, 2018. Brasília.

MENDES, I. D. C., SOUZA, L. M. D., SOUSA, D. M. G., LOPES, A. A. D. C., REIS JUNIOR, F. B. D., LACERDA, M. P. C., MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at postharvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, 2019, 139, 85-93.

MIRANSARI, M. Soil microbes and the availability of soil nutrients. **Acta Physiologia e Plantarum**, Paris, v.35, p. 3075-3084, 2013.

MORAES, A. et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v.57, p.4-9, 2014a

MORAES, Anibal de et al. Pesquisa em Sistemas Integrados de Lavoura-Pecuária no Brasil. **Rev. Ciênc. Agron.** Fortaleza, v. 45, n. 5spe, p. 1024-1031, 2014b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 3a ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p

MNDZEBELE B, NCUBE B, FESSEHAZION M, MABHAUDHI T, AMOO S, DU PLOOY C, VENTER S, MODI A. Effects of cowpea-amaranth intercropping and fertiliser application on soil phosphatase activities, available soil phosphorus, and crop growth response. **Agronomy**. 2020;10:79. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10010079>

NUNES, P.A.A., LACA, E.A., CARVALHO, P.C.F. et al. 2021. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. **Sci Rep.** 11, 1649, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81270-z>

ONU. **United Nations population**, World Population Prospects 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acessado em 01 de julho de 2019.

ONU. **United Nations population**, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations: World Population Prospects Available at: <https://esa.un.org/unpd/wpp/>. 2017.

OSAKI, M. et al. Risks associated with a double-cropping production system - a case study in southern Brazil. **Scientia Agricola**. 2019, v. 76, n. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0191>.

PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COLE, C.V. (Eds.), Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-term Experiments in North America, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997, 414 p

PEREIRA, Pedro A Arraes et al. The development of Brazilian griculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture & Food Security**. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-4>

PETERSON CAITLIN A., BELL LINDSAY W., CARVALHO PAULO C. DE F., GAUDIN AMÉLIE C. M. Resilience of an Integrated Crop–Livestock System to Climate Change: A Simulation Analysis of Cover Crop Grazing in Southern Brazil. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. V. 4. 2020. DOI:10.3389/fsufs.2020.604099

PIRES, Maria de Fátima Marques et al. Conservation system improves soil microbial quality and increases soybean yield in the Northeastern Cerrado. **Bragantia**. 2020, v.

79, n.4, pp. 599-611. ISSN 1678-4499. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200117>.

PROBER, S. M.; LEFF, J. W.; BATES, S. T.; BORER, E. T.; FIRN, J.; HARPOLE, W. S.; CLELAND, E. E. Plant diversity predicts beta but not alpha diversity of soil microbes across grasslands worldwide. **Ecology Letters**, v. 18, n. 1, p. 85-95, 2015.

PROMMER, J, WALKER, TWN, WANEK, W, et al. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. **Glob Change Biol**. 2020; 26: 669– 681. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14777>

RATKE, R.F.; BERTECHINI, M.C.; FIGUEIREDO, C.C.; ARAUCO, A.M.S.; DIAS, B.O.; OLIVEIRA, J.C.; ZUFFO, A.M.; OLIVEIRA-PAIVA, C.A.; SANTOS-JÚNIOR, J.D.G.; ROQUE, C.G. Soil Organic Matter Fractions and Enzymes Activities under No-tillage System: Effects of Organomineral and Mineral Fertilizer with Humic Substances, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 2021. DOI: 10.1080/00103624.2021.1993886

RIFERTE, F.B.; FONSECA, A.F.; PONTES, L.S.; Potassium fertilization for white oat and maize in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Grassl Sci**. 2021; 67: 250– 257. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12312>

RODRIGUES, A.M. et al. Concentrações e quantidades de macronutrientes na excreção de animais em pastagem de capim-mombaça fertilizada com fontes de fósforo. **R. Bras. Zootec.**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 990-997, June 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982008000600006>.

RODRIGUES, R. C., MATTOS, H., PEREIRA, W., ANDREOTTI, F., & SANTOS, A. L. Perfilamento do capim-braquiária cultivado em solo proveniente de uma pastagem degradada em função de doses de enxofre, nitrogênio e calcário. **Boletim De Indústria Animal**, 2013, 61(1), 39-47. Disponível em: <http://www.iz.sp.gov.br/bia/index.php/bia/article/view/1332>

RUFINO, M.C.; DURY J.; TITTONELL, P.; VAN WIJK, M.T.; HERRERO, M. S.; ZINGORE, P.; MAPFUMO, K.E. Giller Competing use of organic resources, village-level interactions between farm types and climate variability in a communal area of NE Zimbabwe **Agric. Syst.**, 104, 2011, pp. 175-190

SILVA, F.D.; AMADO, T.J.C.; BREDEMEIER, C.; BREMM, C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F. Pasture grazing intensity and presence or absence of cattle dung input and its relationships to soybean nutrition and yield in integrated crop–livestock systems under no-till, **European Journal of Agronomy**, Volume 57, 2014, Pages 84-91, ISSN 1161-0301, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.009>.

SOUZA et al. **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. 1 ed. – Tubarão: Copiart, 2018. 692 p.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHIONONI, I.; LIMA, C. V. S.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100008>

SOUZA E. D., COSTA S. E. V. G. A., CARVALHO P. C. F., ADRIGUETI M., AND CAO E. Soil organic carbon and nitrogen stocks in an untilled crop-livestock integration system under different grazing intensities. **Rev. Bras. Cienc. do Solo** 33:1829–1836. 2009.

SARTOR, .LR., SANDINI, I.E., ADAMI P.F., NOVAKOWISKI J.H., RUTHES BES. Corn yield and grain nutritional status in a crop-livestock system with winter/summer nitrogen levels. **Int J Plant Prod** 12:309–314. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0028-9>

TEDESCO et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. rev. e ampl. 1995. Porto Alegre: Departamento de Solos.

TENELLI, S., DE OLIVEIRA, B. R., BARBOSA, L. C., & CARVALHO, J. L. N. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed? **Bioenergy Research**, 12, 764–777. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09996-3>

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. **Tópicos em ciência do solo - Volume II**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.

VARGAS, G.R., et al. Ciclagem de biomassa e nutrientes em plantios florestais. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, 2018, v.11, n.2, p.111-123. DOI: 10.5935/PAeT.V11.N2.12

VENDRAMINI, J.M.B.; DUBEX JÚNIOR, J.C.B; SILVEIRA, M.L. Nutrient cycling in thopical pasture ecosystems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.2, p. 308-315, 2014.

XIAO W, CHEN X, JING X, ZHU B. A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change. **Soil Biol Biochem**. 2018;123:21-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.001>

## APÊNDICE 1

TABELA 7 - Atributos físicos do solo sob diferentes estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado mato-grossense.

<b>Estratégia de adubação</b>	<b>Volume de poros</b>	<b>Índice de vazios (e)</b>	<b>Densidade de partículas</b> -----g cm <sup>-3</sup> -----	<b>Densidade Aparente</b>	<b>Resistência a penetração</b> KPa
AC-N	34,4 ns	0,61 ns	2,32 ns	1,66 ns	2.110 a
AC+N	35,8	0,64	2,36	1,59	1.645 b
AP-N	34,3	0,60	2,28	1,63	1.465 b
AS	36,2	0,65	2,37	1,6	1.679 ab

AC-N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja; AC+N: Adubação convencional com P e K aplicados na cultura da soja mais N na pastagem; AP-N: Adubação com P e K aplicados na pastagem; AS: Adubação de sistemas com N, P e K aplicados na pastagem. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey,  $p \leq 0,05$ . Ns: não significativo