

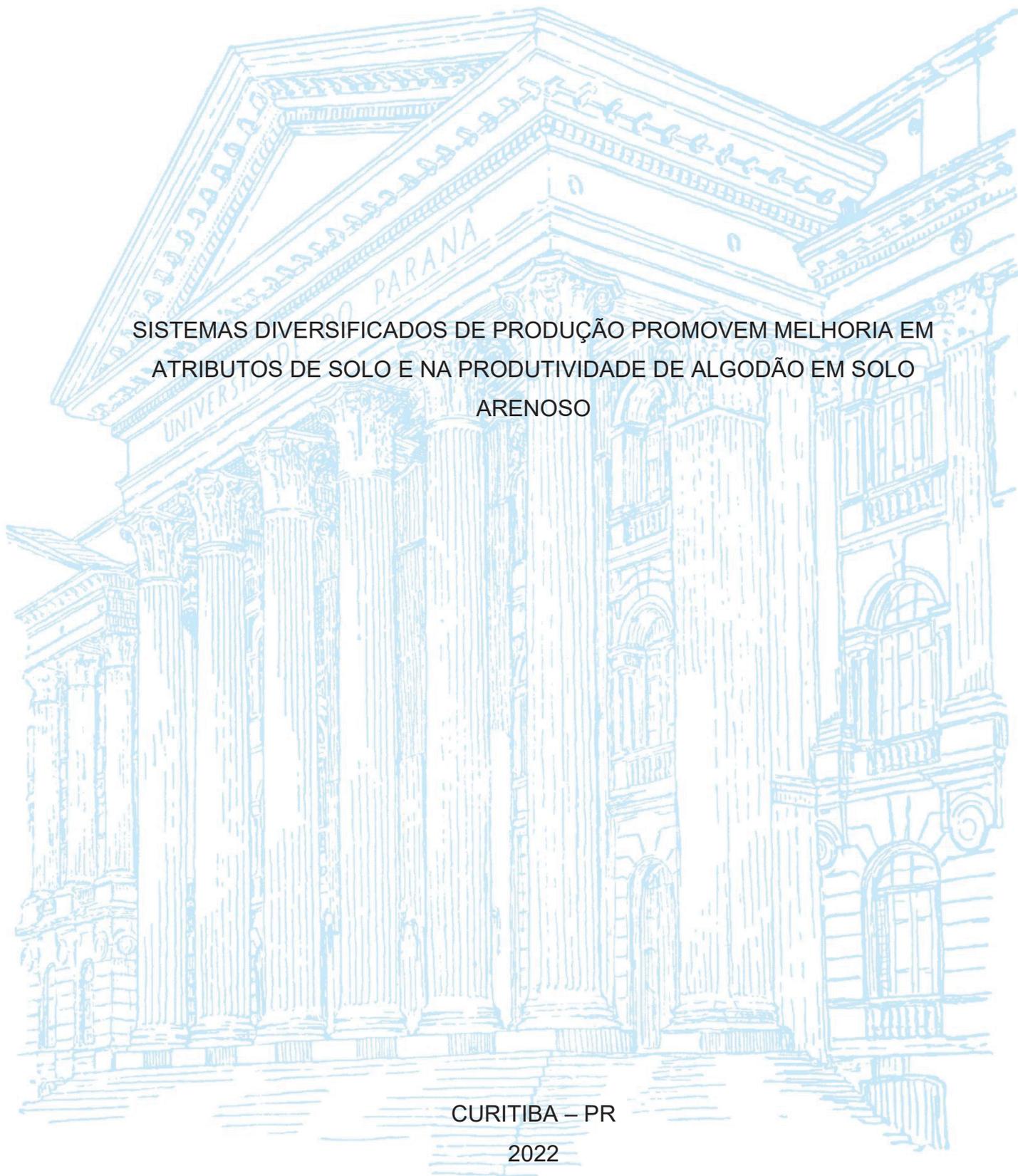
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EVELYN CUSTÓDIO GONÇALVES

SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO PROMOVEM MELHORIA EM  
ATRIBUTOS DE SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE ALGODÃO EM SOLO  
ARENOSO

CURITIBA – PR

2022



EVELYN CUSTÓDIO GONÇALVES

SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO PROMOVEM MELHORIA EM  
ATRIBUTOS DE SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE ALGODÃO EM SOLO  
ARENOSO

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

Gonçalves, Evelyn Custódio

Sistemas diversificados de produção promovem melhoria em atributos de solo e na produtividade de algodão em solo arenoso. / Evelyn Custódio Gonçalves. – Curitiba, 2022.

1 recurso online: PDF.

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho.

Coorientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza.

1. Algodão - Cultivo. 2. Algodão - Solos. 3. Solos arenosos. I. Carvalho, Paulo César de Faccio. II. Souza, Edicarlos Damacena de. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação Agronomia (Produção Vegetal). IV. Título.



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 **EVELYN CUSTÓDIO GONÇALVES** intitulada: **SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO PROMOVEM MELHORIA EM ATRIBUTOS DE SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE ALGODÃO EM SOLO ARENOSO**, 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, 22 de Abril de 2022.

Assinatura Eletrônica

22/04/2022 16:50:47.0

PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/04/2022 08:27:52.0

LEANDRO PEREIRA PACHECO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS)

Assinatura Eletrônica

27/04/2022 16:16:07.0

MARCO AURELIO CARBONE CARNEIRO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

Assinatura Eletrônica

22/04/2022 11:48:44.0

EDICARLOS DAMACENA DE SOUZA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS)

A minha mãe Gildete Machado Custódio por todo amor,  
dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou primeiramente grata a minha mãe, Gildete Machado Custódio, por todo amor incondicional. Mãe, saiba que você é meu maior exemplo de vida, obrigada por ser meu porto seguro e a força que me sustenta. Obrigada por ser a melhor mãe que eu poderia ter, obrigada por tudo que me ensinou, você é o verdadeiro amor da minha vida. Eu tenho um orgulho imenso de ser tua filha.

Grata também ao meu pai, José Elcione Gonçalves, por todo amor.

Agradeço a meus orientadores, Paulo César de Faccio Carvalho e Edicarlos Damacena de Souza. Ao professor Edicarlos, agravo por toda compreensão e ensinamentos que foram essenciais para eu crescer pessoalmente e profissionalmente. Obrigada por toda confiança deposita em mim. Sigo buscando um dia me tornar um pouco do que o senhor é.

Minha gratidão ao meu companheiro Thiago Henrique e gratidão eterna aos meus amigos Kimberly Revoredo, Gabriela Castro, Andressa D'alla Cort, Alessandra Araújo, Tatiane Camargo, Joyce Rodrigues, Hannah Pricilla, Jéssica Leal Pires, Camila Kamchen, Gabriel Valadares, Henrique Muniz, Rafael Oliveira, Nahyara Caires, Rackel Danielly, Kairo Vilella e Juliana Mendes. Cada um de vocês é parte do que me motivou a chegar até aqui. Também sou grata ao professor Leandro Pereira Pacheco, que mesmo em poucas conversas me abriu diversas ideias. As minhas parceiras de grupo Bruna Karolayne, Maria Eloá, Bheatriz Rezende e a todo o GPISI, vocês foram fundamentais pra que isso tudo acontecesse.

Um agradecimento ao Instituto Mato-grossense do Algodão, a UFPR e o programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, a UFR e Aliança SIPA por terem fornecido todo o suporte desde a área experimental, as análises de laboratório, financiamento e resultados dessa pesquisa, para que pudesse trazer o conhecimento.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são uma abertura para achar as que estão certas.”

(Carl Sagan)

## RESUMO

A região Cerrado representa a maior produção de algodão do Brasil e 15% dessa área é formada por solos arenosos, que possuem baixo potencial produtivo. No entanto, a diversificação do sistema produtivo pode ser considerada uma alternativa para elevar a produção nesses solos. O objetivo deste estudo é avaliar o efeito de sistemas de produção com diferentes níveis de diversidade florística e funcional sobre indicadores de qualidade de um Neossolo Quartzarênico e o impacto na produtividade do algodão em curto prazo no Cerrado. O experimento foi realizado na área experimental do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), município de Rondonópolis-MT, em um Neossolo Quartzarênico, com 14,5% de argila. Os tratamentos constam de diferentes sistemas de manejo do solo, tendo a cultura do algodão rotacionado a cada dois anos de cultura da soja no período da safra. Os sistemas são: Diversidade muito baixa: Soja na safra com pousio na entressafra; Diversidade baixa: Soja na safra e entressafra de *Urochloa ruziziensis* cultivada solteira por 8 meses; Diversidade média: Soja na safra e entressafra de *U. ruziziensis* consorciado com niger, nabo forrageiro e feijão caupí por 8 meses; Diversidade média de longa duração: Soja na safra e entressafra de pasto consorciado com *U. ruziziensis*, niger, nabo forrageiro e feijão caupí, cultivados por 20 meses sem a presença de animais em pastejo; Diversidade alta: Soja na safra e entressafra de pasto consorciado com *U. ruziziensis*, niger, nabo forrageiro e feijão caupí com a entrada de animais para pastejo. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com três repetições. A diversidade alta elevou os teores de carbono orgânico total em 49% a mais e 87% para a fração particulada, comparados com o sistema de diversidade muito baixa. O curto prazo não influenciou os teores de nitrogênio total, mas a fração particulada foi 88% maior no sistema de diversidade alta. A biomassa microbiana do solo e a atividade enzimática são beneficiados em sistemas de diversidade alta. A produtividade do algodão aumentou em 156% com a diversidade alta em solo arenoso no curto prazo em relação ao sistema com muito baixa diversidade. Sistemas mais diversificados de produção podem ser considerados uma alternativa para a produção do algodão em solos arenosos.

Palavras-chave: Diversidade funcional. Saúde do solo. SIPA.

## ABSTRACT

The Cerrado region has one of the largest cotton production in Brazil and 15% of this area is formed by sandy soils, which have low productive potential. However, the diversification of the production system can be considered an alternative for production in these soils. Little is known about the performance of these systems in sandy soils in the short term. The objective of this study is to evaluate the effect of production systems with different levels of functional diversity on quality indicators of a Quartzarenic Neosol and the impact on cotton productivity in the short term in the Cerrado. The experiment was carried out in the experimental area of Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), municipality of Rondonópolis-MT, in a Quartzarenic Neosol, with 14.5% clay. The treatments consist of different soil management systems, with the cotton crop being rotated every two years of soybean cultivation during the harvest period. The systems are: Very low diversity: Soybean in the harvest with fallow in the off-season; Low diversity: Soybean in season and off season of *Urochloa ruziziensis* cultivated single for 8 months; Average diversity: Soybean in the harvest and off-season of *U. ruziziensis* intercropped with niger, radish and cowpea for 8 months; Average long-term diversity: Soybean in season and off-season pasture intercropped with *U. ruziziensis*, niger, forage radish and cowpea, cultivated for 20 months; High diversity: Soybean in harvest and pasture off-season intercropped with *U. ruziziensis*, niger, fodder turnip and cowpea with the entry of animals for grazing. The experimental design was in randomized blocks with three replications. The high diversity increased the total organic carbon contents by 49% more and 87% for the particulate fraction, compared to the very low diversity system. The short term did not influence the total nitrogen contents, but the particulate fraction by 88% in the high diversity system. Soil microbial biomass and enzymatic activity are benefited in high diversity systems. Cotton yield increased by 156% with high diversity in sandy soil in the short term. More diversified production systems can be considered an alternative for cotton production in sandy soils.

Keywords: Functional diversity. Soil health. ICLS

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área experimental no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.....	36
Figura 2 - Esquema dos tratamentos com sistemas com níveis crescentes de diversidade vegetal em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado .....	37
Figura 3 - Teores de carbono orgânico total (A) da matéria orgânica particulada (B) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	41
Figura 4 – Teores de nitrogênio total (A) e particulado (B) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	41
Figura 5 - Carbono (A) e nitrogênio da biomassa microbiana (B) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	42
Figura 6 - Atividade da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado. ..	44
Figura 7 – Produção total de algodão em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado. ....	45
Figura 8 - Biplot dos componentes principais dos indicadores de qualidade do solo e produção total de algodão em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado. ....	45
Figura 9 – Localização da área experimental no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.....	62
Figura 10 - Esquema dos tratamentos com sistemas com níveis crescentes de diversidade vegetal em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado .....	63
Figura 11 – Análise de coordenadas principais da estrutura da comunidade microbiana do gene 16S rRNA na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	67

Figura 12 – Análise de coordenadas principais da estrutura da comunidade microbiana do gene ITS na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	68
Figura 13 – Rede de co-ocorrência no nível de gênero de bactéria calculado com SparCC na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	68
Figura 14 – Rede de co-ocorrência no nível de gênero de fungos calculado com SparCC na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos em julho de 2017 de um Neossolo Quartzarênico no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso. .....	37
Tabela 2 - Sistemas de produção implantados na área experimental do Instituto mato-grossense do Algodão em Neossolo Quartzarênico no Cerrado. .....	37
Tabela 3 – Atributos químicos na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	39
Tabela 4 - Respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO <sub>2</sub> ) e quociente microbiano (qMIC) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	43
Tabela 5 - Atividade da $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e urease na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	43
Tabela 6 – Atributos químicos em julho de 2017 de um Neossolo Quartzarênico no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso. .....	63
Tabela 7 - Sistemas de produção implantados na área experimental do Instituto mato-grossense do Algodão em Neossolo Quartzarênico no Cerrado. .....	63
Tabela 8 – Índices de riqueza e diversidade de microrganismos do sequenciamento do gene 16S rRNA (bactérias) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	66
Tabela 9 – Riqueza e diversidade de microrganismos do sequenciamento do gene ITS (fungos) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....	66
Tabela 10 – Propriedades da rede de co-ocorrência nível gênero para 16S rRNA na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes	

de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.  
.....69

Tabela 11 – Rede de co-ocorrência nível gênero para ITS na camada de 0–10 cm,  
em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade  
funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.....71

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANOVA – Análise de variância

BMS – Biomassa microbiana do solo

C – Carbono

C-BMS – Carbono da biomassa microbiana

C-MOP – Carbono da matéria orgânica particulada

COT – Carbono orgânico total

FDA – Hidrólise do diacetato de fluoresceína

MOS – Matéria orgânica do solo

N - Nitrogênio

N-BMS – Nitrogênio da biomassa microbiana

N-MOP – Nitrogênio da matéria orgânica particulada

OTU's – Unidades Taxonômicas Operacionais

ACP – Análise de componentes principais

PCoA – Análise de coordenadas principais

$qCO_2$  – Quociente metabólico do solo

$qMIC$  – Quociente microbiano

RBS – Respiração basal do solo

SIPA – Sistema Integrado de Produção Agropecuária

SPD – Sistema de Plantio Direto

## SUMÁRIO

<b>1 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
1.1 CULTURA DO ALGODÃO .....	16
1.2 SOLOS ARENOSOS.....	17
1.3 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO .....	18
1.4 DIVERSIFICAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO .....	19
1.5 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO.....	21
1.5.1 Indicadores químicos.....	21
1.5.1.1 Indicadores biológicos .....	22
1.6 REFERÊNCIAS.....	25
<b>2 CAPÍTULO 1: INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO DO ALGODÃO EM SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO SOB SOLO ARENOSO NO CURTO PRAZO.....</b>	<b>34</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	34
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	36
2.3 RESULTADOS .....	41
2.4 DISCUSSÃO .....	47
2.5 CONCLUSÕES .....	52
2.6 REFERÊNCIAS.....	53
<b>3 CAPÍTULO 2 – DIVERSIDADE DE FUNGOS E BACTÉRIAS EM DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO SOB SOLO ARENOSO NO CURTO PRAZO.....</b>	<b>60</b>
3.1 1 INTRODUÇÃO .....	60
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	62
3.3 RESULTADOS .....	66
3.4 DISCUSSÃO .....	72
3.5 CONCLUSÃO.....	75
3.6 REFERÊNCIAS.....	76

## 1 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1 CULTURA DO ALGODÃO

Estima-se que o algodão (*Gossypium*) tenha surgido a aproximadamente 12,5 milhões de anos e possui mais de 50 espécies (Wendel and Albert, 1992). No entanto, o algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.), é uma das espécies mais utilizadas, datada há 4.000 a 5.000 anos e nativa das regiões entre o Sul do México e a Guatemala (Wendel et al., 2010). O algodoeiro possui porte arbustivo, com hábito de crescimento indeterminado e sistema fotossintético C3 (Silva et al., 2011). Em função da sua importância têxtil, o algodão é a fibra mais cultivada mundialmente.

No Brasil, a cultura do algodão possui grande importância socioeconômica e coloca o país como um dos maiores exportadores de pluma do mundo (Conab, 2021). Até a década de 1990, o principal polo de produção do algodoeiro estava concentrado nas regiões Sul e Sudeste. Atualmente, a região do Cerrado brasileiro é um dos maiores polos de produção da cultura, que responde 90% da área total plantada no país (Santos et al., 2020). Só no estado do Mato Grosso, a produtividade média na safra de 2020/21 foi de 4.181 kg/ha (ABRAPA, 2022).

O sucesso da cultura nessa região está relacionado principalmente às condições edafoclimáticas e de relevo, que proporcionam maior qualidade da fibra e melhor desenvolvimento da cultura (Cotrim et al., 2018). Quando cultivado em monocultivo, o algodão no Cerrado é semeado de novembro a dezembro. Entretanto, o cultivo duplo, de segunda safra, tem expandido nesta região, sendo plantado geralmente após a colheita da soja (Ferreira et al., 2015; Hoffman et al., 2020).

Entretanto, o sistema de monocultivo continua sendo predominante na produção do algodão (Hoffman et al., 2020). A monocultura do algodão produz baixa quantidade de resíduos orgânicos e proporciona pouca cobertura no solo (Santos et al., 2020). Conseqüentemente, a ausência de práticas conservacionistas pode levar a degradação química, física e biológica do solo a longo prazo (Lal, 2005), principalmente em solos mais frágeis, como são os solos arenosos. No entanto, grande parte da produção do algodão na região do Cerrado se concentra sob solos de textura leve (Lopes et al., 2021), como por exemplo da região do MATOPIBA,

considerada uma das maiores fronteiras agrícolas (Lumbreras et al., 2015). Dessa forma, devido a importância socioeconômica dessa cultura na região do Cerrado, torna-se necessário considerar sistemas de manejo e práticas agrícolas que proporcionem a melhoria da qualidade do solo (Santos et al., 2020).

## 1.2 SOLOS ARENOSOS

Solos arenosos estão amplamente distribuídos em todo o mundo e podem ocorrer em diversas ordens de solo, como Neossolos, Latossolos, Espodosolos e Argissolos, cobrindo quase 5 bilhões de hectares, o que representa um total de 31% da área da terra (Huang e Hartemink., 2020). No Brasil, correspondem a 8% da área total do país (Donagemma et al., 2016), sendo os neossolos quartzarênicos considerados uma das principais classes de solo e correspondendo a 15% do Cerrado (Spera et al., 1999).

Antigamente, solos arenosos eram pouco utilizados para agricultura, por serem considerados de baixa aptidão agrícola (Ramalho e Beek, 1995). Isto porque esse tipo de solo possui textura arenosa, com teores de argila menores que 15% (Frazão et al., 2008) e características importantes, como a retenção de água e de nutrientes e o teor de matéria orgânica, estão estreitamente associadas à textura do solo e à mineralogia da fração argila (Donagemma et al., 2016). Por essas características, solos arenosos são considerados solos mais frágeis, os tornando suscetíveis à erosão e perda da capacidade produtiva (Fidalski et al., 2013; Huang e Hartemink, 2020). Com isso, existe um paradigma de que esses solos são improdutivos quando comparados a solos de classe argilosa (Centeno et al., 2017).

Entretanto, quando bem manejados, solos leves podem alcançar produtividades elevadas para diversas culturas, incluindo culturas mais exigentes quanto a qualidade do solo, como é o caso da cultura do algodão (Santos et al., 2020). Novos modelos de produção que visam práticas conservacionistas tornam possível a intensificação nesses solos, minimizam os impactos negativos e melhoram a qualidade do solo, pois o tipo de manejo do solo pode influenciar a resiliência de solos arenosos (Centeno et al., 2017).

Alguns autores evidenciam que a diversificação de culturas promove a melhoria da qualidade de solos arenosos e a sustentabilidade agrícola (Liu et al.,

2015), pois sistemas de manejo que priorizam maiores incrementos de matéria orgânica são fundamentais para alcançar a intensificação sustentável em solos arenosos, ainda mais sob produção de algodão (Santos et al., 2020). Sabe-se que a matéria orgânica possui grande influência sob processos que ocorrem no solo, como ciclagem de nutrientes, capacidade de troca de cátions (CTC), além de contribuir com as propriedades químicas, físicas e biológicas (Tadini et al., 2021; Tadini et al., 2022).

Diante disso, acredita-se a adoção de sistemas de manejo que promovam maior entrada de material orgânico com diferentes características nutricionais através da diversificação dos sistemas de produção possa ser considerada uma alternativa sustentável para melhorar a qualidade de solos arenosos, viabilizando a produção de algodão na região do Cerrado.

### 1.3 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo (MOS) é formada por resíduos de vegetais, animais e de produtos da atividade sintética de microrganismos (Stevenson, 1994). Assim, é uma mistura heterogênea de compostos orgânicos que variam em idade, estrutura molecular, estabilidade, teor de nutrientes e disponibilidade biológica (Ros et al., 2011), tendo a vegetação como a principal responsável pela deposição de materiais orgânicos no solo (Moreira e Siqueira, 2006).

A MOS pode ser dividida em frações de acordo com o tamanho de partículas, sendo: a fração lábil, ou fração particulada, formada principalmente de serrapilheira parcialmente decomposta. Ela atua como substrato e centro da atividade microbiana do solo, reservatório de nutrientes de curto prazo, fonte de alimento para a fauna do solo e para as plantas (Haynes et al., 2005). Por outro lado, existe a fração humificada, sendo a fração mais recalcitrante da MOS, sendo composta de substâncias húmicas altamente polimerizadas, uma mistura de moléculas complexas de vários tamanhos e formas (Piccolo, 1996). Essa fração orgânica humificada possui feitos profundos nas propriedades do solo, como, por exemplo, o aumento da superfície específica, da CTC e do efeito tampão, por estar ligada a minerais, o que confere maior estabilidade para o solo e assume grande importância para solos arenosos, pois auxilia na retenção de água e nutrientes (Moreira e Siqueira, 2006).

Além disso, a MOS desempenha funções fundamentais na sustentação de ecossistemas (Dhaliwal et al., 2019). Esta pode influenciar características químicas como o aumento da CTC, da ciclagem de nutrientes, do sequestro de C e da fertilidade do solo (Horwath, 2007; Cunha et al., 2015; Tadini et al., 2021), mas também pode alterar propriedades físicas, como agregação, retenção de água, densidade do solo, porosidade e resistência à penetração (Hassink, 1997; Blanco-Canqui e Ruis, 2016; Wiesmeier et al., 2019). Para a parte biológica, a MOS abriga a vida microbiana, servindo como fonte de nutrientes e energia para microbiota do solo (Haynes et al., 2005).

Por ter diversas funções químicas, físicas e biológicas no solo, é difícil prever a dinâmica da MOS, pois esta é muito heterogênea e seu comportamento pode ser afetado por diversos fatores, como manejo do solo, clima e também pela textura do solo (Hassink, 1997). Em solos arenosos, por exemplo, a CTC é controlada pela MOS (Yost e Hartemink, 2019), diferentemente dos solos de textura mais argilosa, onde isso ocorre na maior parte pela influência dos conteúdos de argila, e como consequência há o maior aprisionamento físico de MOS (Li et al., 2022). Além disso, em regiões tropicais, além de sofrerem com maior taxa de mineralização da MOS pela menor proteção física, a matéria orgânica também está mais exposta aos efeitos da ação do clima (Conant et al., 2011). Estima-se que os teores médios de MOS para solos arenosos variem de 0,6 a 1,2%, enquanto para solos argilosos esses valores sejam de 1,5 a 2,8% (Lepsch et al., 1982), com teores de C menores, mesmo quando fornecidos a mesma quantidade de material orgânico (Hassink, 1994).

Nesse contexto, em solos arenosos, a manutenção de conteúdos suficientemente elevados de matéria orgânica e de qualidade são fatores chave para a capacidade dos solos de sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal (Ros et al., 2011; Wulanningtyas et al., 2021).

#### 1.4 DIVERSIFICAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO

A intensificação da agricultura pode levar a degradação potencial dos solos a longo prazo. Para reduzir os impactos gerados pela agropecuária intensiva, é necessário a adoção de sistemas de manejo que visem a conservação do solo para

o melhor aproveitamento dos seus recursos e manutenção da produtividade, e evitar a degradação dos atributos químicos, físicos, biológicos e, conseqüentemente, a degradação do ecossistema (Lal, 2015).

Dessa forma, a agricultura conservacionista é considerada uma solução para a intensificação mais sustentável na produção de grãos, proteínas e fibras. Sistemas conservacionistas tem como premissa básica o não revolvimento do solo, a cobertura permanente e as rotações de cultura (FAO, 2010) principais bases funcionais do Sistema Plantio Direto (SPD). Nesse âmbito, a diversificação de sistemas impõe, além das bases do SPD, a biodiversidade.

Assim, a diversificação de sistemas de produção pode ocorrer através do aumento da complexidade trófica em agroecossistemas (Moraes et al., 2018). Isto ocorre, por exemplo, quando práticas agrícolas, como a rotação e consorciação de diferentes espécies vegetais, são integradas com a pecuária em diversos arranjos, com escalas divididas no espaço e no tempo (Moraes et al., 2018). Dessa forma, o processo de diversificação leva ao estado da diversidade (Hufnagel et al., 2020). De acordo com Tilman (2001), a diversidade funcional refere-se aos componentes da biodiversidade que influenciam a forma como um ecossistema opera ou funciona, ou seja, é o componente da diversidade que influencia a dinâmica do ecossistema, estabilidade, produtividade, equilíbrio de nutrientes e outros aspectos do funcionamento do ecossistema.

Assim, em sistemas de cultivos, a diversidade de espécies vegetais proporciona maior quantidade de resíduos orgânicos com diferentes características nutricionais e apresenta efeitos positivos sob atributos bioquímicos do solo (Tiemann et al., 2015). Enquanto a inclusão do componente animal na fase pastagem eleva o nível trófico do ecossistema e possibilita o surgimento de propriedades emergentes, ofertadas pela relação sinérgica entre animal e planta (Anghinoni et al., 2018). Os benefícios do animal no sistema garantem maior aporte de nutrientes através da excreta de fezes e urina, melhoram a ciclagem de nutrientes, e aumento da produção de biomassa, que refletem diretamente sob a fertilidade do solo (Sneessens et al., 2016; Assman et al., 2015).

Um exemplo de sistema em que o princípio da diversidade funcional é aplicado, são os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). Além de abranger bases do SPD, esses sistemas também englobam as dimensões econômicas, sociais e ambientais, e visam a intensificação da produção com a

diversificação de sistemas complexos e adaptados em diferentes arranjos espaço-temporais para garantir a produção de alimentos e a segurança alimentar (Lemaire et al., 2014).

Neste contexto, a inserção de diversidade funcional pode influenciar em diversos aspectos de funcionamento do ecossistema e melhorar a qualidade do solo através dos atributos químicos, físicos e biológicos (Teixeira et al., 2021) em solos arenosos.

## 1.5 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

O termo qualidade do solo continua sendo bastante discutido a respeito da definição concreta de seu conceito, sendo que a maioria dos conceitos propostos atualmente se baseiam na qualidade do solo, como a capacidade deste funcionar dentro dos limites do ecossistema e interagir positivamente com o meio ambiente externo daquele ecossistema (Araújo et al., 2012). Devido as diversas propriedades e processos que ocorrem no solo, a sua qualidade não pode ser mensurada diretamente, mas pode ser estimada por meio do uso de indicadores (Karlen et al., 1997). Esses mesmos autores afirmam que, para ser considerado um indicador de qualidade do solo, independentemente da propriedade ou processo avaliado, este deve: (I) influenciar de alguma forma a função para a qual a avaliação está sendo feita; (II) ser mensurável com algum padrão definível; e (III) ser sensível o suficiente para detectar diferenças no espaço e no tempo.

Dessa forma, os solos apresentam uma gama diversificada de atributos físicos, químicos e biológicos, que interagem e impactam sinergicamente em processos críticos do ecossistema (Schlatter et al., 2022). Sendo assim, esses indicadores se tornam uma ferramenta essencial para avaliação e monitoramento da qualidade do solo em um ecossistema de acordo com o manejo adotado. Além disso, se tornam ferramentas importantes para entender os mecanismos que determinam o funcionamento do ecossistema em solos arenosos sob sistemas diversificados de produção agropecuária.

### 1.5.1 Indicadores químicos

Os indicadores químicos do solo, geralmente indicam os níveis de fertilidade do solo (Silva et al., 2020). Dentre os indicadores químicos encontra-se o pH, importante para avaliar a acidez do solo, além de afetar a disponibilidade de alguns nutrientes no solo, assim como a atividade microbiana (Cardoso et al., 2013), a CTC do solo, que indica a capacidade do solo em reter cátions e assim contribuir para manutenção da fertilidade do solo e também possui grande importância sob a MOS (Silva et al., 2020). A disponibilidade de nutrientes, como o nitrogênio, o fósforo, o potássio, e o cálcio, a saturação por bases e por alumínio, também configuram indicadores químicos de qualidade do solo (Araújo et al., 2012), pois são importantes para o suporte ao crescimento nutricional de plantas (Mäder et al., 2002).

Todas as propriedades de fertilidade do solo estão relacionadas com a matéria orgânica. Dessa forma, a MOS é considerada um grande indicador de qualidade do solo (Haynes et al., 2005). Mudanças de curto prazo na MOS podem ser melhor estudadas focando nas frações de matéria orgânica lábil, como o carbono orgânico particulado (Hassink, 1997). Essa fração lábil da matéria orgânica representa os conteúdos da MOS formados nos estágios iniciais de decomposição, sendo muito sensível a mudanças no manejo do solo (Ramnarine, 2014).

#### 1.5.1.1 Indicadores biológicos

Os microrganismos do solo são agentes fundamentais para o fornecimento de serviços ecossistêmicos em diversos ecossistemas terrestres (Chen et al., 2019). Esses serviços promovem desde a ciclagem de nutrientes, agregação de solo, sequestro de carbono e emissão de gases de efeito estufa (Fuhrman, 2009; Palm et al., 2014). Dessa forma, microrganismos têm sido cada vez mais utilizados como forma de se avaliar a qualidade de solos em sistemas de produção (Schlatter et al., 2022). Em comparação aos indicadores químicos e físicos, os indicadores biológicos, ou bioindicadores, são considerados mais sensíveis, pois respondem rapidamente a mudanças ocorridas no ecossistema (Cardoso et al., 2013). De acordo com Lourente et al. 2010, um solo de qualidade possui atividade biológica intensa e contém populações microbianas balanceadas, o que torna importante o monitoramento em alterações da biota para avaliar a sustentabilidade dos agroecossistemas (Matsuoka et al., 2003).

A biomassa microbiana do solo (BMS) é um importante indicador da qualidade que se relaciona fortemente com a produtividade de culturas (Mazzuchelli et al., 2020). Considerada a fração viva e ativa da matéria orgânica, a BMS é formada por organismos como algas, fungos, bactérias e alguns protozoários (Jenkinson e Ladd, 1981), e representa de 2 a 5% da fração orgânica do solo (Sparling, 1992). Além disso, atua diretamente em processos-chaves para o funcionamento de ecossistemas, como a transformação e a mineralização da MOS, estruturação e agregação do solo, ciclagem de nutrientes, degradação de metais pesados, fixação biológica de nitrogênio etc. (Liu et al., 2017, Ji et al., 2018).

Mensurar a BMS permite a compreensão da forma com que os microrganismos influenciam na qualidade do solo e na produtividade de culturas, já que esta é considerada um indicador sensível para avaliar as mudanças de manejo em um curto prazo. De acordo com Cheng (2009), o tempo de renovação da biomassa microbiana pode variar de 18 a 75 dias em solos sob cultivos agrícolas. Por outro lado, para Spohn et al. (2016), a renovação da biomassa ocorreu entre 197 e 322 dias para solos sob pastagens, e em solo de floresta o período foi entre 33 e 140 dias.

Geralmente, a BMS é quantificada pelo C e nitrogênio imobilizados pela biomassa e atividade microbiana. O carbono retido na biomassa representa entre de 1 e 5% do C orgânico (Gama-Rodrigues, 1999) e 1 a 5% do N total do solo (Cosser et al., 2007). Quanto maiores os valores de C e N microbiano, maior é a reserva desses elementos no solo. Já a atividade microbiana é medida pela respiração basal, o quociente metabólico e também pelas enzimas do solo, que demonstram a eficiência no qual a biomassa está em relação aos processos de mineralização e decomposição da MOS (Nannipieri, 1984).

Vale ressaltar que o solo é abrigo de diversos táxons microbianos (Raynaud e Nunan, 2014), o que torna esse microbioma mais complexo. A análise de sequenciamento genético permite avaliar mais profundamente acerca da composição, estrutura, riqueza e diversidade de comunidades microbianas (Carvalho et al., 2021). Com essas informações, é possível compreender a influência do manejo do solo sobre a microbiota e os benefícios obtidos a partir dessas interações (Faust e Raes, 2012).

Em ambientes tropicais com solo arenoso a atividade microbiana do solo é geralmente baixa (Cordeiro et al., 2021). Dessa forma, são necessários mais

estudos para definir estratégias para tornar esses solos mais produtivos e melhorar sua qualidade biológica. Neste contexto, avaliar a microbiota do solo e os efeitos de sistemas de manejos sobre a comunidade microbiana e qualidade do solo é fundamental para estabelecer a melhor forma de se conduzir sistemas de produção em solos arenosos e garantir a sustentabilidade e maior produtividade de culturas em agroecossistemas.

## 1.6 REFERÊNCIAS

ANGHINONI, G.; TORMENA, C. A.; LAL, R.; ZANCANARO, L.; KAPPES, C. Enhancing soil physical quality and cotton yields through diversification of agricultural practices in central Brazil. **Land Degradation and Development**, v. 30, n. 7, p. 788–798, 2019.

ARAÚJO, E. A. DE; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 187–206, 2012.

ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; et al. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 10, p. 967–978, 2015.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; et al. Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, 2013.

CARVALHO, L. A. L.; TEHERAN-SIERRA, L. G.; FUNNICELLI, M. I. G.; et al. Farming systems influence the compositional, structural, and functional characteristics of the sugarcane-associated microbiome. **Microbiological Research**, v. 252, n. March, 2021.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. DE; TIMM, L. C. Textura Do Solo: Conceitos E Aplicações Em Solos Arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31, 2017.

CHEN, C.; CHEN, H. Y. H.; CHEN, X.; HUANG, Z. Meta-analysis shows positive effects of plant diversity on microbial biomass and respiration. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2019.

CHENG, W. Rhizosphere priming effect: Its functional relationships with microbial turnover, evapotranspiration, and C-N budgets. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 9, p. 1795–1801, 2009.

CONANT, R. T.; RYAN, M. G.; ÅGREN, G. I.; et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology**, v. 17, n. 11, p. 3392–3404, 2011.

CORDEIRO, C. F. DOS S.; RODRIGUES, D. R.; ROCHA, C. H.; ARAUJO, F. F.; ECHER, F. R. Glomalin and microbial activity affected by cover crops and nitrogen management in sandy soil with cotton cultivation. **Applied Soil Ecology**, v. 167, n. March, 2021.

COSER, T. R. RAMOS, M. L. G.; AMÁBILE, R. F.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo de Cerrado com aplicação de fertilizante nitrogenado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 42, n. 3, p. 399-406, 2007.

COTRIM, M. F.; FARIAS, F. J. C.; DE CARVALHO, L. P.; et al. Environmental stratification in the brazilian cerrado on the yield and fiber quality of cotton genotypes. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 5, p. 1349–1355, 2019.

DA GAMA-RODRIGUES, E. F.; DE BARROS, N. F.; DA GAMA-RODRIGUES, A. C.; DE ARAÚJO SANTOS, G. Carbon, nitrogen and activity of microbial biomass in soil under eucalypt plantations. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 29, n. 6, p. 893–901, 2005.

DHALIWAL, S. S.; NARESH, R. K.; MANDAL, A.; SINGH, R.; DHALIWAL, M. K. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 1–2, n. May, p. 100007, 2019.

DONAGEMMA, G. K.; DE FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. DE C.; et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

FAO. An international consultation on integrated croplivestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. *Integrated Crop Management*, v. 13, 64p., 2010.

FAUST, K.; RAES, J. Microbial interactions: From networks to models. **Nature Reviews Microbiology**, v. 10, n. 8, p. 538–550, 2012.

FERREIRA, A.C.B.; BORIN, A.L.D.C.; BRITO, G.G.; FILHO, J.L.S.; BOGIANE, J.C.; Épocas de semeadura, cultivares e densidades de plantas para algodão adensado em segunda safra. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 397-405, out./dez. 2015.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de Água em solos das formações caiuí e paranavaí. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 3, p. 613–621, 2013.

FUHRMAN, J. A. Microbial community structure and its functional implications. **Nature**, v. 459, n. 7244, p. 193–199, 2009.

HASSINK, J.; WHITMORE, A. P.; KUBÁT, J. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. **Developments in Crop Science**, v. 25, n. C, p. 245–255, 1997.

HAYNES, R. J. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. **Advances in Agronomy**, v. 85, p. 221–268, 2005.

HOFFMANN, L. V.; KRESIC, I. B.; PAZ, J. G.; et al. Cotton Production in Brazil and Other South American Countries. **Cotton Production**, v. 2003, n. Paytas 2010, p. 277–295, 2019.

HORWATH, W. R. **Carbon cycling and formation of soil organic matter**. Third Edition ed. Elsevier Inc., 2008.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, n. September 2019, p. 103295, 2020.

HUFNAGEL, J.; RECKLING, M.; EWERT, F. Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 2, 2020.

JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. Microbial biomass in soil: measurements and turnover. In: PAUL, E.A.; LADD J.N (eds). **Soil biochemistry**. Marcel Dekker, 1981. p.425-471.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America journal**, v. 61, 1997.

LAL, R. Forest Soils and Carbon Sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, p. 242-258, 2005.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability** (Switzerland), v.7, n.5, p. 5875–5895, 2015.

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

LI, H.; VAN DEN BULCKE, J.; MENDOZA, O.; et al. Soil texture controls added organic matter mineralization by regulating soil moisture—evidence from a

field experiment in a maritime climate. **Geoderma**, v. 410, n. December 2021, p. 115690, 2022.

LIU, J.; MOONEY, H.; HULL, V.; et al. Systems integration for global sustainability. **Science**, v. 347, n. 6225, 2015.

LOPES, A. A. C.; BOGIANI, J. C.; DE FIGUEIREDO, C. C.; et al. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 4, p. 2193–2204, 2021.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; MARCHETTI, M. E.; De SOUZA, L. C. F.; De SOUZA, C. M. A.; GONÇALVES, M. C.; SILVA, M. A. G. Rotação de culturas e relações com atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade do milho. **Semina:Ciencias Agrarias**, v.31, n.4, p.829–842, 2010.

LUMBRERAS, J.F.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P.E.F. da; BARROS, A.H.C.; AGLIO, M.L.D.; DART, R. de O.; SILVEIRA, H.L.F. da; QUARTAROLI, C.F.; ALMEIDA, R.E.M. de; FREITAS, P.L. de. Aptidão agrícola das terras do MATOPIBA. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 48p. il. color. (Embrapa Solos. Documentos, 179).

MÄDER, P.; FLIESSBACH, A.; DUBOIS, D.; et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming. **Science**, v. 296, n. 5573, p. 1694–1697, 2002.

MAZZUCHELLI, R. C. L.; DE ARAUJO, A. S. F.; MORO, E.; DE ARAUJO, F. F. Changes in Soil Properties and Crop Yield as a Function of Early Desiccation of Pastures. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 840–848, 2020.

MORAES, A., CARVALHO, P. C. F., PELISSARI, A., ANGHINONI, I., LUSTOSA, S.B.C., Lang, C.R., Nunes, P. A. A. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e históricos. In: SOUZA, E.D., SILVA, F.D., T.S ASSMANN, T. S., CARNEIRO, M.A.C., CARVALHO, P.C.F., & PAULINO, H.B.

Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. pp. 13-28. Tubarão: Copiart, 2018.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras: UFLA, 2006.

NANNIPIERI, P. Microbial biomass and activity measurements in soil: ecological significance. In: \_\_\_ KLUG, M.J.; REDDY, C.A. Current perspectives in microbial ecology. Washington: **American Society for Microbiology**, 1984

PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 187, p. 87–105, 2014.

PICCOLO, A. Humus and soil conservation. In: PICCOLO, A., ed. Humic substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam, Elsevier, 1996. p.225-264.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RAMNARINE, R.; VORONEY, R. P.; WAGNER-RIDDLE, C.; DUNFIELD, K. E. Conventional and No-Tillage Effects on the Distribution of Crop Residues and Light Fraction Organic Matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 1, p. 74–80, 2015.

RAYNAUD, X.; NUNAN, N. Spatial ecology of bacteria at the microscale in soil. **PLoS ONE**, v. 9, n. 1, 2014.

ROS, G. TEMMINGHOFF, E. HOFFLAND, E. Nitrogen mineralization: A review and meta-analysis of the predictive value of soil tests. **European Journal of Soil Science**, 2010.

SANTOS, A.; DA SILVA MATOS, E.; DA SILVA FREDDI, O.; GALBIERI, R.; LAL, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil

attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 118, n. April, p. 126090, 2020.

SCHLATTER, D. C.; HANSEN, J.; CARLSON, B.; et al. Are microbial communities indicators of soil health in a dryland wheat cropping system? **Applied Soil Ecology**, v. 170, n. November 2021, p. 104302, 2022.

SILVA I.P.F; JUNIOR J.F.S.; ARALDI R; TANAKA, A. A. ESTUDO DAS FASES FENOLÓGICAS DO ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.). **ESTUDO DAS FASES FENOLÓGICAS DO ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.)**, v. 10, n. 20, p. 10, 2011.

SILVA, M. DE O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L. DO; et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838–47855, 2020.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization of organic matter by soil minerals: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002.

SNEESSENS, I.; VEYSSET, P.; BENOIT, M.; LAMADON, A.; BRUNSCHWIG, G. Direct and indirect impacts of crop-livestock organization on mixed crop-livestock systems sustainability: A model-based study. **Animal**, v. 10, n. 11, p. 1911–1922, 2016.

SPARLING, G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, p.195-207, 1992.

SPERA, S.; REATTO, A.; MARTINS, É.; CORREIA, J.; CUNHA, T. Solos areno-quarzosos no Cerrado: problemas, características e limitação ao uso. **Embrapa Cerrados**, v. 7, p. 1–48, 1999.

SPOHN, M.; KLAUS, K.; WANEK, W.; RICHTER, A. Microbial carbon use efficiency and biomass turnover times depending on soil depth - Implications for carbon cycling. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 96, p. 74–81, 2016.

STEVENSON, F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: J. Wiley, 1994. 496p

TADINI, A. M.; BERNARDI, A. C. C.; MILORI, D. M. B. P.; et al. Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. **Geoderma Regional**, v. 28, n. June 2021, 2022.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; et al. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil and Tillage Research**, v. 211, n. December 2019, 2021.

TEIXEIRA, H. M.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M.; TITTONELL, P.; PEÑA-CLAROS, M. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 305, n. May 2020, 2021.

TIEMANN, L. K.; GRANDY, A. S.; ATKINSON, E. E.; MARIN-SPIOTTA, E.; MCDANIEL, M. D. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. **Ecology Letters**, v. 18, n. 8, p. 761–771, 2015.

TIESSEN, H.; CUEVAS, E.; CHACON, P. O papel da matéria orgânica do solo na manutenção da fertilidade do solo.pdf. **Nature**, 1994.

TILMAN, D. Tilman\_01\_FunctionalDiversity.pdf. **Encyclopedia of Biodiversity, Volume 3**, 2001.

WENDEL, J. F.; ALBERT, V. A. Phylogenetics of the Cotton Genus (*Gossypium*): Character-State Weighted Parsimony Analysis of Chloroplast-DNA

Restriction Site Data and Its Systematic and Biogeographic Implications. **Systematic Botany**, v. 17, n. 1, p. 115, 1992.

WENDEL, J.F. BRUBAKER, C. L. SEELANAN, T. The Origin and Evolution of *Gossypium*. In: Stewart, J. M., Oosterhuis, D. M., Heitholt, J. J., & Mauney, J. R. (Eds.). *Physiology of Cotton*. 2010.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, n. November 2017, p. 149–162, 2019.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; et al. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 205, n. August 2020, p. 104749, 2021.

YOST, J. L.; HARTEMINK, A. E. **Soil organic carbon in sandy soils: A review**. 1° ed. Elsevier Inc., 2019.

## **2 CAPÍTULO 1: INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO DO ALGODÃO EM SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO SOB SOLO ARENOSO NO CURTO PRAZO**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A região do Cerrado detém a maior produção de soja e algodão do Brasil, com destaque para o estado de Mato Grosso (Conab, 2021). Da produção nacional, o estado de Mato Grosso representa atualmente cerca 70% do algodão produzido, com o total de 4,5 milhões de toneladas de algodão em caroço, de acordo com os dados da safra 2019/2020 (Conab, 2021). O êxito da conicultura nessa região está relacionado com a topografia e regimes de chuva favoráveis à cultura do algodão (Santos et al., 2020), além da maior parte ser produzida sob solos com alto potencial produtivo (Hoffman et al., 2020).

No entanto, cerca de 15% da área do Cerrado é areias quartzosas (Spera et al., 1999). Esses solos geralmente têm baixa fertilidade natural, representada por baixa CTC e saturação por bases (Huang et al., 2020). Essas características tornam esses solos mais suscetíveis à degradação, bem como a perda da capacidade produtiva quando comparados com solos de textura média à argilosa, em condições ambientais semelhantes (Donagemma et al., 2016). Dessa forma, o potencial agrícola desses solos é considerado restrito e, muitas vezes, produtores rurais limitam essas áreas à produção de pastagens devido ao baixo potencial produtivo (Ramalho Filho & Beek, 1995).

Apesar dessas adversidades, quando bem manejados, solos de textura arenosa podem produzir altos rendimentos de soja, milho e algodão (Donagemma et al., 2016). Assim, a identificação de sistemas de manejo que promovam uma intensificação mais sustentável da agricultura devem ser de grande importância em fronteiras agrícolas que há predominância de solos arenosos, como é a região do Cerrado (Dionísio et al., 2020).

Nesse sentido, a diversificação dos sistemas de produção pode ser considerada uma alternativa para viabilizar a produção de algodão em solos arenosos. A diversificação da produção pode explorar atividades agrícolas e pecuárias simultaneamente, contribuindo para a intensificação sustentável,

aumentando a produção de alimentos, ao passo que melhora a qualidade ambiental e preserva a biodiversidade natural (Sauvadet et al., 2021).

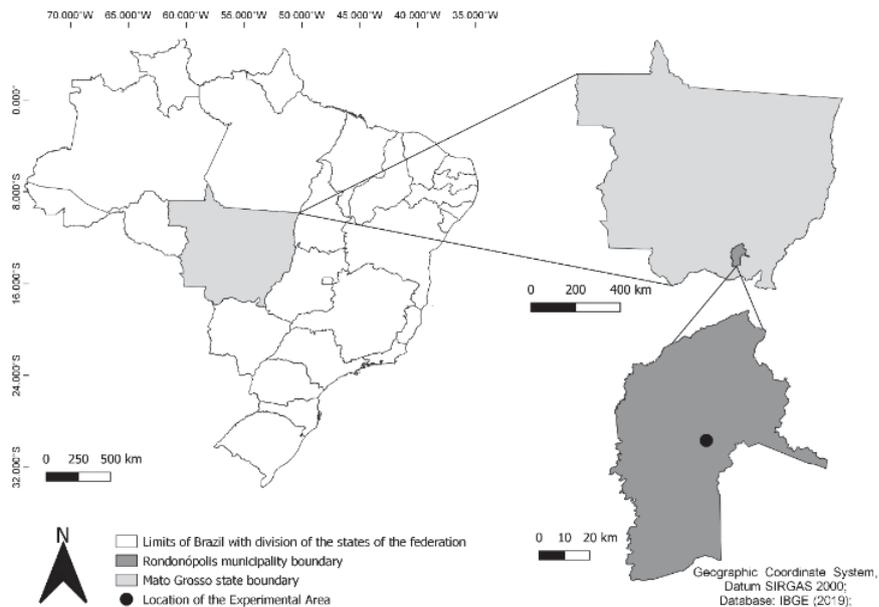
Dentre os benefícios do uso desses sistemas, encontra-se o aumento dos estoques de C no solo e da ciclagem de nutrientes, a melhoria da fertilidade, a diversificação da renda, a diversidade microbiana e o rendimento de culturas no longo prazo (Renard e Tilman, 2019; Duchene et al., 2017). Embora alguns estudos já tenham demonstrado benefícios da diversificação de sistemas de produção para a melhoria da qualidade do solo e produtividade de culturas (Silva et al., 2022), existem poucos estudos avaliando o desempenho desses sistemas em solos arenosos do Cerrado brasileiro no curto prazo (Yost e Hartemink, 2019).

Diante disso, acredita-se que a adoção de sistemas de manejo que promovam a diversificação dos sistemas de produção, possa ser uma alternativa sustentável para melhorar a qualidade de solos arenosos e viabilizar a produção de algodão em solos arenosos do Cerrado. Alguns indicadores de qualidade permitem avaliar o impacto de sistemas de manejo sob a qualidade no solo, como é o caso de indicadores biológicos, que respondem rapidamente a mudanças ocorridas no ecossistema (Cardoso et al., 2013). Nesse sentido, esse estudo teve como objetivo avaliar impacto da adoção de sistemas com diferentes níveis de diversidade funcional no curto prazo, sobre indicadores de qualidade de um Neossolo Quartzarênico e o impacto na produtividade do algodão no Cerrado brasileiro.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em novembro de 2017 em área experimental do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), Rondonópolis/MT (16°33'22.13"S e 54°38'7.77"W e altitude de 312 metros). O solo é classificado como um Neossolo Quartzarênico de textura arenosa (823 g kg<sup>-1</sup> de areia, 32 g kg<sup>-1</sup> de silte e 145 g kg<sup>-1</sup> de argila). O clima da região é classificado como Aw segundo Köppen, com período chuvoso entre os meses de outubro a abril e seco entre maio e setembro, com precipitação média anual de 1500 mm. No período de outubro de 2017 a maio de 2020, a precipitação acumulada registrada no município foi de 3800 mm e a temperatura média mensal foi de 25,3°C.

Figura 1 – Localização da área experimental no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.



A área de estudo era utilizada com pastagem extensiva até outubro de 2014 quando se iniciou a sucessão de Soja (*Glycine max*), de outubro a fevereiro, e pastagem (*Urochloa ruziziensis*) como cobertura, de março a setembro. Esse manejo ocorreu até o início do experimento, quando o solo apresentava os atributos apresentados na Tabela 1, seguido da correção com 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 10 Mg ha<sup>-1</sup> de pó de rocha.

Tabela 1 – Atributos químicos em julho de 2017 de um Neossolo Quartzarênico no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso.

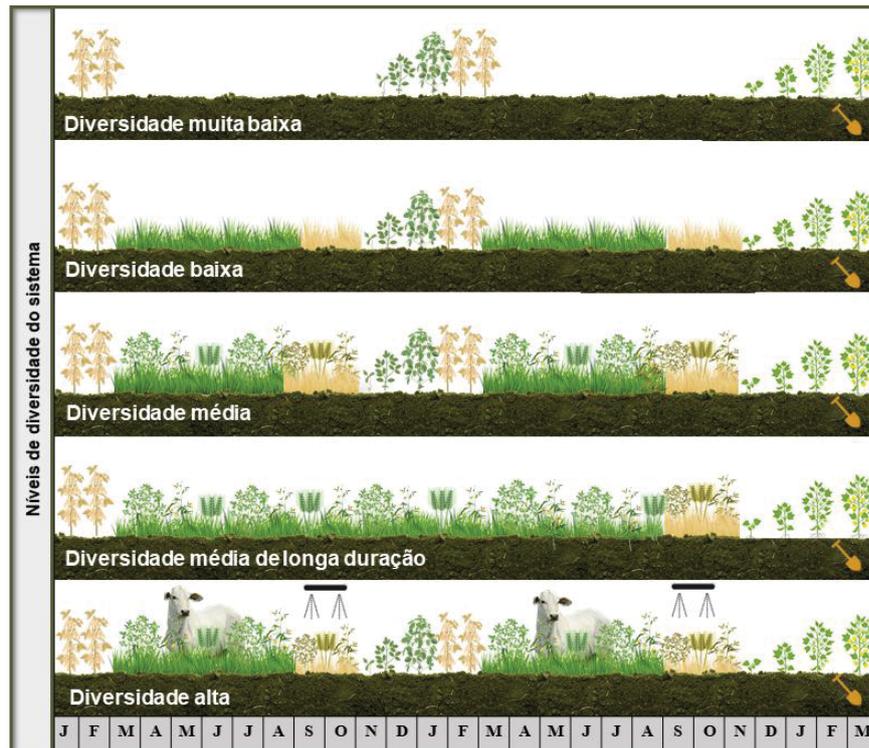
Camada	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V
	(CaCl)	g/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>				-----cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> -----			%
0,0-0,2 m	5,5	26,3	54,1	64,6	2,6	1,0	0,0	2,6	6,4	58,7
0,2-0,4 m	5,3	18,7	33,6	50,9	1,8	0,6	0,0	2,5	5,1	51,1

A área total do experimento consiste em 6,25 hectares, divididos em 15 parcelas experimentais para a distribuição dos 5 tratamentos, dispostos em um delineamento de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos são determinados por combinações de sistemas de manejo com diferentes níveis de diversidade funcional, e estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 - Sistemas de produção implantados na área experimental do Instituto mato-grossense do Algodão em Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

Nível de diversidade do sistema	Sistema de produção
Diversidade muito baixa	Soja na safra com pousio na entressafra
Diversidade baixa	Soja na safra e entressafra de <i>Urochloa ruziziensis</i> cultivada solteira por 8 meses
Diversidade média	Soja na safra e entressafra de <i>U. ruziziensis</i> , niger, nabo forrageiro, feijão caupí e trigo mourisco por 8 meses
Diversidade média de longa duração	Soja na safra e entressafra <i>U. ruziziensis</i> , niger, nabo forrageiro, feijão caupí e trigo mourisco por 20 meses
Diversidade alta (SIPA)	Soja na safra e entressafra <i>U. ruziziensis</i> , niger, nabo forrageiro, feijão caupí, trigo mourisco e entrada de animais para pastejo

Figura 2 - Esquema dos tratamentos com sistemas com níveis crescentes de diversidade vegetal em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado



Os consórcios foram implantados com semeadora de fluxo contínuo, sem adubação de base e cobertura. As sementes foram previamente misturadas conforme quantidades estipuladas para cada consórcio (12 kg ha<sup>-1</sup> de *U. ruziziensis*, 3 kg ha<sup>-1</sup> de niger e nabo forrageiro, 6 kg ha<sup>-1</sup> de trigo mourisco e 2 kg ha<sup>-1</sup> de feijão-caupi).

No sistema de diversidade alta foram alocadas em cada parcela cinco novilhas mestiças de cruza das raças Nelore com Holandês, com peso vivo médio de 196,4 kg, totalizando em média 1,66 UA/ha. Os animais entraram na área quando o pasto atingiu uma altura média de 50 cm, com método de pastoreio com lotação contínua. Após a saída dos animais, o pasto foi dessecado em dezembro de 2019.

Na safra de 2019/2020, o algodão foi cultivado como rotação da soja, no mês de dezembro, com a cultivar IMA 5001, semeado com espaçamento entre linhas de 90 cm e 10 plantas m<sup>-1</sup>. A adubação de base utilizada foi 250 kg ha<sup>-1</sup> de Monoamôniofosfato (MAP). Foram aplicados em cobertura 200 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, 10 dias após a semeadura, e duas aplicações de 180 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de ureia, 5 e 32 dias após a semeadura, respectivamente.

A coleta das amostras para análise dos atributos indicadores de qualidade do solo foi realizada em março de 2020, no pleno florescimento do algodão. Todas as amostras foram coletadas na camada de 0-10 cm do solo. As amostras para

determinação dos atributos químicos foram armazenadas em sacos plásticos, posteriormente secas ao ar, tamisadas em peneira de 2 mm e armazenadas até a realização das análises. Já as amostras de solo para as determinações dos atributos biológicos foram acondicionadas em sacos de plástico e armazenadas sob refrigeração (4°C).

Tabela 3 – Atributos químicos na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

Níveis de diversidade	pH <sup>(1)</sup>	P <sup>(2)</sup> --- mg dm <sup>3</sup> ---	K <sup>(2)</sup>	Ca <sup>(3)</sup>	Mg <sup>(3)</sup> ----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----	CTC <sup>(4)</sup>	V%
<b>Muito baixo</b>	6.3	166.5	152.7a	3.6	1.2	6.5	80.0
<b>Baixo</b>	6.2	176.5	114.0ab	3.4	1.4	6.5	77.4
<b>Médio</b>	6.3	158.2	116.3ab	3.3	1.4	6.5	78.3
<b>Longa duração</b>	6.2	146.1	98.3b	2.9	1.0	5.4	76.1
<b>Alto</b>	6.4	202.0	132.7ab	3.8	1.7	7.1	82.2
Média	6.3 <sup>ns</sup>	169.9 <sup>ns</sup>	122.8	3.4 <sup>ns</sup>	1.4 <sup>ns</sup>	6.4 <sup>ns</sup>	78.8 <sup>ns</sup>

<sup>(1)</sup> pH em CaCl<sub>2</sub>. <sup>(2)</sup> Fósforo (P) e potássio disponível (K) (Mehlich 1). <sup>(3)</sup> Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocável (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>). <sup>(4)</sup> Capacidade de troca catiônica em pH 7.0. Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey (P < 0.05). O “ns” indica ausência de diferenças significativas.

O fracionamento granulométrico da matéria orgânica foi realizado segundo Cambardella e Elliot (1992). Os teores de carbono orgânico total e particulado foram determinados por combustão úmida (Walkley-black), e os teores de nitrogênio total e na fração particulada por destilação de arraste de vapor (Tedesco et al., 1995).

Para os atributos biológicos, foram avaliados os teores de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo pelo método de fumigação-extração (Brookes et al., 1985; Vance et al., 1987), com a relação solo extrator 1:2,5 de acordo com Tate et al. (1988) e fator de correção de 0,33 para o C (Sparling e West, 1988) e de 0,54 para N (Brookes et al., 1985). A respiração basal do solo foi realizada pelo processo de incubação (Jenkinson e Powlson, 1976), e foram determinados o quociente metabólico (Anderson & Domsh, 1993) e o quociente microbiano (Sparling, 1992).

Também foi realizada a análise de atividade enzimática do solo, em que a atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase foi realizada pelo método proposto por Eivazi e Tabatabai (1988), a fosfatase ácida foi realizada por Dick et al. (1996), atividade da urease foi determinada de acordo com Tabatabai e Bremner (1972) e a hidrólise do diacetato de fluoresceína pelo método proposto por Dick et al. (1996).

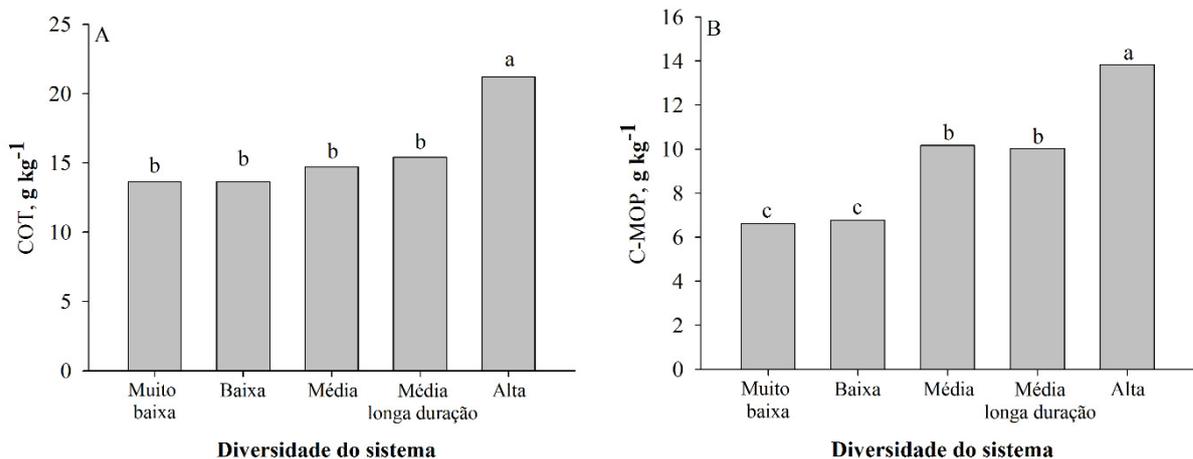
A colheita foi realizada em maio de 2020. A produção do algodão foi obtida por meio da coleta de planta em quinze metros lineares de cada parcela, excluindo 2 (dois) metros de bordadura. Os capulhos de cada planta foram contados e retirou-se 5 capulhos de cada parcela, que foram pesados, separados do caroço, pesando-se a fibra e o caroço separadamente. Posteriormente, a produção do algodão foi estimada em peso por hectare.

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e análise de variância. Quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey ( $p < 0.05$ ), utilizando o software R Studio (Versão 3.6.3). Também foi realizada análise de componentes principais, utilizando-se o software R, a fim de discriminar os atributos indicadores de qualidade do solo que melhor caracterizam o potencial produtivo de cada sistema.

## 2.3 RESULTADOS

O sistema com diversidade alta teve um COT 49% superior aos demais sistemas (Figura 3A). A mesma tendência foi observada para a fração particulada do C, em que o sistema de diversidade alta obteve teores de C 87% superior aos tratamentos com diversidade muito baixa e baixa e apresentando valores intermediários nos sistemas de diversidade média e média de longa duração (10,2 g kg<sup>-1</sup>) (Figura 3B).

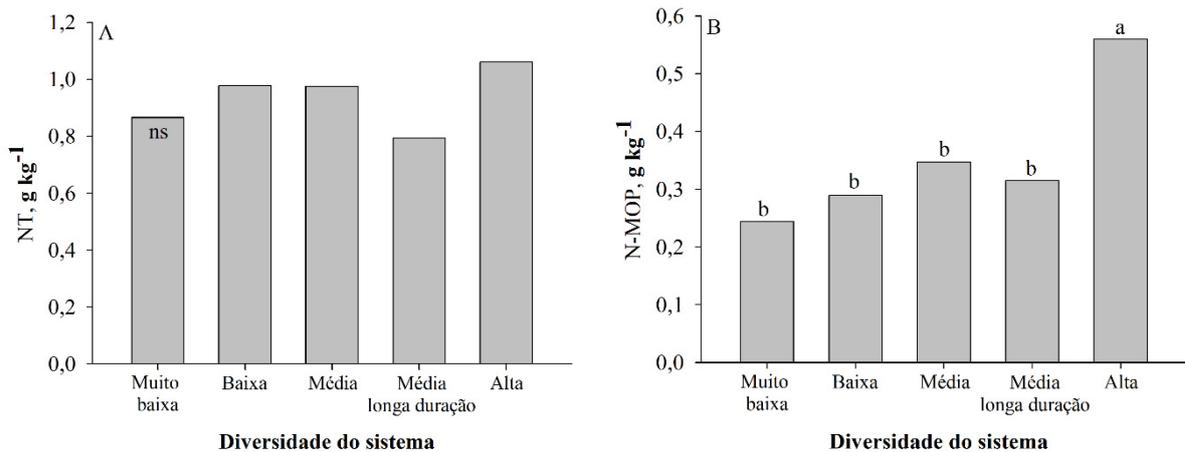
Figura 3 - Teores de carbono orgânico total (A) da matéria orgânica particulada (B) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

Para os teores de nitrogênio total, não houve diferenças significativas entre os sistemas de produção avaliados no curto prazo, que apresentaram média geral de 0,934 g kg<sup>-1</sup> de N (Figura 4A). Por outro lado, a fração particulada do nitrogênio (N-MOP) mostrou um aumento significativo de 87,91% no sistema de diversidade alta, em relação aos demais sistemas (Figura 4B).

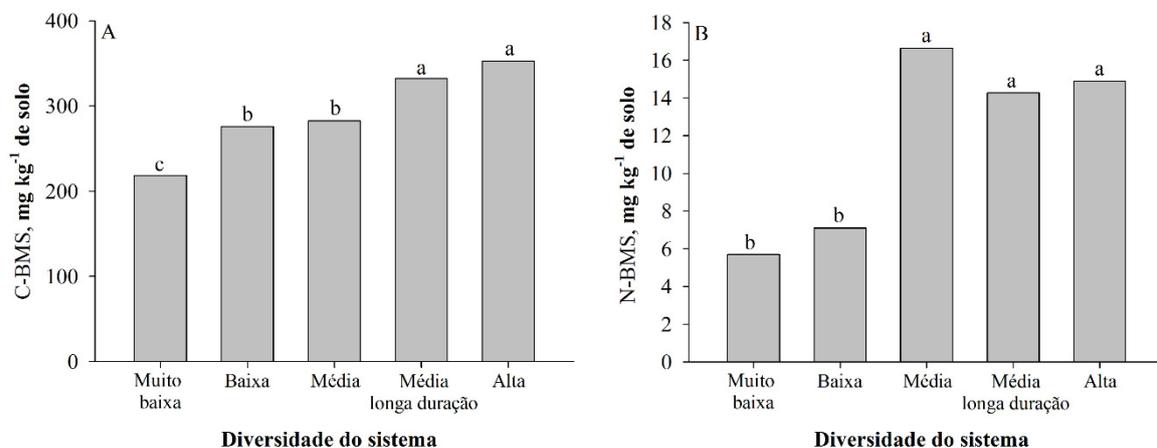
Figura 4 – Teores de nitrogênio total (A) e particulado (B) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ). ns = não significativo.

A biomassa microbiana do solo foi afetada pela diversidade funcional nos sistemas de produção (Figura 5). O C-BMS foi 61,6% maior sistema de diversidade alta (352,82 mg kg solo<sup>-1</sup>), em comparação ao sistema de diversidade muito baixa, enquanto os teores de C microbiano apresentaram valores intermediários para o sistema de diversidade baixa e diversidade média, com 275 e 282 mg C kg solo<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 5A). Quanto ao N-BMS, os sistemas com aumento de diversidade funcional foram significativamente maiores, em média de 137% em comparação aos sistemas com diversidade baixa e muito baixa (Figura 5B).

Figura 5 - Carbono (A) e nitrogênio da biomassa microbiana (B) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neosolo Quartzarênico no Cerrado.



Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

Quanto à atividade da biomassa microbiana, os diferentes níveis de diversidade não afetaram a respiração basal e o quociente metabólico (Tabela 4). Já o quociente microbiano, o tratamento com média diversidade de longo prazo teve 68% maior qMIC do que os sistemas com baixa e muito baixa diversidade, com valores intermediários nos demais tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 - Respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) e quociente microbiano (qMIC) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

Diversidade do sistema	RBS	qCO <sub>2</sub>	qMIC
	mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>	(mg C-CO <sub>2</sub> mg <sup>-1</sup> C-BMS h <sup>-1</sup> ) x 10 <sup>-3</sup>	%
Muito baixa	0.3	1.2	1.5 c
Baixa	0.4	1.2	1,5 c
Média	0.4	1,0	2,0 b
Média de longa duração	0.4	1.4	2.5 a
Alta	0.4	1.1	1.7 b
Média	0.4 <sup>ns</sup>	1.5 <sup>ns</sup>	1.9

Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey (P < 0.05). O “ns” indica ausência de diferenças significativas.

A atividade enzimática do solo foi influenciada pela diversidade funcional nos sistemas de produção (Tabela 5). A atividade da β-glicosidase foi 119% superior no sistema de diversidade alta em comparação ao sistema de diversidade muito baixa e não se diferiu do sistema de diversidade Média (Tabela 5).

Tabela 5 - Atividade da β-glicosidase, fosfatase ácida e urease na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

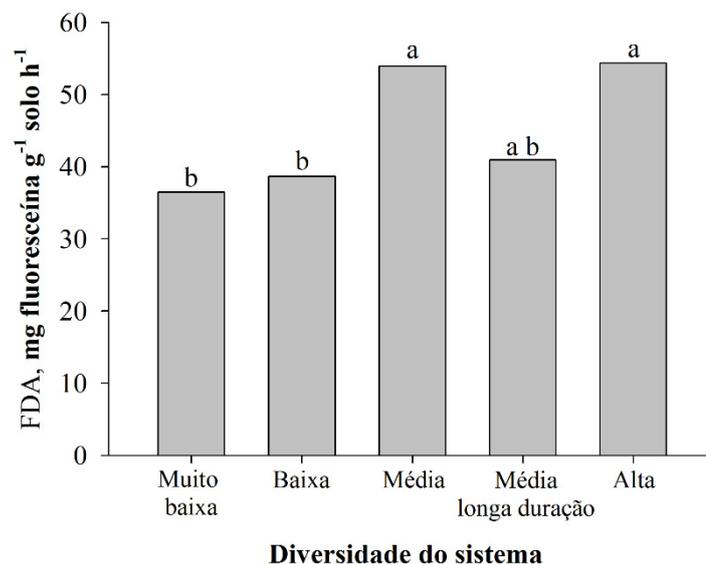
Diversidade do sistema	β-glicosidase	Fosfatase ácida	Urease
	μg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>	μg N-NH <sub>4</sub> g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>	μg N-NH <sub>4</sub> g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>
Muito baixa	503,53 c	1428,1 a	2,1 a
Baixa	743,08 bc	1739,5 a	0,5 b
Média	935,85 ab	1025,0 b	0,3 b
Média de longa duração	791,10 bc	917,7 b	0,2 b
Alta	1103,16 a	967,97 b	0,4 b
Média	815,74	1215,6	0,76

Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ). O “ns” indica ausência de diferenças significativas.

Para a atividade da fosfatase ácida, os sistemas com diversidade média, média de longa duração e diversidade alta apresentaram menores níveis de atividade da enzima, que foi 47% maior no sistema de diversidade baixa, seguido do sistema de diversidade muito baixa, com 35% a mais que a média dos demais sistemas (Tabela 5). A mesma tendência foi observada para a atividade da urease. No entanto, somente o sistema de diversidade muito baixa apresentou diferenças significativas, sendo 414,28% superior aos demais sistemas.

Quanto à FDA, os sistemas de diversidade média e diversidade alta apontaram uma atividade enzimática superior em até 50% quando comparado à diversidade baixa e muito baixa (Figura 6). Quando à diversidade foi média de longa duração, a FDA não se diferiu significativamente do sistema de diversidade alta, mas também não foi diferente do sistema de diversidade baixa e muito baixa.

Figura 6 - Atividade da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

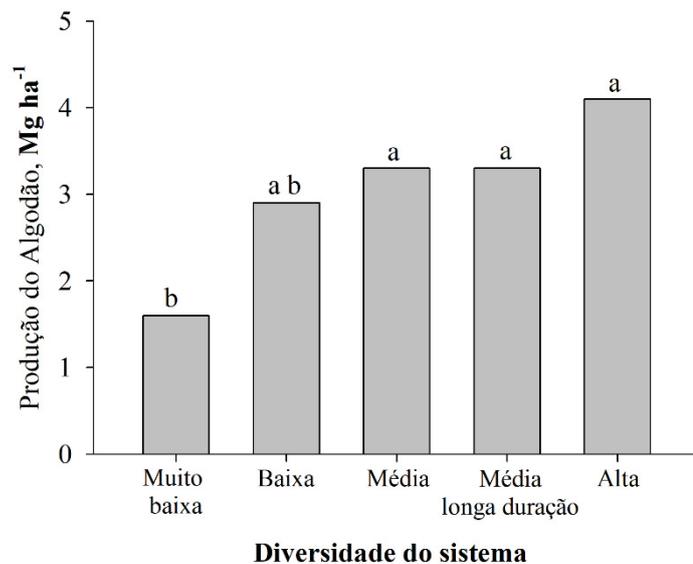


Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ).

Maiores produtividades de algodão foram alcançadas conforme houve o aumento do grau de diversidade funcional no sistema (Figura 6). O tratamento com Alta diversidade funcional teve a maior produtividade (4,1 Mg ha<sup>-1</sup>), 156% superior

ao tratamento com muito baixa diversidade. Os sistemas com diversidade Média de curto e longo prazo tiveram produção 101% superior ao sistema de diversidade muito baixa. Já o sistema de diversidade Baixa apresentou produtividade (2,9 Mg ha<sup>-1</sup>) semelhante ao sistema com diversidade muito baixa (1.6 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 7).

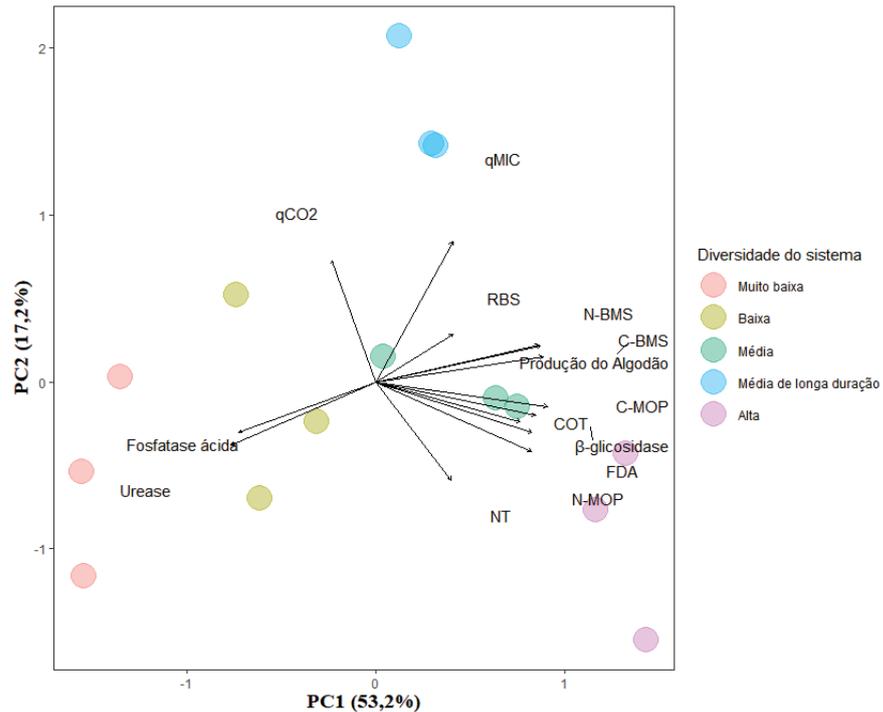
Figura 7 – Produção total de algodão em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



Médias seguidas de letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey (P < 0.05).

A primeira componente da análise de componentes principais explica 53,2% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda componente explicou 17,2% (Figura 8). Foi observado um agrupamento de sistemas com maiores níveis de diversidade funcional (sistema de diversidade alta e diversidade média). Por outro lado, mostrou distanciamento dos sistemas de diversidade muito baixa e diversidade baixa, assim como para o sistema de diversidade média de longa duração.

Figura 8 - Biplot dos componentes principais dos indicadores de qualidade do solo e produção total de algodão em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



qCO<sub>2</sub>: quociente metabólico; RBS: respiração basal do solo; qMIC: quociente microbiano; N-BMS: nitrogênio da biomassa microbiana; C-BMS: carbono da biomassa microbiana; C-MOP: carbono da matéria orgânica particulada; COT: carbono orgânico total; NT: nitrogênio total; FDA: hidrólise do diacetato de fluoresceína; N-MOP: nitrogênio da matéria orgânica particulada.

As variáveis N-MOP, β-glicosidase, FDA, COT e C-MOP mostraram-se com alta correlação com o sistema de diversidade Média e o sistema de diversidade Alta, mas também mostraram proximidade com as variáveis de produção do algodão, C-BMS e N-BMS. Por outro lado, as variáveis urease e fosfatase ácida mostraram correlação apenas com os sistemas de diversidade baixa e diversidade muito baixa. O sistema de diversidade média de longa duração mostrou-se mais proximidade com o qMIC (Figura 8).

## 2.4 DISCUSSÃO

O aumento de diversidade funcional nos sistemas de produção influenciou positivamente a produtividade do algodão em solos arenosos no curto prazo (Figura 7). No sistema de diversidade muito baixa, a produção do algodão pode ter sido limitada por efeitos negativos relacionados a baixa quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos, o que limitou os processos microbiológicos e bioquímicos no solo, já que as únicas entradas nesse sistema foram promovidas pela cultura da soja no período da safra de 2018/2019. De fato, Santos et al., (2020) observaram que o rendimento do algodão em sistemas que ampliam a diversidade de culturas é maior em relação àqueles conduzidos sob monocultura. Dessa forma, acredita-se que para os sistemas com níveis de diversidade, a entrada de resíduos de diferentes espécies vegetais com variadas taxas de mineralização promoveu maior cobertura do solo, assim como biomassa radicular no perfil do solo, o que pode melhorar a retenção de água, nutrientes, além de melhorar a aeração do solo, e assim favorecer o desenvolvimento e a produção do algodão (Page et al., 2019). Mauget et al. (2021) avaliando os efeitos entre o carbono orgânico do solo e a retenção de água em sistemas com bases conservacionistas sob solos arenosos, observaram uma relação muito forte entre o aumento de C com a maior retenção de água e, conseqüentemente, maior rendimento da cultura do algodão.

Nesse contexto, é possível que o incremento de COT em curto prazo no sistema de diversidade alta pode ter relação com o aumento da diversidade funcional, principalmente pela entrada de animais, (Figura 3A), visto que em comparação ao sistema com diversidade média e média de longa duração, o componente animal é o único diferencial (Tabela 2). Em sistemas de produção integrada, como é o caso do sistema de diversidade alta, o animal atua como catalisador ao introduzir variabilidade e novas vias de fluxos de nutrientes e água (Anghinoni et al., 2013), e a interação solo-planta-animal tem efeitos sinérgicos que podem levar ao maior acúmulo C orgânico em decorrência do processo de pastejo, que estimula o desenvolvimento radicular e aéreo de plantas (Moraes et al., 2014). Dessa forma, há o indicativo de que o aumento de C orgânico ocorreu pela adição de material orgânico, que melhora a retenção de água, nutrientes e promove o crescimento da biomassa microbiana (Figura 5), refletindo positivamente na

qualidade do solo arenosos e na produtividade de culturas (Figura 7) (Kurmangozhinov et al., 2020).

Geralmente, solos arenosos possuem maior tendência à redução de C (Dieckow et al., 2009), já que a argila, mineral baixo nesses solos, tem capacidade de proteger o C em agregados (Hassink, 2016) e devido à composição de moléculas com baixo peso molecular de algumas culturas, como o trigo mourisco, a fração particulada está mais suscetível à ação de microrganismos decompositores por não estar associada a minerais (Roscoe, 2002). Além disso, o aumento da disponibilidade de material orgânico nos solos pode favorecer o crescimento da comunidade microbiana e acelerar a decomposição da fração leve de C (Kurmangozhinov et al., 2020). No entanto, aumentos de C da fração particulada foram observados para o sistema em que a diversidade é alta, com tendências de aumento para os sistemas de diversidade média e média de longa duração em comparação aos sistemas de diversidade baixa e muito baixa (Figura 3B), mesmo com o aumento da biomassa microbiana (Figura 5). Esses incrementos nos teores de C-MOP podem levar ao aumento nos estoques de COT em um período menor que cinco anos (Howarth, 2007), e promover benefícios ambientais como o sequestro de C, aumento da umidade e redução da erosão (Six et al., 2002), que são manejos essenciais para solos mais frágeis, como os solos arenosos.

Na mesma linha, o maior teor de N-MOP observado para o sistema de diversidade alta (Figura 4B) pode estar relacionado com os efeitos indiretos da presença do animal, como a adição de esterco (Moraes et al., 2014). No entanto, o tempo de observação não foi o suficiente para que houvesse diferença no N total entre os sistemas de produção (Figura 4A) no presente estudo. Esse fato pode ser devido às entradas de N exclusivamente via fixação biológica pelo feijão-caupí, demandando mais tempo para encontrarmos diferenças entre os sistemas de produção. Isso corrobora o estudo de Piva et al., 2020, em que, no curto prazo, não encontrou alterações nos acúmulos de N total no solo sob sistemas mais diversificados e com a presença do animal em pastejo.

O C-BMS e o N-BMS responderam positivamente a diversificação dos sistemas de produção em solo arenoso (Figura 5). A presença de diferentes grupos funcionais, ou seja, plantas e animais no sistema de diversidade alta, a variedade de espécies no sistema de diversidade média e o maior período de permanência do sistema de diversidade média de longa duração podem ter elevado a quantidade de

resíduos orgânicos no solo. Isso pode proporcionar maior fonte de substrato para os microrganismos, e, como consequência, aumento na imobilização de C e N pela biomassa microbiana (Sekaran et al., 2021). De acordo com Prommer et al. (2019), o aumento da diversidade de plantas acompanha o crescimento microbiano e impulsiona a quantidade de biomassa microbiana. O mesmo autor cita que, a longo prazo, esse C quando disponível após morte celular, se acumulará em matéria orgânica e pode promover o aumento do carbono orgânico (Prommer et al., 2019). Além disso, a atividade da  $\beta$ -glicosidase, enzima influenciada pela qualidade dos resíduos de culturas e que reflete a ciclagem de C e a atividade biológica (Adetunji et al., 2017), também foi maior quando a diversidade foi alta e média. Esses resultados podem apontar que as diferentes espécies de culturas, associada à presença do animal, aumentaram o teor de matéria orgânica e a qualidade biológica de solos arenosos no curto prazo.

Da mesma forma, os aumentos de N-BMS em sistemas mais diversificados podem estar relacionados aumentos nos teores COT (Hatch et al., 2000) (Figura 3A). Maiores teores de N-BMS indicam a imobilização de N pela microbiota, o que pode levar a redução de N disponível as plantas, porém, a imobilização de N pela microbiota é temporária e após a morte do microrganismo a tendência é que esse componente fique disponível no solo (Perez et al., 2005). Assim, ao se acumular nas frações lábeis, o C e N ficam prontamente disponível para as plantas e com isso contribuir com a fertilidade do solo e produtividade de culturas (Gama-Rodrigues et al., 2005).

Por outro lado, apesar do aumento quantitativo de substrato promovido pelo aumento de resíduos no sistema de diversidade muito alta, a atividade da urease foi maior nos sistemas de diversidade muito baixa (Tabela 5). Geralmente, a adição de fontes de C aumenta a demanda de N por microrganismos, e com isso aumenta a atividade da urease (Adetunji, 2017). No entanto, é possível que com o aumento de N microbiano (Figura 5B), tenha se aumentado o N mineralizado na forma de íons de amônio, ocasionando a repressão na síntese da urease em frações mais lábeis do solo pelo aumento de COT (Figura 3A), o que pode explicar a menor atividade dessa enzima presente nos sistemas com maior nível de diversidade funcional. Isso porque a síntese da urease pode ser inibida pela presença de amônio no solo, e aumentada com a presença de ureia e fontes alternativas de N, bem como carência de N (Mobley et al., 1995). Nesse contexto, as baixas entradas de C no sistema de

diversidade muito baixa podem ter ativado a enzima para degradar as entradas de C provenientes da cultura do algodão, assim como em função do adubo utilizado na cultura.

Da mesma forma, os sistemas de diversidade baixa e muito baixa apresentaram aumentos na atividade da fosfatase ácida (Tabela 5). Sabe-se que microrganismos e raízes de plantas secretam fosfatase diante a deficiência de P no solo (Adetunji et al., 2017). No entanto, as análises químicas demonstram teores de P considerados relativamente altos para solos arenosos (Tabela 3) (Cassol et al., 2020), nesse caso, o aumento da fosfatase ácida pode indicar a necessidade de microrganismos e plantas em intensificar a solubilização e remobilização do fosfato, por possivelmente não estarem em formas prontamente disponíveis (Richardson et al., 2002). O fósforo desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e crescimento de forrageiras e a limitação desse nutriente pode levar a capacidade produtiva de pastagens e culturas (Possamai et al., 2014). Já a FDA é um composto hidrolisado por enzimas, como as proteases, lipases e esterases (Balota et al., 2013), estando relacionadas a degradação de resíduos orgânicos e são, muitas vezes utilizadas para medir a atividade microbiana do solo. Dessa forma, é possível que a maior atividade enzimática da FDA nos sistemas de diversidade alta possa ter relação com a grande variedade de resíduos orgânicos depositados na superfície do solo, pois o maior acúmulo de matéria orgânica resulta em maior atividade microbiológica (Figura 6) (Silva et al., 2004). Assim, os resultados mostram que sistemas que utilizam diversidade de plantas com alta produção de biomassa podem promover atividade microbiana no solo e aumentar a produtividade do algodão (Figura 7) em solos arenosos (Cordeiro et al., 2021).

O  $qMIC$ , que reflete a qualidade da MOS, foi afetado positivamente pelos sistemas em que há maiores níveis de diversidade funcional (Tabela 4). O sistema de diversidade média de longa duração apresentou melhores condições para a biomassa microbiana em comparação com os outros sistemas. Acredita-se que as condições espaço-temporais condicionadas pelo maior tempo de permanência de culturas nesse sistema tenham promovido menores distúrbios no solo e possibilitado maior estabilidade para microbiota. Esses fatores, aliados a um  $qCO_2$  baixo, indicam que a comunidade microbiana está fazendo o uso mais eficiente de C e, dessa forma, produzindo maior biomassa, o que pode indicar um processo de restauração da comunidade microbiana (Hu et al., 2016).

Embora solos arenosos sejam muitas vezes considerados menos propícios para a agricultura devido a características de baixo potencial produtivo, o presente estudo mostra que a diversificação do sistema produtivo pode melhorar atributos de qualidade do solo e mediar altas produtividades da cultura do algodão, mesmo no curto prazo. Variáveis como o N-MOP, C-BMS, COT e  $\beta$ -glicosidase se correlacionaram com sistemas de diversidade média e diversidade alta, apoiando os resultados obtidos e demonstrando que a melhoria desses atributos pode ter promovido a qualidade do solo, assim como o aumento da produção de algodão em solo arenoso (Figura 8).

## 2.5 CONCLUSÕES

Níveis crescentes de diversidade funcional favorecem a melhoria de indicadores de qualidade do solo e, conseqüentemente, o aumento da produtividade de algodão semeado em período de safra em solos arenosos no curto prazo. Sistemas mais diversificados de produção podem ser considerados uma alternativa sustentável para a produção do algodão safra em solos arenosos.

## 2.6 REFERÊNCIAS

ADETUNJI, A. T.; LEWU, F. B.; MULIDZI, R.; NCUBE, B. The biological activities of  $\beta$ -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794–807, 2017.

ALEF, K. & NANNIPIERI, P. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. **London: Academic Press**, 1995.

ANCIRA-MORENO, M; SMITH, N; LAMADRID-FIGUEROA, H. Article in Press Article in Press. **Effect of grain boundaries on paraconductivity of YBCO**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2002.

ANDERSON, T.-H.; DOMSCH, K.H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology Biochemistry**, vol. 21, p. 471-479, 1989.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; VALADÃO, S. E.; COSTA, G. DE A. Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropico brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8, n. 2, p. 325–380, 2013.

BALOTA, E. L; NOGUEIRA, M.A.; MENDES, I.C. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8, n. June, p. 221–278, 2013.

BROOKES, P. C. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 17, 1985.

CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, n.3, pp.777-783, 1992.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; et al. Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of

use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, 2013.

CASSOL, CLEIDIMAR JOÃO; ARRUDA, E. J.; A. A. M. T. Phosphorus content available in soils of sandy texture Medium and clayey. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research** **266**, v. 1, n. 3, p. 168–178, 2018.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. v. 12 - Safra 2020/21, n.12 - Décimo segundo levantamento, setembro 2021.

CORDEIRO, C. F. DOS S.; RODRIGUES, D. R.; ROCHA, C. H.; ARAUJO, F. F.; ECHER, F. R. Glomalin and microbial activity affected by cover crops and nitrogen management in sandy soil with cotton cultivation. **Applied Soil Ecology**, v. 167, n. March, 2021.

DA GAMA-RODRIGUES, E. F.; DE BARROS, N. F.; DA GAMA-RODRIGUES, A. C.; DE ARAÚJO SANTOS, G. Carbon, nitrogen and activity of microbial biomass in soil under eucalypt plantations. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 29, n. 6, p. 893–901, 2005.

DE MORAES, A.; CARVALHO, P. C. DE F.; ANGHINONI, I.; et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4–9, 2014.

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**. Am. J.; 1996.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; et al. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 2, p. 240–249, 2009.

DIONIZIO, E. A.; PIMENTA, F. M.; LIMA, L. B.; COSTA, M. H. Carbon stocks and dynamics of different land uses on the Cerrado agricultural frontier. **PLoS ONE**, v. 15, n. 11 November, p. 1–22, 2020.

DONAGEMMA, G. K.; DE FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. DE C.; et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DOS SANTOS, A.; DA SILVA MATOS, E.; DA SILVA FREDDI, O.; GALBIERI, R.; LAL, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 118, n. April, p. 126090, 2020.

DOS SANTOS, A.; DA SILVA MATOS, E.; DA SILVA FREDDI, O.; GALBIERI, R.; LAL, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 118, n. April, p. 126090, 2020.

DUCHENE, O.; VIAN, J. F.; CELETTE, F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 148–161, 2017.

ECHER, F. R.; SALVADOR, J.; FOLONI, S.; CRESTE, J. E. Fontes de potássio na adubação de cobertura do algodoeiro I – Potassium sources in covering fertilization on cotton I – **Yield, fiber quality and economic analysis**. p. 1135–1144, 2008.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology Biochemistry**, v.20, p. 601-60, 1988.

FUHRMAN, J. A. Microbial community structure and its functional implications. **Nature**, v. 459, n. 7244, p. 193–199, 2009.

HATCH, D. J.; LOVELL, R. D.; ANTIL, R. S.; JARVIS, S. C.; OWEN, P. M. Nitrogen mineralization and microbial activity in permanent pastures amended with nitrogen fertilizer or dung. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, n. 4, p. 288–293, 2000.

HOFFMANN, L. V.; KRESIC, I. B.; PAZ, J. G.; et al. Cotton Production in Brazil and Other South American Countries. **Cotton Production**, v. 2003, n. Paytas 2010, p. 277–295, 2019.

HORWATH, W. R. **Carbon cycling and formation of soil organic matter**. Third Edit ed. Elsevier Inc., 2008.

HU, N.; LI, H.; TANG, Z.; et al. Community size, activity and C: N stoichiometry of soil microorganisms following reforestation in a Karst region. **European Journal of Soil Biology**, v. 73, p. 77–83, 2016.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, n. September 2019, p. 103295, 2020.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 8, 1976.

KURMANGOZHINOV, A.; XUE, W.; LI, X.; et al. High biomass production with abundant leaf litterfall is critical to ameliorating soil quality and productivity in reclaimed sandy desertification land. **Journal of Environmental Management**, v. 263, n. January, p. 110373, 2020.

LIU, K.; BANDARA, M.; HAMEL, C.; KNIGHT, J. D.; GAN, Y. Intensifying crop rotations with pulse crops enhances system productivity and soil organic carbon in semi-arid environments. **Field Crops Research**, v. 248, n. November 2019, p. 107657, 2020.

MAUGET, S. A.; HIMANSHU, S. K.; GOEBEL, T. S.; et al. Soil and soil organic carbon effects on simulated Southern High Plains dryland Cotton production. **Soil and Tillage Research**, v. 212, n. February, p. 105040, 2021.

MOBLEY, H.L.T.; ISLAND, M.D.; HAUSINGER, R.P. Molecular biology of microbial ureases. **Microbiol. Rev.**, 59, p.31, 1995.

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C.; et al. Changes in soil water storage with no-tillage and crop residue retention on a Vertisol: Impact on productivity and profitability over a 50 year period. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. June, p. 104319, 2019.

PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo cultivado com soja, sob diferentes sistemas de manejo, nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 2, p. 137–144, 2005.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; et al. No-tillage and crop-livestock with silage production impact little on carbon and nitrogen in the short-term in a subtropical ferralsol. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p. 1–7, 2020.

PROMMER, J.; WALKER, T. W. N.; WANEK, W.; et al. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 669–681, 2020.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RENARD, D.; TILMAN, D. National food production stabilized by crop diversity. **Nature**, v. 571, n. 7764, p. 257–260, 2019.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. DE A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. 2002.

SANTOS, A.; DA SILVA MATOS, E.; DA SILVA FREDDI, O.; GALBIERI, R.; LAL, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 118, n. April, p. 126090, 2020.

SAUVADET, M.; TRAP, J.; DAMOUR, G.; et al. Agroecosystem diversification with legumes or non-legumes improves differently soil fertility according to soil type. **Science of the Total Environment**, v. 795, n. June, 2021.

SEKARAN, U.; KUMAR, S.; LUIS GONZALEZ-HERNANDEZ, J. Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. **Geoderma**, v. 381, n. May 2020, p. 114686, 2021.

SILVA, J. M. DA; ALBUQUERQUE, L. S. DE; SANTOS, T. M. C. DOS; GUEDES, E. L. F.; OLIVEIRA, J. U. L. DE. Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 4, p. 132–135, 2013.

SILVA, L. S.; LAROCA, J. V. DOS S.; COELHO, A. P.; et al. Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? **Applied Soil Ecology**, v. 170, n. October 2021, 2022.

SILVA, M.; SIQUEIRA, E. R.; COSTA, J. L. DA S. Hidrólise de diacetato de fluoresceína como bioindicador da atividade microbológica de um solo submetido a reflorestamento. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1493–1496, 2004.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization of organic matter by soil minerals: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002.

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

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 cells. **Soil Biology Biochemistry**. v. 20, p. 337-343, 1988.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J.M. Assay of urease activity in soil. **Soil Biology Biochemistry**, v. 4, p. 479-487, Nov. 1972.

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; FELTHAM, C. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. **Soil Biology Biochemistry**, v. 20, p. 329-335, 1988.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia /Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ed.2, p.174, 1995.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p.703-707, 1987.

YOST, J. L.; HARTEMINK, A. E. Soil organic carbon in sandy soils: A review. 1o ed. Elsevier Inc., 2019.

## **3 CAPÍTULO 2 – DIVERSIDADE DE FUNGOS E BACTÉRIAS EM DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO SOB SOLO ARENOSO NO CURTO PRAZO**

### **3.1 1 INTRODUÇÃO**

Os microrganismos são vitais para o funcionamento de todos os ecossistemas terrestres (Fuhman, 2009). No solo, a microbiota desempenha funções chave como transformação da matéria orgânica, sequestro de carbono, ciclagem biogeoquímica, fixação biológica de nitrogênio, estruturação do solo, dentre outros (Xião et al., 2015; Schlatter et al., 2022). Já em agroecossistemas, microrganismos são excelentes bioindicadores de mudanças ambientais e contribuem para a manutenção e melhoria da qualidade do solo e produtividade de culturas (Schlatter et al., 2022). Entretanto, a microbiota do solo pode ser afetada por fatores como pH, manejo agrícola, temperatura e matéria orgânica (Kim et al., 2021), mas a textura do solo tem impacto significativo na comunidade microbiana (Seaton et al., 2020). Sabe-se que comunidades fúngicas são influenciadas principalmente pela composição da diversidade vegetal (Chen et al., 2017), enquanto bactérias podem ter preferências específicas por frações de tamanho de partícula (Hemkemeyer et al., 2018).

Nesse contexto, solos arenosos são conhecidos por sua fragilidade devido a características como a baixa capacidade de troca catiônica, de retenção de água, nutrientes e baixos teores de matéria orgânica (Donagemma et al., 2016). Além disso, possuem menores teores de argila, o que pode tornar esses solos limitados ao cultivo agrícola (Huang e Hartemink, 2020). No entanto, práticas agrícolas que favorece maior entrada de matéria orgânica são alternativas para o cultivo nesses solos (Donagemma et al., 2016). Dessa forma, a adoção de sistemas de manejos que favoreçam os processos biológicos é extremamente importante, a fim de manter o funcionamento do ecossistema e promover melhorias na qualidade de solos arenosos (Liu et al., 2020) e na produtividade de culturas agrícolas (Van Der Heijden et al., 2008). Neste sentido, a diversificação do sistema produtivo pode promover maior complexidade trófica, resiliência e qualidade ambiental, através da inserção de diversidade funcional com impactos positivos na produção agrícola e pecuária (Moraes et al., 2018).

Assim, acredita-se que a inserção de diferentes níveis de diversidade funcional nos sistemas de produção pode auxiliar no aumento da diversidade

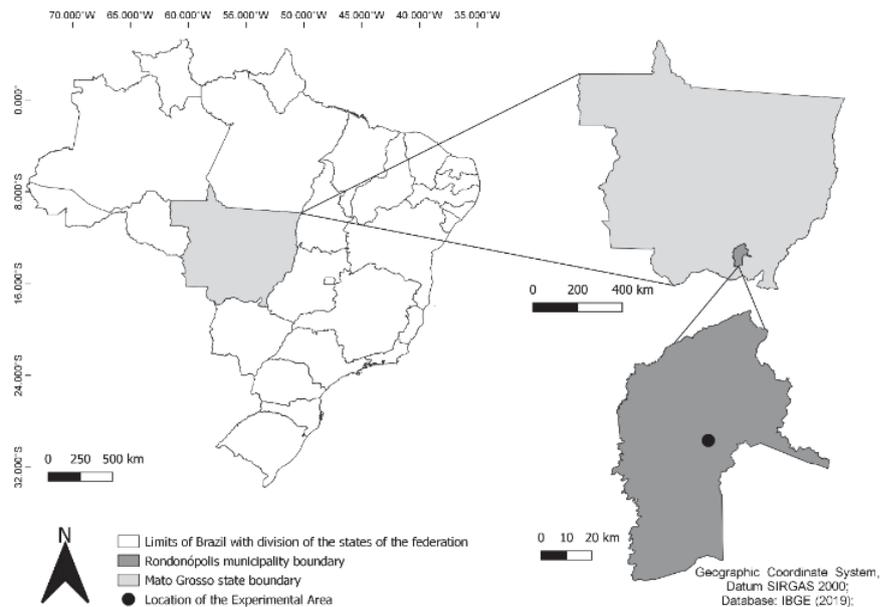
microbiana em solos arenosos. No entanto, estudos que investigam os efeitos da diversificação do sistema produtivo sob a comunidade microbiana de solos arenosos ainda são escassos. A melhor forma de se conhecer a biodiversidade e o funcionamento da comunidade microbiana é por meio de tecnologias de sequenciamento de alto rendimento, ou análise metagenômica, que permitem o estudo da estrutura e dinâmica do ecossistema microbiano com grande profundidade e precisão (Faust e Raes, 2012) de forma limpa, rápida e eficiente (Sharpton, 2014).

Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de sistemas de manejo conservacionista com diferentes níveis de diversidade funcional na estrutura e na diversidade de comunidades microbianas de fungos e bactérias em solo arenoso do Cerrado brasileiro no curto prazo.

### 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em novembro de 2017 em área experimental do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), Rondonópolis/MT (16°33'22.13"S e 54°38'7.77"W e altitude de 312 metros). O solo é classificado como um Neossolo Quartzarênico de textura arenosa (823 g kg<sup>-1</sup> de areia, 32 g kg<sup>-1</sup> de silte e 145 g kg<sup>-1</sup> de argila). O clima da região é classificado como Aw segundo Köppen, com período chuvoso entre os meses de outubro a abril e seco entre maio e setembro, com precipitação média anual de 1500 mm. No período de outubro de 2017 a maio de 2020, a precipitação acumulada registrada no município foi de 3800 mm e a temperatura média mensal foi de 25,3°C.

Figura 9 – Localização da área experimental no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.



A área de estudo era utilizada com pastagem extensiva até outubro de 2014 quando se iniciou a sucessão de Soja (*Glycine max*), de outubro a fevereiro, e pastagem (*Urochloa ruziziensis*) como cobertura, de março a setembro. Esse manejo ocorreu até o início do experimento, quando o solo apresentava os atributos apresentados na Tabela 1, seguido da correção com 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 10 Mg ha<sup>-1</sup> de pó de rocha.

Tabela 6 – Atributos químicos em julho de 2017 de um Neossolo Quartzarênico no Instituto Mato-grossense do Algodão em Rondonópolis, Mato Grosso.

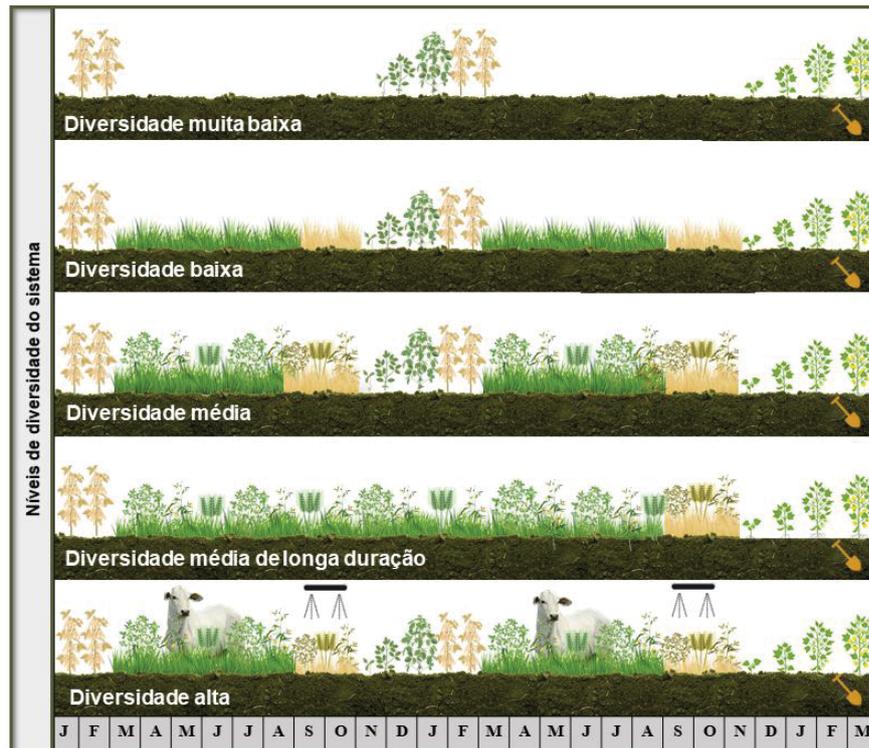
Camada	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V
	(CaCl)	g/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>				-----cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> -----			%
0,0-0,2 m	5,5	26,3	54,1	64,6	2,6	1,0	0,0	2,6	6,4	58,7
0,2-0,4 m	5,3	18,7	33,6	50,9	1,8	0,6	0,0	2,5	5,1	51,1

A área total do experimento consiste em 6,25 hectares, divididos em 15 parcelas experimentais para a distribuição dos 5 tratamentos, dispostos em um delineamento de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos são determinados por combinações de sistemas de manejo com diferentes níveis de diversidade funcional, e estão descritos na tabela 2.

Tabela 7 - Sistemas de produção implantados na área experimental do Instituto mato-grossense do Algodão em Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

Nível de diversidade do sistema	Sistema de produção
Diversidade muito baixa	Soja na safra com pousio na entressafra
Diversidade baixa	Soja na safra e entressafra de <i>Urochloa ruziziensis</i> cultivada solteira por 8 meses
Diversidade média	Soja na safra e entressafra de <i>U. ruziziensis</i> , niger, nabo forrageiro e feijão caupí e trigo mourisco por 8 meses
Diversidade média de longa duração	Soja na safra e entressafra <i>U. ruziziensis</i> , niger, nabo forrageiro e feijão caupí e trigo mourisco por 20 meses
Diversidade alta (SIPA)	Soja na safra e entressafra <i>U. ruziziensis</i> , niger, nabo forrageiro, feijão caupí, trigo mourisco e entrada de animais para pastejo

Figura 10 - Esquema dos tratamentos com sistemas com níveis crescentes de diversidade vegetal em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado



Os consórcios foram implantados com semeadora de fluxo contínuo, sem adubação de base e cobertura. As sementes foram previamente misturadas conforme quantidades estipuladas para cada consórcio (12 kg ha<sup>-1</sup> de *U. ruziziensis*, 3 kg ha<sup>-1</sup> de niger e nabo forrageiro, 6 kg ha<sup>-1</sup> de trigo mourisco e 2 kg ha<sup>-1</sup> de feijão-caupí).

No sistema de diversidade alta foram alocadas em cada parcela cinco novilhas mestiças de cruza das raças Nelore com Holandês, com peso vivo médio de 196,4 kg, totalizando em média 1,66 UA/ha. Os animais entraram na área quando o pasto atingiu uma altura média de 50 cm, com método de pastoreio com lotação contínua. Após a saída dos animais, o pasto foi dessecado em dezembro de 2019.

Na safra de 2019/2020, o algodão foi cultivado como rotação da soja, no mês de dezembro, com a cultivar IMA 5001, semeado com espaçamento entre linhas de 90 cm e 10 plantas m<sup>-1</sup>. A adubação de base utilizada foi 250 kg ha<sup>-1</sup> de Monoamôniofosfato (MAP). Foram aplicados em cobertura 200 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, 10 dias após a semeadura, e duas aplicações de 180 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de ureia, 5 e 32 dias após a semeadura, respectivamente.

As amostras de solo foram coletadas em março de 2020, período de florescimento da cultura do algodão, nas profundidades de 0-10cm em solo rente a raiz das plantas, em três pontos distintos para formar uma amostra composta.

Posteriormente, o solo foi misturado e as amostras foram identificadas e imediatamente armazenadas sob refrigeração em laboratório até as análises.

O DNA foi extraído de 4 g de solo utilizando um kit Powersoil DNA (MoBio Laboratories QIAGEN, CA, EUA) de acordo com os protocolos da fabricante. A diluição do produto final foi em 100 µl de DNA e visualizado com gel agarose 1%. Posteriormente, o DNA extraído das amostras foi submetido à amplificação de fragmentos das regiões V3 e V4 do gene 16S rRNA com pares de primers (341F e 785R) como proposto por Klindworth et al. (2013). Para a amostra de fungos, foram utilizados primers de fungo ITS (ITS1F e ITS2R) de acordo com o proposto por Gardes e Bruns (1993) e Smith e Peay (2014). A amplificação dos genes 16S rRNA e ITS foram sequenciados pela plataforma Illumina Sequencing Trunc e as leituras filtradas utilizando o algoritmo DADA2 (Divisive Amplicon Denoising Algorithm). As sequências foram agrupadas em unidades taxonômicas operacionais (OTU's) e a atribuição taxonômica das OTU's foi comparada com o banco de dados de Silva (Quast et al., 2013) para o gene 16S rRNA e para ITS foi UNITE (2020).

A riqueza e a diversidade de bactérias e fungos foi calculada com teste t com os índices de Chao1 e Shannon-H. Para avaliar a estrutura das comunidades microbianas, foi realizada uma análise de coordenadas principais (PCoA) com índice de similaridade de Bray-Curtis utilizando o software PAST 3 e comparados através de uma análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA). Para investigar potenciais interações entre táxons microbianos, a análise de rede de co-ocorrência de táxons significativos foi utilizada para avaliar as interações de comunidades microbianas complexas calculados com Sparse Correlations for Compositional data (SparCC) (Friedman e Alm, 2012) a nível de gênero de bactéria e fungos. As correlações foram realizadas considerando uma magnitude de  $p > 0,6$  ou  $p < -0,6$  para as relações e filtradas com significância de  $p < 0,01$ .

### 3.3 RESULTADOS

Foram obtidas um total de 67.677 sequencias de alta qualidade de 15 amostras para do gene 16S rRNA, gerando OTU's que variaram entre 4.036 e 5.249 leituras por amostra. Enquanto para o gene ITS o total de sequenciamento de alta qualidade foi de 189.71, com OTU's de 7.890 a 18.440 por amostra.

A riqueza e a diversidade de bactérias do gene 16S rRNA, representados pelos índices de Chao e Shannon, não foram influenciados pelos diferentes níveis de diversidade funcional em solo arenoso no curto prazo (Tabela 7).

Tabela 8 – Índices de riqueza e diversidade de microrganismos do sequenciamento do gene 16S rRNA (bactérias) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

<b>Diversidade do sistema</b>	<b>Chao1</b>	<b>Shannon-H</b>
Muito baixa	188,47 a	4,90 a
Baixa	186,20 a	4,91 a
Média	187,60 a	4,90 a
Média de longa duração	218,33 a	5,08 a
Alta	188,43 a	4,93 a
<b>p value</b>	<b>0.3480</b>	<b>0.4299</b>

Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ). Chao1: estimador do número de espécies (riqueza); Shannon-H: estimador do número efetivo de espécies (diversidade).

O índice de Chao variou de 186,20 no sistema de diversidade baixa para 218,33 no sistema de diversidade alta, enquanto o índice de Shannon foi de 4,90 para os sistemas de diversidade muito baixa e diversidade média, para 5,08 para o sistema de diversidade alta (Tabela 7).

Seguindo a mesma tendência do gene 16S rRNA, não houve diferenças dos parâmetros riqueza e diversidade de comunidades fúngicas nos diferentes sistemas de produção avaliados (Tabela 8). Os índices variam de 96 para o sistema de diversidade muito baixa até 110 para o sistema de diversidade média.

Tabela 9 – Riqueza e diversidade de microrganismos do sequenciamento do gene ITS (fungos) na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

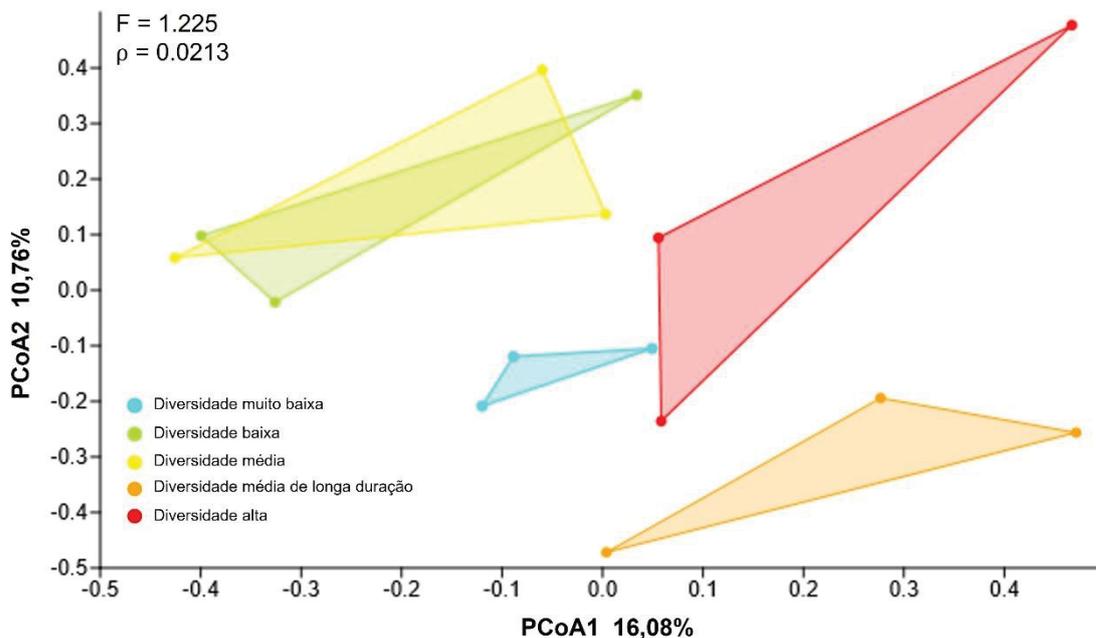
<b>Diversidade do sistema</b>	<b>Chao1</b>	<b>Shannon-H</b>
Muito baixa	96,00 a	3,14 a
Baixa	97,00 a	3,29 a

Média	110,00	a	3,45	a
Média de longa duração	101,33	a	3,46	a
Alta	108,67	a	3,19	a
<b>p value</b>	<b>0.8879</b>		<b>0.7948</b>	

Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna indicam diferença pelo teste de Tukey ( $P < 0.05$ ). Chao1: estimador do número de espécies (riqueza); Shannon-H: estimador do número efetivo de espécies (diversidade).

Os testes de PERMANOVA com a matriz de Bray-Curtis revelou a existência de diferenças estruturais ( $F=1.225$ ,  $p= 0.0213$ ) nas comunidades do gene 16S rRNA, como verificado no gráfico de análise de coordenadas principais (PCoA) (Figura 11). Os dois eixos de PCoA explicaram uma variação de 18,99% para a PCoA1 e de 14,69% para a PCoA2.

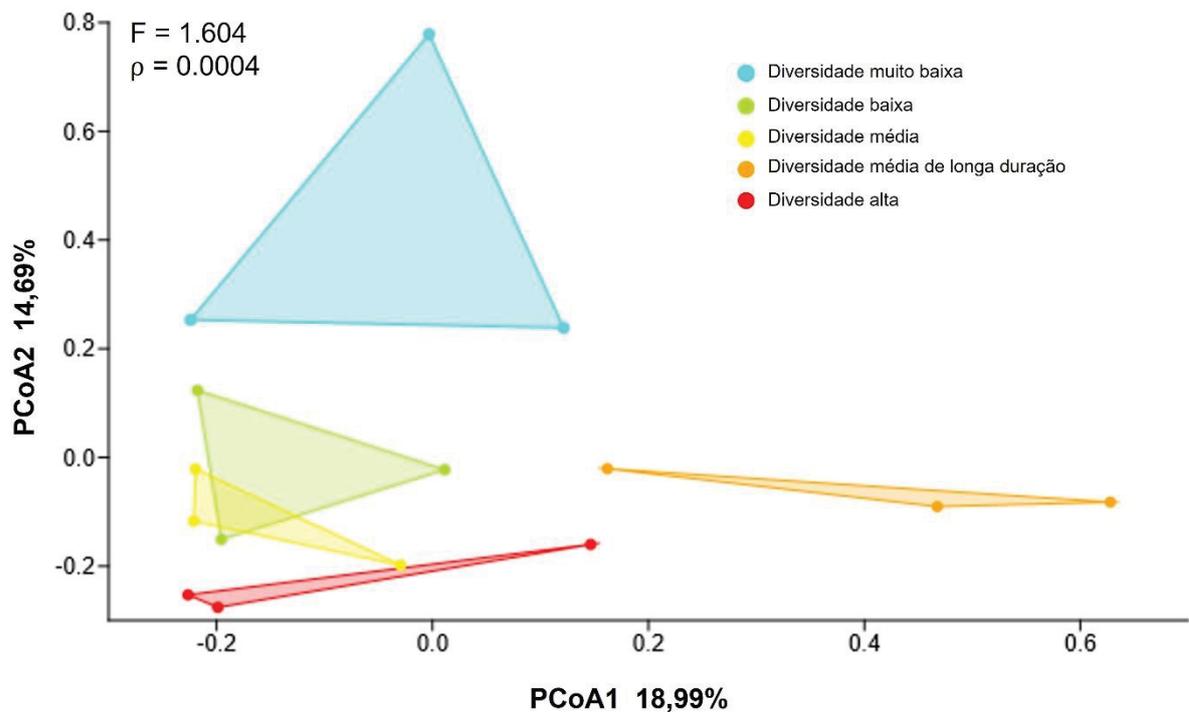
Figura 11 – Análise de coordenadas principais da estrutura da comunidade microbiana do gene 16S rRNA na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



De modo geral, observa-se uma separação entre as estruturas das comunidades bacterianas em cada sistema avaliado, exceto pelo sistema de diversidade baixa e diversidade média, no qual existe uma sobreposição (Figura 11). No sistema de diversidade alta, a comunidade bacteriana foi a que obteve maior diferença na estrutura das comunidades microbianas, e menor no sistema de diversidade muito baixa (Figura 11).

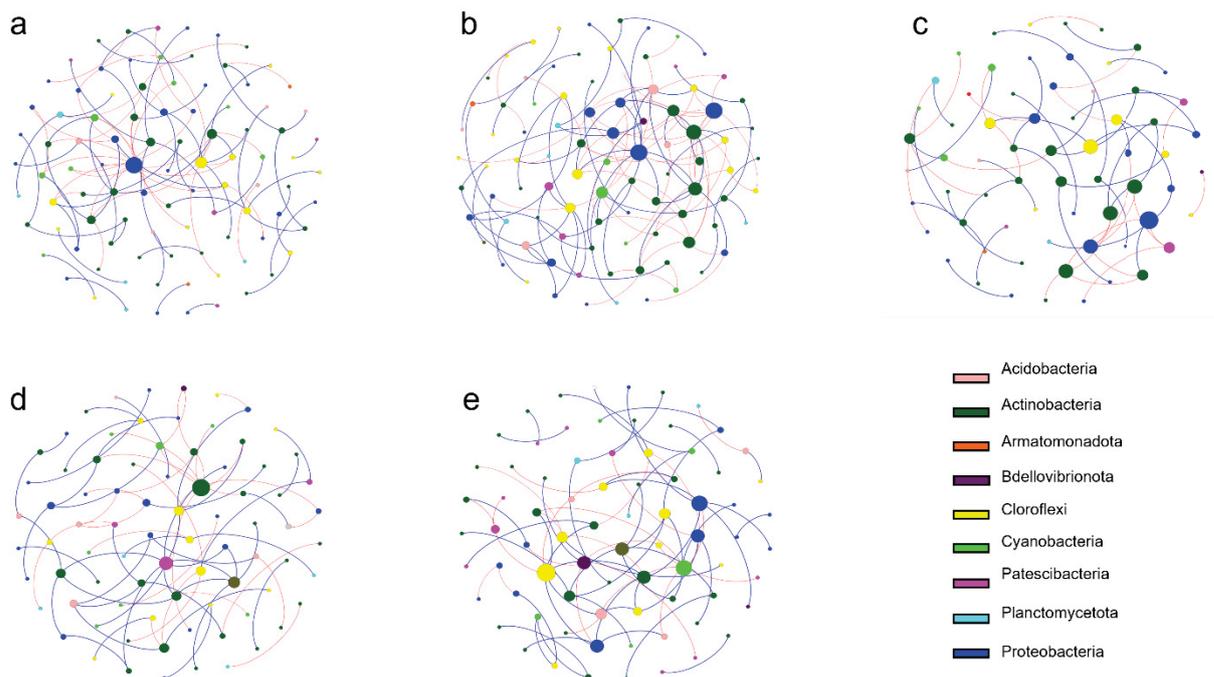
A análise de coordenadas principais da comunidade fúngica também apresentou separação da estrutura microbiana ( $F=1.604$ ,  $p=0.0004$ ) (Figura 12). Entretanto, diferentemente da comunidade bacteriana, a comunidade fúngica foi mais ampla no sistema de diversidade muito baixa. Os sistemas com diversidade baixa e média apresentaram semelhanças na sua estrutura de fungos, com menor variação nos sistemas de diversidade média de longa duração e diversidade alta (Figura 12).

Figura 12 – Análise de coordenadas principais da estrutura da comunidade microbiana do gene ITS na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



Um total de 408 nós e 419 arestas foi identificado pela rede de co-ocorrência de gêneros para o gene 16S em todos os sistemas avaliados (Tabela 9). O número de nós para o sistema de diversidade baixa foi superior em 44%, 19% e 25% em comparação aos sistemas de diversidade média, média de longa duração e diversidade alta (Tabela 9).

Figura 13 – Rede de co-ocorrência no nível de gênero de bactéria calculado com SparCC na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.



**a:** diversidade muito baixa; **b:** diversidade baixa; **c:** diversidade média; **d:** diversidade média de longa duração e **e:** diversidade alta. Linha azul entre os nós indica correlação positiva e linha vermelha indica correlação negativa (magnitude  $p > 0.6$  ou  $p < -0.6$  e significância  $p < 0.01$ ).

Com relação ao número de nós, o sistema de diversidade média promoveu maior densidade de interações na rede entre os sistemas avaliados, enquanto a menor densidade foi observada no sistema de diversidade média, com valores intermediários entre sistemas com diversidade muito baixa, alta e média de longa duração (Tabela 9). Além disso, a média de conectividade também foi maior no sistema de diversidade baixa, apresentando um valor de 2,549.

O sistema de diversidade alta apresentou o menor número de módulos, com um total de 30, em comparação com os demais sistemas de produção (Tabela 9).

Tabela 10 – Propriedades da rede de co-ocorrência nível gênero para 16S rRNA na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

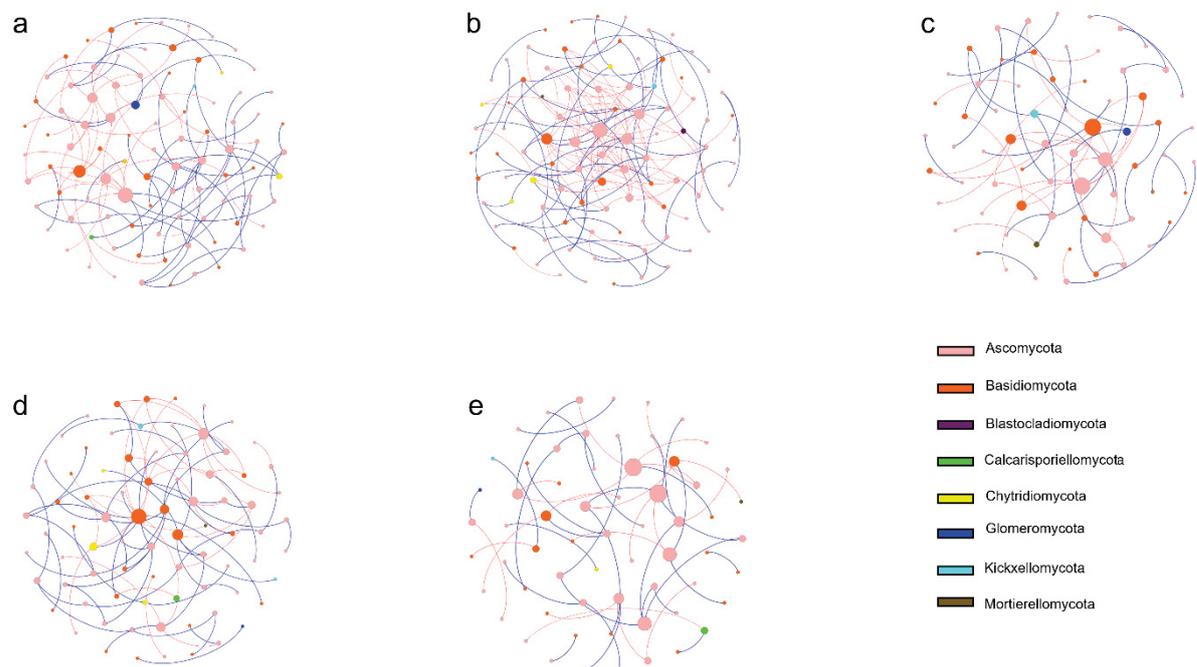
Bactérias	Muito baixa	Baixa	Média	Longa duração	Alta
Nós	95	91	66	80	76
Arestas	93	116	59	74	77
Correlações positivas	56 (60%)	64 (56%)	36 (62%)	45 (61%)	51 (67%)
Correlações negativas	37 (40%)	52 (44%)	23 (38%)	29 (39%)	26 (33%)
Relação P:N	1,51	1,23	1,56	1,55	1,96

Grau médio	1,958	2,549	1,788	1,85	2,026
Cfc. de agrupamento	0,054	0,083	0,148	0,084	0,054
Modularidade	2,056	1,957	1,768	1,437	1,401
Número de módulos	40	40	32	40	30
Comprimento do caminho	4,671	4,789	3,071	3,429	3,44
Diâmetro	13	13	8	8	8

Calculado com SparCC, de interações com magnitude  $p > 0.6$  e significância ( $p < 0.01$ ).

A rede de co-ocorrência do gênero de fungos obteve o maior número de nós no sistema de diversidade baixa, seguido do sistema de diversidade muito baixa e diversidade média de longa duração, com 92 e 80 nós, respectivamente (Tabela 10). A média de conectividade foi maior também no sistema de diversidade baixa, enquanto o número de módulos foi maior no sistema de diversidade muito baixa.

Figura 14 – Rede de co-ocorrência no nível de gênero de fungos calculado com SparCC na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado



**a:** diversidade muito baixa; **b:** diversidade baixa; **c:** diversidade média; **d:** diversidade média de longa duração e **e:** diversidade alta. Linha azul entre os nós indica correlação positiva e linha vermelha indica correlação negativa (magnitude  $p > 0.6$  ou  $p < -0.6$  e significância  $p < 0.01$ ).

Tabela 11 – Rede de co-ocorrência nível gênero para ITS na camada de 0–10 cm, em sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional em um Neossolo Quartzarênico no Cerrado.

Fungos	Muito baixa	Baixa	Média	Longa duração	Alta
Nós	92	98	68	80	63
Arestas	108	149	64	86	51
Correlações positivas	58 (53%)	74 (49%)	35 (54%)	56 (65%)	31 (60%)
Correlações negativas	50 (47%)	75 (51%)	29 (45%)	30 (34%)	20 (39%)
Relação P:N	1.16	0.98	1.20	1.86	1.55
Grau médio	2,348	3,041	1,882	2,15	1,619
Cfc. de agrupamento	0,014	0,087	0,037	0,164	0,062
Modularidade	2,548	11,622	3,076	1,509	1,897
Número de módulos	41	21	36	30	33
Comprimento do caminho	4,773	4,203	5,656	5,613	3,008
Diâmetro	12	9	17	14	7

Calculado com SparCC, de interações com magnitude  $p > 0.6$  e significância ( $p < 0.01$ ).

### 3.4 DISCUSSÃO

A microbiota no solo é extremamente responsiva ao aporte de resíduos vegetais e materiais orgânicos (Zhang et al., 2012) e sistemas de produção contendo maior diversidade de espécies vegetais têm sido reconhecidos por melhorar a manutenção das comunidades microbianas (Chen et al., 2017). No entanto, para o presente estudo, os índices de riqueza e diversidade de fungos e bactérias em solo arenoso não foi influenciado pelo aumento de diversidade funcional nos sistemas avaliados (Tabela 7 e 8).

Por outro lado, a PCoA mostrou que há uma diferença clara na estrutura e composição de comunidades microbianas em solos de diferentes sistemas de produção (Figuras 11 e 12). De modo geral, os sistemas de produção moldaram as comunidades microbianas existentes, pois solos de sistemas em com inserção de uma ou mais espécies vegetais tem composição e estruturas diferentes em comparação ao sistema de diversidade muito baixa (Figuras 11). De acordo com Duchene et al. (2017), a diversidade funcional em sistemas de produção garante propriedades químicas e metabólicas diferentes, o que pode ocasionar um diferencial na composição e estrutura de comunidades microbianas. Além disso, a matéria orgânica do solo é fonte fundamental de substrato para crescimento, desenvolvimento e manutenção da vida microbiana, já que microrganismos utilizam resíduos orgânicos como fonte de energia (Birge, 2013). A ausência de cobertura vegetal no solo leva a maior degradação da matéria orgânica, e como consequência, uma comunidade menor e menos diversificada (Moreira e Siqueira, 2006) além de aumentar temperatura do solo, que pode afetar a atividade de microrganismos (Farhangi-Abriz et al., 2021). Dessa forma, possivelmente o aporte anual de resíduos somente de uma cultura agrícola explica a diferença na estrutura das comunidades bacterianas do solo com diversidade baixa para solos dos demais sistemas de produção (Tabelas 11). Para a comunidade fúngica, o aumento da diversidade de espécies vegetais resulta em maior riqueza de espécies fúngicas no solo (Chen et al., 2017). Entretanto, a PCoA indicou uma comunidade mais distinta em solos de sistemas com diversidade baixa, mas sem diferenças para a riqueza de espécies entre os solos dos sistemas de produção avaliados (Tabela 8).

No entanto, análises simples de índices de diversidade e estrutura microbiana não fornecem informações mais detalhadas sobre as interações de comunidades

microbianas em comparação com análises de rede de co-ocorrência (Ziegler et al., 2018). Dessa forma, ao acessar as interações a nível de gênero para bactérias, solos de sistemas com diversidade muito baixa e diversidade baixa tiveram maior número de táxons ativos e arestas com correlações significativas. Por outro lado, solos de sistemas em que há a inserção de diversidade apresentaram comunidades altamente conectadas (grau médio, coeficiente de agrupamento e comprimento médio do caminho), principalmente quando há a diversidade alta. Além disso, as interações foram mais positivas entre os táxons no solo de cada sistema quando a diversidade era alta e média, e mais negativas quando a diversidade foi baixa e muito baixa. Geralmente, maiores correlações negativas podem sugerir competição ou diferenciação de nicho em comunidades microbianas, e maiores proporções de correlações positivas sugerem que há a maior cooperação ou compartilhamento de nicho no solo (Ma et al., 2020). Isso pode indicar que solos de sistemas em que há maior diversidade funcional, como é o caso dos sistemas de diversidade alta e diversidade média, podem contribuir para uma comunidade de bactérias desempenhando funções semelhantes ou complementares, e assim permitir solos com maior qualidade (Jiang et al., 2015; Karimi et al., 2017)

Outro fator a ser observado é a modularidade, que, de acordo com Newman (2006) está relacionada com o compartilhamento de nichos. Para Faust e Raes (2012), quanto menor a modularidade, menos essa comunidade divide recursos nutricionais ou preferências ambientais. Nesse contexto, a menor modularidade obtida para bactérias nos sistemas de diversidade média pode ser explicada pelo mix de culturas e a entrada de animais nesses sistemas. A diversificação desses sistemas produtivos pode ter possibilitado diferentes fontes de resíduos orgânicos, o que pode levar os microrganismos a competirem menos por recursos e, como consequência, promover uma comunidade mais estável nos presentes sistemas de produção (Wang et al., 2016). Além disso, o maior número de módulos associados a alta proporção de correlações negativas em sistemas com menor diversidade funcional demonstra competição por recursos (Banerjee et al., 2016).

Neste mesmo contexto, analisando a rede de co-ocorrência da comunidade fúngica, esperava-se que a análise mostrasse índices maiores nos sistemas com inserção de diversidade funcional, entretanto esses sistemas obtiveram os menores valores de modularidade em comparação aos demais sistemas (Tabela 10). Assim, o sistema de diversidade baixa apresentou modularidade elevada e número maior de

interações negativas. De acordo com Xue et al. (2022), relações negativas podem ser atribuídas a interações inibitórias ou antagônicas, como antibiose ou competição por recursos. Dessa forma, menor entrada de resíduos orgânicos em sistemas com baixa diversidade funcional possivelmente promove uma comunidade desestruturada e competitiva e, conseqüentemente, um ecossistema com mais distúrbios ambientais (de Vries et al., 2018).

Em síntese, embora o curto prazo não tenha alterado a riqueza e a diversidade de microrganismos com a inserção de níveis de diversidade funcional nos sistemas de produção, a estrutura da comunidade bacteriana foi diferenciada dos sistemas com menor diversidade funcional. Analisando as relações entre os táxons presentes nas comunidades também foram influenciadas pelos sistemas de produção, indicando um maior equilíbrio nos sistemas em que há maior diversidade. No entanto, deve-se levar em consideração que a comunidade microbiana encontrada no presente estudo corresponde a menor fração do gene 16S rRNA e ITS e pode ocorrer que os primers utilizados em PCR não amplifiquem todos os membros bacterianos e fúngicos de uma comunidade. Desta forma, qualquer abordagem baseada em PCR provavelmente perderá alguns grupos microbianos ou pelo menos subestimar a abundância de alguns táxons, assim como as bibliotecas de clones utilizadas para comparação (Suleiman et al., 2013).

### 3.5 CONCLUSÃO

Sistemas contendo diferentes níveis de diversidade de espécies não alteram a riqueza e diversidade microbiana em solos arenosos no curto prazo. No entanto, sistemas contendo maior grau de diversidade funcional, tanto de espécies animais quanto vegetais, melhoram a estrutura e a complexidade de comunidades fúngicas e bacterianas em solos arenosos no curto prazo.

### 3.6 REFERÊNCIAS

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; SILVEIRA, A. L. R.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADAR, B. E. Biological Soil Properties in Integrated Crop-Livestock-Forest Systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-12, 2017.

BANERJEE, S.; WALDER, F.; BÜCHI, L.; et al. Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. **ISME Journal**, v. 13, n. 7, p. 1722–1736, 2019.

CHEN, Y. L. et al. Plant diversity represents the prevalent determinant of soil fungal community structure across temperate grasslands in northern China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 110, p. 12–21, 2017.

DE VRIES, F. T. et al. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, 2018.

DONAGEMMA, G.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A. SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M. ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.51, n.9, pp.1003-1020, 2016.

DUCHENE, O.; VIAN, J. F.; CELETTE, F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 148–161, 2017.

DUCHICELA, J. et al. Soil aggregate stability increase is strongly related to fungal community succession along an abandoned agricultural field chronosequence in the Bolivian Altiplano. **Journal of Applied Ecology**, v. 50, n. 5, p. 1266–1273, 2013.

FARHANGI-ABRIZ, S.; GHASSEMI-GOLEZANI, K.; TORABIAN, S. A short-term study of soil microbial activities and soybean productivity under tillage systems with low soil organic matter. **Applied Soil Ecology**, v. 168, n. May, p. 104122, 2021.

FAUST, K.; RAES, J. Microbial interactions: From networks to models. **Nature Reviews Microbiology**, v. 10, n. 8, p. 538–550, 2012.

FRIEDMAN, J.; ALM, E. J. Inferring Correlation Networks from Genomic Survey Data. **PLoS Computational Biology**, v. 8, n. 9, p. 1–11, 2012.

FUHRMAN, J. A. Microbial community structure and its functional implications. **Nature**, v. 459, n. 7244, p. 193–199, 2009.

GARDES, M.; BRUNS, T. D. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes - application to the identification of mycorrhizae and rusts. **Molecular Ecology**, v. 2, n. 2, p. 113–118, 1993.

HEMKEMEYER, M.; DOHRMANN, A. B.; CHRISTENSEN, B. T.; TEBBE, C. C. Bacterial preferences for specific soil particle size fractions revealed by community analyses. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. FEB, p. 1–13, 2018.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, n. June, p. 103295, 2020.

JIANG, Y.; SUN, B.; LI, H.; et al. Aggregate-related changes in network patterns of nematodes and ammonia oxidizers in an acidic soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 88, p. 101–109, 2015.

KARIMI, B. et al. Microbial diversity and ecological networks as indicators of environmental quality. **Environmental Chemistry Letters**, v. 15, n. 2, p. 265–281, 2017.

KIM, H. S.; LEE, S. H.; JO, H. Y.; FINNERAN, K. T.; KWON, M. J. Diversity and composition of soil Acidobacteria and Proteobacteria communities as a bacterial

indicator of past land-use change from forest to farmland. **Science of the Total Environment**, v. 797, p. 148944, 2021.

KLINDWORTH, A.; PRUESSE, E.; SCHWEER, T.; et al. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. **Nucleic Acids Research**, v. 41, n. 1, p. 1–11, 2013.

LIU, K.; BANDARA, M.; HAMEL, C.; KNIGHT, J. D.; GAN, Y. Intensifying crop rotations with pulse crops enhances system productivity and soil organic carbon in semi-arid environments. **Field Crops Research**, v. 248, n. June 2019, p. 107657, 2020.

MA, B.; WANG, Y.; YE, S.; et al. Earth microbial co-occurrence network reveals interconnection pattern across microbiomes. **Microbiome**, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2020.

MORAES, A., CARVALHO, P. C. F., PELISSARI, A., ANGHINONI, I., LUSTOSA, S.B.C., Lang, C.R., Nunes, P. A. A. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e históricos. In: SOUZA, E.D., SILVA, F.D., T.S ASSMANN, T. S., CARNEIRO, M.A.C., CARVALHO, P.C.F., & PAULINO, H.B. Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. pp. 13-28. Tubarão: Copiart, 2018.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras: UFLA, 2006.

NÜSSLEIN, K.; TIEDJE, J. M. Soil bacterial community shift correlated with change from forest to pasture vegetation in a tropical soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 65, n. 8, p. 3622–3626, 1999.

QUAST, C.; PRUESSE, E.; YILMAZ, P.; et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: Improved data processing and web-based tools. **Nucleic Acids Research**, v. 41, n. D1, p. 590–596, 2013.

SCHLATTER, D. C.; HANSEN, J.; CARLSON, B.; et al. Are microbial communities indicators of soil health in a dryland wheat cropping system? **Applied Soil Ecology**, v. 170, n. November 2021, p. 104302, 2022.

SEATON, F. M.; GEORGE, P. B. L.; LEBRON, I.; et al. Soil textural heterogeneity impacts bacterial but not fungal diversity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 144, n. March, p. 107766, 2020.

SHARPTON, T. J. An introduction to the analysis of shotgun metagenomic data. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 209, 2014.

SMITH, D. P.; PEAY, K. G. Sequence depth, not PCR replication, improves ecological inference from next generation DNA sequencing. **PLoS ONE**, v. 9, n. 2, 2014.

SULEIMAN, A. K. A. et al. Shifts in soil bacterial community after eight years of land-use change. **Systematic and Applied Microbiology**, v. 36, n. 2, p. 137–144, 2013.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D.; VAN STRAALLEN, N. M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, v. 11, n. 3, p. 296–310, 2008.

XIAO, E. et al. Soil bacterial community functions and distribution after mining disturbance. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 157, n. March, p. 108232, 2021.

XUE, P.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Land-use affects soil microbial co-occurrence networks and their putative functions. **Applied Soil Ecology**, v. 169, n. January 2021, p. 104184, 2022.

ZIEGLER, M.; EGUÍLUZ, V. M.; DUARTE, C. M.; VOOLSTRA, C. R. Rare symbionts may contribute to the resilience of coral-algal assemblages. **ISME Journal**, v. 12, n. 1, p. 161–172, 2018.