

JANAINA MATTGE BRÖRING

**DIVERSIDADE FUNCIONAL-ESTRUTURAL DE ORGANISMOS DO SOLO E A
PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS DE ECOSISTEMA EM CENÁRIOS EXTREMOS DE
REGIME HÍDRICO**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutora no Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

Orientador: Dr. Osmar Klauberg Filho

**LAGES - SC
2017**

Mattge Bröring, Janaina

Diversidade funcional-estrutural de organismos do solo e a prestação de serviços de ecossistema em cenários extremos de regime hídrico / Janaina Mattge Bröring. - Lages , 2017.

155 p.

Orientador: Osmar Klauberg Filho

Co-orientador: José Paulo Filipe Afonso de Sousa
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2017.

1. Biota do Solo. 2. Diversidade funcional. 3. Alterações ambientais. I. Klauberg Filho, Osmar. II. Filipe Afonso de Sousa, José Paulo. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

JANAINA MATTGE BRÖRING

**DIVERSIDADE FUNCIONAL-ESTRUTURAL DE ORGANISMOS DO SOLO E A
PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS DE ECOSISTEMA EM CENÁRIOS EXTREMOS DE
REGIME HÍDRICO**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de doutora no Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Banca Examinadora:

Orientador:

Dr. Osmar Klauberg Filho, UDESC – Lages/SC

Membros internos:

Dr. Álvaro Luiz Mafra, UDESC – Lages/SC

Dr. Dilmar Baretta, UDESC – Chapecó/SC

Membros externos:

Dra. Julia Carina Niemeyer, UFSC – Curitiba/SC



Dr. José Paulo Filipe Afonso de Sousa, UC – Coimbra/Pt

Lages, 21/07/2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades concedidas em minha vida e por me guiar nesta etapa.

Aos meus pais pelo apoio e suporte, por acreditarem que no final tudo dá certo.

Ao meu marido Luiz pelo incentivo, compreensão e dedicação, especialmente nestes últimos anos de pós-graduação e em especial nas etapas finais de cada fase. Obrigado pela paciência nas horas difíceis e por me fazer sorrir nos momentos em que as coisas não iam como planejava.

À minha mana Mariana que me ajudou desde o começo até quando a Luana permitiu. Obrigado por ser meu braço direito, trabalhar comigo em todas as fases da pós-graduação, inclusive nos finais de semana.

Ao meu orientador Osmar Klauberg Filho pelos anos de aprendizado proporcionados no laboratório, pela orientação e confiança.

Ao professor José Paulo Sousa, pelo auxílio no delineamento dos experimentos e nas análises estatísticas.

Ao professor Sidney Luiz Stürmer pelos inóculos de FMAs cedidos e apoio financeiro pelo projeto do PRONEM para execução dos experimentos.

A professora Marie Bartz pela identificação das minhocas.

À EPAGRI e seus colaboradores, em especial ao pesquisador Murilo Dalla Costa, que possibilitou a implantação de experimentos em câmara de crescimento e em casa de vegetação.

Ao grupo de Solos e Sustentabilidade, em especial ao professor Dilmar Baretta.

Ao pessoal do Laboratório de Ecologia do Solo CAV - UDESC pela amizade, colaboração no projeto, pelos trabalhos aos finais de semana, coletas e desmontagens de experimentos. Muito obrigado Gessiane, Ana Lovatel, Mariana, Douglas, Luis, Leticia, Gilvani, Rafaela, Ana Maccari, Julia, Priscila, Guilherme Peixe, Josiane, Cyntia.

A Ana Lovatel pela amizade e apoio em todas as etapas dos experimentos.

Ao Douglas Alexandre pela identificação da fauna edáfica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade do doutorado.

Ao programa Ciências sem Fronteiras, pelos recursos destinados ao projeto, através da chamada de projeto MEC/MCTI/CAPES/CNPQ/FAPS nº 61/2011.

À FAPESC pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que direta ou indiretamente me auxiliaram e tornaram viável a concretização deste trabalho, muito obrigado.

RESUMO

Os organismos edáficos desempenham um papel fundamental no funcionamento do ecossistema solo, em seus diferentes tipos de uso e manejo. Sua diversidade no solo está ligada principalmente à produtividade e diversidade das comunidades vegetais, à ciclagem de nutrientes e manutenção da qualidade do solo. Fatores ambientais e de manejo podem afetar as comunidades de organismos do solo, modificando a prestação de serviços e a regulação dos ecossistemas. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos de resposta e de efeito (características funcionais/ estruturais) de populações de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e organismos edáficos (minhocas e colêmbolos), e seu comportamento em diferentes condições ambientais e de uso do solo. O projeto se desenvolveu em três etapas, com três capítulos, com ensaios em casa de vegetação utilizando nove isolados de FMAs - capítulo I (experimento I – simulação de regimes de chuva, experimento II – doses de fósforo) e com ensaios em modelos de ecossistemas terrestres (TMEs, mesocosmos), em áreas de plantio direto (PD) – capítulo II (dissimilaridade funcional), e em áreas de PD e integração lavoura-pecuária (ILP) - capítulo III (simulação de regimes de chuva). OS TMEs foram coletados em Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul. A planta hospedeira utilizada nos experimentos do capítulo I e III foi o milho (*Zea mays*) e no capítulo II a aveia preta (*Avena strigosa*). No capítulo I, foram avaliados atributos relacionados com a produtividade vegetal e com a simbiose micorrízica, sendo estes: a massa seca da parte aérea (MSPA), altura da planta, fósforo e nitrogênio no tecido vegetal, o comprimento de hifas (CH), a colonização micorrízica total (CT) e o número de esporos (Esp). No capítulo II, para buscar promover a dissimilaridade funcional no solo foram adicionadas aos mesocosmos comunidades de minhocas, colêmbolos e fungos micorrízicos separadamente e em combinações, com diferentes características. No capítulo III foram simulados regimes de chuvas baixo, normal e alto, correspondendo a condições de seca, precipitação média e inundação temporária, de acordo com as precipitações ocorridas na região do Planalto Catarinense nos últimos dez anos. Foram avaliadas as seguintes características nos capítulos II e III: produtividade vegetal (MSPA, concentração e acumulação de P e N), parâmetros dos FMAs (CH, CT e Esp), atributos microbianos (carbono e quociente microbiano), atividade enzimática, atributos físicos (argila e estabilidade de agregados), atributos químicos (fracionamento da matéria orgânica do solo, C, N, entre outros) e a decomposição da serapilheira. No capítulo I a inoculação, os regimes de chuvas e doses de fósforo influenciaram a resposta do milho e dos FMAs. A *Gigaspora albida* SCT200A aumentou a fitomassa do milho e o fósforo na parte aérea sob todas as condições de chuvas. A *Acaulospora morrowiae* SCT056A manteve a concentração de fósforo e acumulado na planta elevada para as três doses de P avaliadas, apresentando alto comprimento de micélio e número de esporos. A resposta dos FMAs e aumento do benefício as plantas variou com as condições ambientais dos experimentos. No capítulo II, as variáveis microbiológicas, carbono e quociente microbiano, colonização micorrízica radicular e comprimento de hifas foram sensíveis ao aumento da diversidade funcional ocasionada pela inoculação de organismos edáficos em sistema de plantio direto. No capítulo III, os diferentes regimes hídricos e períodos (resistência e resiliência) influenciaram a fitomassa e o P da parte aérea do milho. Com o retorno da chuva normal no período de resiliência, a decomposição da serapilheira foi um dos parâmetros influenciados pelos regimes de chuvas aplicados na resistência. Os atributos químicos e físicos apresentaram diferentes relações com os atributos microbiológicos estudados, entre os sistemas de uso, PD e ILP.

Palavras-chave: Biota do Solo. Diversidade funcional. Alterações ambientais.

ABSTRACT

Soil organisms play a fundamental role in functioning of soil ecosystem, in different use and management. Its soil diversity is mainly linked to the productivity and diversity of plant communities, the cycling of nutrients and the maintenance of soil quality. Environmental and management factors can affect communities of soil organisms by modifying ecosystem services and regulation. The objective this study was to evaluate the response and effect attributes (functional / structural characteristics) of populations of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and edaphic organisms, and their behavior in different environmental conditions and land use. The project was developed in three stages, with three chapters, with greenhouse trials using nine AMF isolates - chapter I (experiment I - rain regimes simulation, experiment II - extreme doses of phosphorus) and with tests in models of (TMEs, mesocosms) in no tillage (NT) areas - chapter II (functional dissimilarity), and in NT and integration crop-livestock (ICL) - chapter III (simulation of rain regimes). The TMEs were collected in Nitossolo Bruno in Campo Belo do Sul municipality. The host plant used in the experiments of chapter I and III was maize (*Zea mays*) and in chapter II it was black oats (*Avena strigosa*). In Chapter I, parameters related to plant productivity and mycorrhizal symbiosis were evaluated: dry shoot mass (SDM), plant height, phosphorus and nitrogen content in plant tissue, length of hyphae (HL), total mycorrhizal colonization (TC) and spore number (Spo). In chapter II, in order to promote functional dissimilarity in soil, communities of earthworms, springtails and arbuscular mycorrhizal fungi were added to the mesocosms with NT soil separately and in combination, with different characteristics. In Chapter III, low, normal and high rainfall regimes were simulated, corresponding to drought, average and temporary flood conditions, according to precipitation in Planalto Catarinense region during the last ten years. The following characteristics were evaluated in Chapters II and III: plant productivity (SDM, P and N concentration), AMF parameters (HL, TC and Spo), microbial parameters (microbial carbon and quotient), enzymatic activity, physical parameters and aggregate stability), chemical parameters (fractionation organic matter of soil, C, N, among others) and the rate of decomposition of litter. In chapter I, the inoculation, rainfall regimes and P phosphorus doses influenced the response of maize and AMF. *Gigaspora albida* SCT200A increased maize biomass and phosphorus in shoot under all rainfall conditions. The *Acaulospora morrowiae* SCT056A maintained the concentration and accumulated of phosphorus in the plant raised for the three doses of P evaluated, presenting high length of mycelium and number of spores. The response of the FMAs and increased plant benefit varied with the environmental conditions of the experiments. In chapter II, the microbiological variables, microbial carbon and quotient, root mycorrhizal colonization and hyphae length were sensitive to increase in functional diversity caused by the inoculation of edaphic organisms in no - tillage system. In chapter III, the different water regimes and periods (resistance and resilience) influenced the phytomass and P of aerial part the maize. With the return of normal rainfall during the resilience period, litter decomposition was one the parameters influenced by the rainfall regimes applied in the resistance. The chemical and physical attributes presented different relations with the microbiological attributes studied, between the systems of use, NT and ICL.

Keywords: Soil Biota. Functional diversity. Environmental changes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo I

- Figura 1.1- Fitomassa do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas 67
- Figura 1.2 -Altura do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas 68
- Figura 1.3 -Nitrogênio acumulado na parte aérea do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas 70
- Figura 1.4 -Altura da parte aérea do milho para tratamentos submetidos a diferentes doses de fósforo..... 74
- Figura 1.5 - Teor de clorofila a (a) e b (b) para tratamentos submetidos a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P)..... 77
- Figura 1.6 -Colonização total radicular para os tratamentos submetidos a diferentes doses de fósforo..... 77
- Figura 1.7- Comprimento de hifas para os tratamentos submetidos a diferentes doses de fósforo..... 78

Capítulo II

- Figura 2.1- Esquema do amostrador, mesocosmo e amostragem de “terrestrial model ecosystems” a campo 94
- Figura 2.2 -Localização do município de Campo Belo do Sul 95
- Figura 2.3 -Amostragem dos mesocosmos para avaliação do experimento. Divisão do TME em camadas de 0 - 10, 10 - 20 e 20 - 40 cm (a); quarteramento da camada de 0-10 cm para análise de estabilidade de agregados, fauna edáfica e análises químicas, físicas e biológicas (b) 99
- Figura 2.4- Nitrogênio acumulado na parte aérea da planta para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto..... 105
- Figura 2.5 -C e quociente microbiano para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto 106
- Figura 2.6 -Características dos fungos micorrízicos arbusculares para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto..... 107
- Figura 2.7 -Análise de componentes principais (ACP) com os atributos microbiológicos . 109
- Figura 2.8 -Análise de componentes principais (ACP) com a fauna edáfica..... 110

Capítulo III

Figura3.1- Regimes de chuvas e os períodos de análises do experimento em TMEs.....	124
Figura3.2- Fitomassa do milho no plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resistência nos TMEs.....	131
Figura3.3- Colonização micorrízica total para os sistemas de uso do solo no período de resiliência.....	132
Figura3.4- Respiração do solo no plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resistência nos TMEs.....	132
Figura3.5- Diâmetro médio ponderado para plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resistência	134
Figura3.6- Análise de componentes principais (ACP) com os atributos microbiológicos, para os sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária para a resistência ..	135
Figura3.7- Simbiose micorrízica para os sistemas de uso do solo no período de resiliência	138
Figura3.8- Decomposição da serapilheira para os sistemas de uso do solo no período de resiliência.....	138
Figura3.9- Respiração do solo no plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resiliência nos TMEs	139
Figura3.10- Análise de componentes principais (ACP), com base nos parâmetros microbiológicos para os sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária para a resiliência	140

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

- Tabela1.1- Isolados de fungos micorrízicos arbusculares provenientes da Coleção Internacional de Cultura de Glomeromycota (CICG) 61
- Tabela1.2- Resultado da análise de variância fatorial para o experimento com diferentes isolados de FMAs submetidos a três regimes de chuvas em milho (*Zea mays*). 66
- Tabela1.3- Fósforo na parte aérea do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas..... 69
- Tabela1.4- Colonização micorrízica total (CT) e comprimento de hifas (CH) para tratamentos submetidos a regimes de chuvas..... 71
- Tabela1.5- Número de esporos para tratamentos submetidos a regimes de chuvas 72
- Tabela1.6- Resultado da análise de variância fatorial para o experimento com diferentes isolados de FMAs submetidos a doses de fósforo em milho (*Zea mays*)..... 73
- Tabela1.7- Massa seca da parte aérea (MSPA) do milho submetida a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P)..... 73
- Tabela1.8- Teor de fósforo na parte aérea do milho submetido a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P)..... 75
- Tabela1.9- Teor de nitrogênio na parte aérea do milho submetido a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P)..... 76
- Tabela1.10- Número de esporos para tratamentos submetidos a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P) 79

Capítulo II

- Tabela2.1- Características químicas e físicas do solo na camada de 0 - 10 cm do plantio direto 96
- Tabela2.2- Classificação de colêmbolos por tipos morfológicos..... 97
- Tabela2.3- Design dos tratamentos de dissimilaridade funcional..... 98
- Tabela2.4 - Resultado da análise de variância para as variáveis relacionadas com os serviços ecossistêmicos..... 104

Capítulo III

- Tabela3.1 - Características químicas do solo dos sistemas de plantio direto (PD) e integração lavoura-pecuária (ILP) no município de Campo Belo do Sul 123

Tabela3.2- Características físicas do solo dos sistemas de plantio direto (PD) e integração lavoura-pecuária (ILP) no município de Campo Belo do Sul	123
Tabela3.3- Resultado da análise de variância fatorial para o plantio direto e integração lavoura-pecuária em TMEs no final do período de resistência	130
Tabela3.4- Fósforo da parte aérea (P) e acumulado (Pac) no milho para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas no período de resistência	131
Tabela3.5- Número de esporos para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas para o período de resistência	132
Tabela3.6- Atividade enzimática para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas no período de resistência.....	134
Tabela3.7- Fração humina para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas no período de resistência	135
Tabela3.8- Resultado da análise de variância fatorial para o plantio direto e integração lavoura-pecuária em TMEs no período de resiliência	136
Tabela3.9- Fitomassa do milho para os sistemas de uso do solo submetidos ao regime normal de chuva no período de resiliência.....	137
Tabela3.10-Fósforo da parte aérea (P) e acumulado (Pac) na parte aérea do milho para os sistemas de uso do solo submetidos ao regime de chuva normal no período de resiliência.....	137
Tabela3.11-Carbono e fração humina no solo para os sistemas de uso submetidos ao regime normal de chuva no período de resiliência	139
Tabela3.12- Atividade enzimática para os sistemas de uso do solo submetidos ao regime de chuva normal no período de resiliência	140
Tabela3.13-Coefficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de plantio direto na resistência	141
Tabela3.14-Coefficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de plantio direto na resiliência.....	142
Tabela3.15-Coefficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de integração lavoura-pecuária na resistência	142
Tabela3.16-Coefficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de integração lavoura-pecuária na resiliência	143

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	25
1.1	HIPÓTESES	26
1.2	OBJETIVOS	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS E BIODIVERSIDADE DO SOLO	29
2.2	GRUPOS FUNCIONAIS IMPORTANTES ASSOCIADOS AOS SERVIÇOS - TRAITS DE EFEITO E RESPOSTA AS VARIAÇÕES EDÁFICAS E AMBIENTAIS	31
2.2.1	Fungos micorrízicos arbusculares – FMAs	31
2.2.2	Mesofauna e macrofauna	34
2.2.3	Interações dos organismos	37
2.3	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS AGRÍCOLAS .	39
2.4	MODELOS DE ECOSSISTEMAS TERRESTRES – TMES	40
	REFERÊNCIAS.....	43
3	CAPÍTULO I - CARACTERÍSTICAS DE RESPOSTA E EFEITO DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM ASSOCIAÇÃO COM MILHO	57
3.1	INTRODUÇÃO	59
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.2.1	Experimento I – Isolados de FMAs submetidos a regimes de chuvas	62
3.2.2	Experimento II – Isolados de FMAs submetidos a doses de fósforo	63
3.2.3	Análises	63
3.2.4	Análise estatística dos dados	65
3.3	RESULTADOS	66
3.3.1	Experimento I – isolados de FMAs submetidos a regimes de chuvas	66
3.3.2	Experimento II – isolados de FMAs submetidos a doses de fósforo	72
3.4	DISCUSSÃO	79
3.5	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS.....	85
4	CAPÍTULO II - DISSIMILARIDADE FUNCIONAL EM MODELOS DE ECOSSISTEMAS TERRESTRES (TMES): INTERAÇÃO COM A BIOTA DO SOLO	91
4.1	INTRODUÇÃO	93
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	94
4.2.1	Análises	99
4.2.2	Análise estatística dos dados	104
4.3	RESULTADOS	104
4.4	DISCUSSÃO	110
4.5	CONCLUSÕES	114

	REFERÊNCIAS.....	113
5	CAPÍTULO III - RESISTÊNCIA E RESILIÊNCIA DE COMUNIDADES BIOLÓGICAS EM SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO E INTEGRAÇÃO LAVOURA - PECUÁRIA SUBMETIDOS A REGIMES EXTREMOS DE CHUVAS EM MODELOS DE ECOSISTEMAS TERRESTRES (TME).....	119
5.1	INTRODUÇÃO	121
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS	122
5.2.1	Análises	124
5.2.2	Análise estatística dos dados	129
5.3	RESULTADOS	129
5.3.1	Avaliação da resistência das comunidades bióticas.....	129
5.3.2	Avaliação da resiliência das comunidades bióticas.....	136
5.3.3	Correlações de Pearson	141
5.4	DISCUSSÃO	143
5.4.1	Avaliação da resistência das comunidades bióticas.....	143
5.4.2	Avaliação da resiliência das comunidades bióticas.....	145
5.4.3	Correlações de Pearson	147
5.5	CONCLUSÕES	148
	REFERÊNCIAS.....	149
	CONSIDERAÇÕES GERAIS	155

1 INTRODUÇÃO GERAL

As alterações climáticas e tipo de manejo podem causar alterações na diversidade funcional e estrutural das comunidades bióticas com efeitos sobre processos vitais no solo e sua provisão de serviços ecossistêmicos. Os principais impactos na estrutura das populações do solo podem provir de mudanças ocasionadas pela degradação do solo, uso inadequado de fertilizantes e variações na regularidade das chuvas, modificando a produção vegetal.

Considerando as populações como unidades funcionais que contribuem para serviços em escala local, Luck et al. (2003) introduziram o conceito de unidades provedoras de serviços, relacionando populações com serviços, assumindo que mudanças nas características das populações têm implicações na provisão de serviços no ecossistema. Estes serviços prestados pelas comunidades biológicas estão relacionados com os importantes ciclos do solo, como o do carbono, fósforo e nitrogênio, e, também estão relacionados a outros processos no solo como a ciclagem biogeoquímica de nutrientes, a nutrição e o crescimento das plantas e a estabilidade de agregados.

Comunidades de microrganismos do solo, especialmente as populações de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) constituem componentes chave de ligação entre as plantas e os nutrientes minerais do solo (BERRUTI et al., 2016). Os FMAs são organismos simbiotes com a maioria das plantas e podem promover benefícios em condições de estresses nutricionais e climáticos, suprindo principalmente a necessidade de água e fósforo das plantas. As espécies de FMAs têm características funcionais com variações intra e interespecífica, em relação a taxa de colonização na raiz, comprimento e densidade de hifas e formação de propágulos (esporos).

A fauna edáfica representa outra comunidade importante no solo, relacionada principalmente com a decomposição do material vegetal e a ciclagem de nutrientes. São diversos, representados pelos grupos de invertebrados classificados em micro, meso e macrofauna e, podem influenciar os serviços ecossistêmicos e interagir com os microrganismos do solo (VAZ DE MELLO et al., 2009; GRUBERT et al., 2016). Alguns grupos apresentam classificações conforme as características ecológicas, relacionadas principalmente com a camada do solo que habitam o que determina sua atuação nos processos do solo.

A diversidade dos organismos e suas interações vão determinar o bom funcionamento dos serviços no solo, pois raramente agem sozinhos (SCHERER-LORENZEN, 2005). Assim,

os serviços de ecossistema são usualmente providos por morfotipos e/ou espécies com diferentes características ecológicas, que vão atuar desde a fragmentação e decomposição da serapilheira até na disponibilidade e acesso de nutrientes para as plantas. Entretanto, pouco se conhece sobre as condições que mais influenciam a prestação de serviços de um conjunto de organismos do solo quando submetidos a diferentes condições de estresse, seja ela nutricional, pela diferença no manejo, alterações dos regimes de chuvas e/ou ocasionada pelas modificações na diversidade estrutural e funcional das comunidades no solo.

A tese enfocou a diversidade estrutural e funcional da biota do solo, mais especificamente dos fungos micorrízicos arbusculares, das minhocas e dos colêmbolos, com estudos com sistemas de uso do solo em condições de semi-campo utilizando os modelos de ecossistemas terrestres (TMEs) e em casa de vegetação.

1.1 HIPÓTESES

1. As populações de fungos micorrízicos arbusculares apresentam diferentes características de resposta (“response traits”) a regimes de chuvas extremos (seca, alta) e a diferentes níveis de suprimento de P no solo; e contribuem de forma diferenciada (“effect traits”) para o crescimento e nutrição do milho quando submetido a estresse hídrico e nutricional.

a. A colonização radicular de fungos micorrízicos arbusculares reduz efeitos de estresse ambiental, proporcionando maior resistência à planta frente a efeitos extremos de seca e a condições de hídricas elevadas, causadas pelas chuvas.

b. Os fungos micorrízicos arbusculares aumentam a absorção de fósforo do solo para suprir a necessidade das plantas, quando o ambiente que se encontram apresenta baixa disponibilidade deste nutriente. A eficácia na promoção de crescimento das plantas é diminuída em locais com alta concentração de P.

2. Alterações na diversidade estrutural das populações de fungos micorrízicos arbusculares, de colêmbolos e de minhocas afetam funcionalidade do solo e a oferta de serviços ecossistêmicos no sistema de plantio direto.

a. Os organismos do solo possuem respostas diferentes relacionadas com suas características ecológicas.

b. Modificações na diversidade ecológica em sistema de plantio direto, a nível de grupos e suas interações, podem promover mudanças na oferta dos serviços ecossistêmicos.

3. As comunidades de FMAs variam quanto à sua resistência e resiliência quando submetidas a efeitos de estresse hídrico nos sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral foi estudar as relações entre a diversidade funcional e estrutural das populações de fungos micorrízicos arbusculares e a fauna do solo, e os serviços por eles prestados aos ecossistemas agrícolas (estrutura do solo, ciclagem de nutrientes, produtividade das plantas) em diferentes condições de estresse hídrico, nutricional e de uso do solo.

O capítulo I refere-se aos experimentos I e II onde foram avaliadas as características de nove isolados de FMAs pertencentes à Coleção Internacional de Culturas de Glomeromycota (CICG) quanto à resistência a extremos de chuvas (seca e inundação temporária), e, sob doses extremas de fósforo (baixa e alta).

O capítulo II refere-se ao experimento em modelos de ecossistemas terrestres (TMEs) que buscou a promoção da dissimilaridade funcional no sistema de plantio direto com a avaliação das respostas das comunidades de FMAs, minhocas e colêmbolos. A partir dos dados obtidos no capítulo I, diferentes comunidades funcionais de fungos micorrízicos arbusculares foram selecionadas e inoculadas juntamente com minhocas e colêmbolos; para avaliar o funcionamento do sistema em termos de seleção de processos no solo e serviços associados frente à dissimilaridade funcional promovida pela adição destas comunidades em mesocosmos.

O capítulo III refere-se ao experimento em modelos de ecossistemas terrestres (TMEs) com o estudo das características de serviços prestados pelas comunidades naturais de solo de plantio direto e integração lavoura-pecuária diante de condições de chuvas extremas (seca e inundação temporária).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS E BIODIVERSIDADE NO SOLO

Os serviços ecossistêmicos estão relacionados com os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas, de modo geral, em relação aos alimentos, água, solo e ar (MEA, 2005), provendo os recursos necessários à produção de bens e serviços econômicos (ANDRADE et al., 2012). Assim, são dependentes da funcionalidade e estrutura do ecossistema (BRUSSAARD, 2012).

O ecossistema pode ser definido como qualquer unidade que inclua os organismos de uma determinada área que interagem entre si e com o ambiente físico, com troca de energia (ODUM, 2004) e matéria dentro de um sistema, contendo componentes bióticos e abióticos que interagem para formar uma estrutura com fluxos de entrada e saída (PILLAR, 2002).

Os serviços ecossistêmicos da agricultura incluem a regulação de sistemas de água e clima, culturais, bem como serviços de apoio avançados, como a fertilidade (SWINTON et al., 2007). Estão relacionados com a biodiversidade das espécies, de ecossistemas (VEZZANI, 2015) e com as práticas de conservação do solo (SCHWILCH et al., 2016).

Os serviços ecossistêmicos no solo são divididos em serviços de suporte, regulação, provisão e culturais. Os serviços de suporte estão relacionados com o ciclo de nutrientes e da água, formação do solo e biodiversidade; os de regulação com o controle biológico de pestes e doenças, clima e controle hidrológico; os de provisão com a reciclagem e desintoxicação de resíduos, filtragem de nutrientes e contaminantes, produção de biomassa e matéria prima e água limpa; e os culturais com a recreação e benefícios cognitivos (JÓNSSON; DAVÍÐSDÓTTIR, 2016).

Os serviços ecossistêmicos relacionados com a produtividade são gerados a partir das interações entre solo e organismos edáficos (BARRIOS, 2007). O solo atua como suporte para o desenvolvimento vegetal, fornece energia e matéria para uma diversidade de seres vivos (VEZZANI, 2015), e proporciona benefícios aos homens (JÓNSSON; DAVÍÐSDÓTTIR, 2016). Considerado um recurso de formação lenta e que sofre pressões por atividades antropocêntricas, a avaliação dos serviços dos ecossistemas do solo, tem que incluir aspectos relacionados com a funcionalidade e vitalidade do ecossistema a fim de melhor informar a tomada de decisões em relação ao uso e manejo (JÓNSSON; DAVÍÐSDÓTTIR, 2016).

Os serviços ecossistêmicos essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas são dependentes da diversidade da biota edáfica como parte integrante do solo, com funções que

sustentam os processos em ecossistemas manejados ou não (BARRIOS, 2007; KHURSHEED, 2016). A biodiversidade é a base para a manutenção do funcionamento do ecossistema, sendo dependente da riqueza de espécies e da sua distribuição (WAGG et al., 2014; VEZZANI, 2015).

Em larga escala, a biodiversidade do ecossistema terrestre encontra-se no solo (WAGG et al., 2014) e, remover ou adicionar espécies pode representar mudanças na chave dos processos ecossistêmicos (SCHERER-LORENZEN, 2005). Existe um interesse em relacionar características funcionais de diferentes grupos de organismos do solo com diferentes serviços para estabelecer meios lógicos de compreender o funcionamento dos ecossistemas (DE BELLO et al., 2010).

A função da biota do solo com os serviços ecossistêmicos essenciais à vida na Terra está relacionada com seus diferentes grupos funcionais. Os microsimbiontes, decompositores, engenheiros, pragas e microreguladores regulam os processos essenciais para manutenção do solo e gestão dos ecossistemas agrícolas (BARRIOS, 2007). Os organismos edáficos atuam como principais agentes na ciclagem de nutrientes, regulando a dinâmica do solo, a matéria orgânica, o sequestro de carbono do solo e emissão dos gases do efeito de estufa, modificando as propriedades físicas do solo e os regimes de água, aumentando a quantidade e a eficiência da aquisição de nutrientes nas plantas com a melhoria da saúde vegetal (KHURSHEED, 2016).

Estes serviços são essenciais para a função do ecossistema e gestão dos ecossistemas agrícolas (BARRIOS, 2007). Contudo, pode haver uma sobreposição de espécies em relação aos seus papéis funcionais no solo, na ausência de algumas espécies alvo, dependendo do efeito, outras podem exercer sua função, visto que raramente uma gama de funções é realizada por cada espécie (SCHERER-LORENZEN, 2005).

Determinadas condições podem aumentar as respostas de algumas espécies e diminuir de outras, principalmente por competição, onde as espécies mais resistentes conseguem explorar os recursos disponíveis. Portanto, a diversidade de espécies é importante para a estabilidade do ecossistema de forma mais ampla, com uma produtividade maior e estável, sem o comprometimento de serviços chave no solo (EVANS, 2016), incluindo a decomposição, ciclagem de nutrientes e matéria orgânica e a atividade dos organismos do solo (WURST et al., 2012).

A estabilidade do ecossistema depende não só da sua diversidade, mas da capacidade de resistência e resiliência quando submetidos a fatores de estresses bióticos e abióticos. A resistência do solo é conceituada como a capacidade do solo como um todo, resistir a

mudanças causadas por um distúrbio. A resiliência pode ser definida como a habilidade do sistema em recuperar sua integridade estrutural e funcional, ou seja, retornar a um equilíbrio semelhante ao anterior (SEYBOLD et al., 1999).

A capacidade de resistência e resiliência dos sistemas de uso do solo estão relacionadas com sua qualidade, diversidade biológica, fertilidade e estrutura. São regidas pela estrutura físico-química do solo que por sua vez influenciam as comunidades microbianas do solo e a diversidade vegetal (GRIFFITHS; PHILIPPOT, 2013).

2.2 GRUPOS FUNCIONAIS IMPORTANTES ASSOCIADOS AOS SERVIÇOS – TRAITS DE EFEITO E RESPOSTA AS VARIAÇÕES EDÁFICAS E AMBIENTAIS

2.2.1 Fungos micorrízicos arbusculares - FMAs

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) pertencem ao Filo *Glomeromycota*, Classe *Glomeromycetes*, são organismos biotróficos obrigatórios, que se associam com raízes de diversas plantas formando relação simbiótica mutualista (MORTON, 1993; SOUZA et al., 2010). Os FMAs são assexuados e se propagam quando associados às raízes das plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), e dependem da simbiose com plantas compatíveis para sua multiplicação (BERBARA et al., 2006).

Nesta simbiose de 450 milhões de anos, o fungo micorrízico forma uma relação com a planta hospedeira, trocando principalmente nutrientes do solo por carbono do hospedeiro (VERBRUGGEN; KIERS, 2010). As plantas suprem o fungo com compostos de C, enquanto os fungos provêm as plantas de nutrientes e água (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Este processo é realizado por hifas inter e intracelulares produzidas a partir da colonização das raízes, que ao adentrar nas células corticais internas, produz uma estrutura ramificada complexa chamada arbúsculo, considerado o local preferencial para troca de nutrientes (BERRUTI et al., 2013). As hifas extrarradiculares geradas funcionam como extensões do sistema radicular, contribuindo para um maior desenvolvimento das plantas, devido à maior absorção de água e nutrientes (MACHINESKI et al., 2011).

A biodiversidade abrange as variações entre as espécies, dentro de seus genótipos e fenótipos, e as variações espaciais e temporais nas comunidades e ecossistemas. A diversidade funcional é um dos componentes da biodiversidade que leva em conta às diferenças morfológicas, ecológicas e comportamentais entre as espécies, consideradas medidas importantes para avaliar a influência das espécies nos processos ecológicos. Os

atributos funcionais são mensuráveis a partir de características morfológicas, fisiológicas ou fenológicas dos indivíduos, sendo variáveis conforme condições de local e tempo (CALAÇA; GRELE, 2016).

As características estruturais relacionadas com as espécies de fungos são a taxas de colonização, o crescimento e extensão das hifas no solo e sua capacidade de absorção e translocação de nutrientes (CRUZ et al., 2008). A diversidade funcional das micorrizas arbusculares pode ser definida em termos de respostas no crescimento das plantas (JOHNSON et al., 1997), podendo ser avaliada a partir da percentagem de colonização micorrízica nas raízes, absorção de nutrientes e efeitos sobre o crescimento das plantas (FOLLI-PEREIRA et al., 2012).

As micorrizas arbusculares formam interações benéficas com a maioria das plantas e, em sistemas agrícolas, formam associações com diversas culturas importantes, como o milho, trigo e soja (VERBRUGGEN; KIERS, 2010). Em condições de limitação de fósforo, influenciam o desenvolvimento e produtividade das plantas, a absorção de nutrientes, as relações hídricas (DODD et al., 2000; JEFFRIES et al., 2003), considerados biofertilizantes naturais (BERRUTI et al., 2016).

O fósforo é um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, insubstituível nos sistemas biológicos (HIPPLER et al., 2011), está presente em baixas concentrações no solo e apresenta pouca mobilidade. Nessas condições os FMAs assumem papel determinante na sobrevivência de diversas espécies vegetais, incapazes de mobilizar este elemento (BERBARA et al., 2006), afetando diretamente a aquisição de P pelas plantas (BARRIOS, 2007). A eficiência dos FMAs é dependente do P (HIPPLER et al., 2011), que pode diferir na capacidade das plantas de selecionar os fungos e afetar a sua multiplicação (GOMIDE et al., 2009). As espécies de FMA e plantas hospedeiras vão diferenciar o crescimento e absorção de P da planta (MUNKVOLD et al., 2004).

As principais formas de fósforo encontrado no solo são a inorgânica e orgânica (GATIBONI et al., 2008). As formas inorgânicas podem ser a principal fonte de P em solos bem adubados, já em solos com baixos teores deste nutriente, a forma orgânica é importante para o sistema (GATIBONI et al., 2007). Esta última é representada pelos íons fosfato ligado aos compostos orgânicos e sua labilidade é relacionada com o potencial de decomposição do radical orgânico. Desta forma, os fosfatos diésteres representam o “pool” lábil de P no solo pela suscetibilidade ao ataque microbiano (GATIBONI et al., 2008).

A simbiose é beneficiada por baixas doses de fósforo no solo e pela rotação de culturas, que permite a seleção de espécies de FMAs mais eficientes (HAMEL, 1996; DODD

et al., 2000). Já a natureza uniforme de práticas de lavouras, fertilização e monocultura contínua, seleciona fortemente a dominância de poucas espécies de FMAs que geralmente não são benéficas às culturas (VERBRUGGEN; KIERS, 2010).

Além de seu papel na nutrição de plantas, estrutura (RUBIN; STÜRMER, 2015) e conservação do solo (DODD et al., 2000), as micorrizas arbusculares também são envolvidas na melhoria dos processos hídricos incluindo a tolerância à seca (AUGÉ, 2008) e, podem ser considerados canais de drenagem do C da atmosfera para o solo, via planta, pelo acesso direto a fontes de C desta (BERBARA et al., 2006). A expressão de genes das plantas relacionados com a tolerância ao estresse sofrem um impacto significativo e positivo, quando suas raízes estão colonizadas pelas micorrizas, e sua presença parece modificar o potencial osmótico, para auxiliar na menor perda de água (FOLLI-PEREIRA et al., 2012).

Os fungos micorrízicos desempenham um papel crítico no ciclo de nutrientes e na função do ecossistema, melhoram o crescimento e a sobrevivência das plantas através de uma relação mutualista em que os produtos fotossintéticos das plantas são trocados pelo aumento do acesso à água e aos nutrientes (KERNAGHAN, 2005). As micorrizas como sistemas biológicos são influenciadas por fatores edáficos e pelo ambiente (FOLLI-PEREIRA et al., 2012).

O desenvolvimento da simbiose está relacionado com o teor de nutrientes no solo e condições dos fatores abióticos como a temperatura, umidade e luminosidade, podendo ser inibido, estimulado ou não ter efeito sobre seu estabelecimento (MAIA et al., 2010). As relações dos FMAs com as plantas são consideradas não específicas. Contudo, há evidências de variabilidade funcional entre as espécies de FMAS que resultam em respostas diferenciadas em absorção de P e aumento da produtividade (ANGELINI et al., 2013).

O clima controla o estabelecimento da simbiose das comunidades de FMAs, diretamente pela maior disponibilidade hídrica a altas temperaturas e indiretamente pela maior necessidade nutricional e hídrica das plantas conforme a época do ano (SANTOS et al., 2014).

Em diferentes condições de estresse, a maioria das plantas superiores são colonizadas por FMAs, auxiliando positivamente no seu crescimento (FOLLI-PEREIRA et al., 2012). Em um estudo realizado em tomates, os resultados mostram que a simbiose micorrízica arbuscular afeta positivamente a tolerância ao estresse hídrico no fruto, com uma resposta diferente da planta dependendo das espécies de fungos envolvidas (CHITARRA et al., 2016).

A simbiose micorrízica está relacionada com a produtividade e diversidade de ecossistemas vegetais naturais, assim a perda ou perturbação desta relação pode ter consequências em termos de degradação da comunidade vegetal, podendo interferir na

estabilidade do ecossistema (JEFFRIES et al., 2003). Os sistemas radiculares da maioria das culturas agrônômicas são colonizados por mais de uma espécie de FMAs, variando nos benefícios funcionais relacionados com a transferência de nutrientes, proteção contra patógenos e absorção de água (VERBRUGGEN; KIERS, 2010). É um desafio estabelecer comunidades mistas com diferentes espécies de fungos micorrízicos arbusculares para verificar quais são funcionais, eficientes e complementares em relação a seleção pelas plantas (POWLSON et al., 2011).

Para beneficiar a agricultura com novas tecnologias nesta área, é necessário um maior entendimento sobre o funcionamento da simbiose das micorrizas nos sistemas de uso do solo, em relação as plantas e condições de solo e clima em que ocorrem (CARDOSO et al., 2010). Por serem biotróficos obrigatórios, essa característica dificulta o desenvolvimento de tecnologia para utilização de inoculantes micorrízicos em larga escala (SOUZA et al., 2011), mas é uma estratégia para beneficiar a nutrição das plantas e sua produtividade com menores investimentos com insumos e maior sustentabilidade no sistema (SENA et al., 2014). Além disso, estudos, bem como experiências de inoculação em campo, podem se beneficiar da análise genética e funcional de isolados selecionados (JEFFRIES et al., 2003).

A inoculação com FMAs pode ser usada como um componente de estratégias integradas de gerenciamento de nutrientes, promovendo o benefício na nutrição das plantas e diminuindo o uso de fertilizantes. Pode ser uma alternativa válida para fertilização do P ou, pelo menos, viável para reduzir a necessidade de grandes aplicações deste nutriente (COZZOLINO et al., 2013).

2.2.2 Mesofauna e macrofauna

A fauna edáfica é representada por animais invertebrados que passam toda a vida ou uma parte dela no solo (BERUDE et al., 2015). É considerada sensível e responde aos impactos de diferentes tipos de sistemas de produção, podendo ser utilizada como indicadora da qualidade do solo (SILVA et al., 2013). Apresentam uma alta diversidade e rápida capacidade de reprodução, e suas propriedades ou funções podem indicar e determinar a qualidade ou o nível de degradação do solo (WINK et al., 2005).

A fauna do solo inclui organismos microscópicos até os facilmente visíveis, cuja biodiversidade mundial ultrapassa 900 mil espécies conhecidas. Os invertebrados do solo variam em tamanho de alguns μm (microfauna) ou mm (mesofauna), até com muitos centímetros de comprimento (macrofauna), bem como alguns vertebrados (megafauna)

(BROWN et al., 2015). São divididos conforme o diâmetro em três grupos, na microfauna os organismos são menores que 0,2 mm, incluindo os nematoides, na mesofauna os organismos medem entre 0,2 a 2 mm, neste estão inseridos os ácaros, colêmbolos e enquitreídeos e na macrofauna são maiores que 2 mm, representados pelos cupins, formigas, minhocas, entre outros (VAZ DE MELLO et al., 2009).

A meso e a macrofauna do solo desenvolvem principalmente funções associadas a processos do ecossistema como na ciclagem de nutrientes. Atuam principalmente no ciclo do carbono e nitrogênio, na decomposição e incorporação de matéria orgânica no revolvimento do solo e controle biológico de pragas do solo, contribuindo assim para o funcionamento e estabilidade do ecossistema (VAZ DE MELLO et al., 2009; GRUBERT et al., 2016).

Os colêmbolos como representantes da mesofauna, são pequenos artrópodes, agrupados no filo Arthropoda, subfilo Hexapoda, classe Collembola, juntamente com os ácaros, são dominantes no solo dentro do seu grupo (ARBEA; BLASCO-ZUMETA, 2001). No solo, habitam camadas superficiais e profundas (ARBEA; BLASCO-ZUMETA, 2001) com ampla distribuição nos ecossistemas, estão presentes em florestas, regiões áridas e semiáridas, manguezais, cavernas e glaciares em montanhas (ZEPPELINI; BELLINI, 2017).

Alimentam-se principalmente de fungos, bactérias, algas, actinomicetos e de tecido vegetal (RUSEK, 1998). São considerados indicadores de qualidade do solo (BARETTA et al., 2008) sensíveis as mudanças bióticas ou abióticas, que podem interferir na sua biodiversidade (OLIVEIRA-FILHO; BARETTA, 2016). Os colêmbolos no solo agem na fragmentação e decomposição da matéria orgânica, na regulação das populações microbianas na formação da microestrutura do solo (RUSEK, 1998; BARETTA, 2007).

A utilização dos colêmbolos pode ser útil no desenvolvimento de estratégias para monitoramento de ecossistemas naturais ou manejados. Alguns fatores podem interferir mais nas comunidades de colêmbolos, como as variações na umidade em relação ao teor de C no solo (SAUTTER et al., 1998). Como as populações de colêmbolos apresentam alta redundância, com características funcionais semelhantes, a remoção de uma espécie pode não alterar o funcionamento da comunidade (WIDENFALK et al., 2016).

Os colêmbolos são agrupados em grupos funcionais baseados na sua distribuição vertical no solo, estratégia de vida, preferência alimentar e metabolismo, sendo estes, os edáficos, hemiedáficos e epígeos (PETERSEN, 2002). Os edáficos vivem no interior do solo, possui menor mobilidade, devido a isto, normalmente se alimentam de recursos de menor qualidade. Os hemiedáficos apresentam características intermediárias entre as epígeos e edáficos, pois vivem entre o solo e a serapilheira, são diversificados, e compreendem as

espécies que pertencem à maioria das famílias de colêmbolos já identificadas. O grupo dos epígeos habita a superfície do solo, possuem alta atividade metabólica e se alimentam de recursos com maior qualidade nutricional (RUSEK, 1998).

Algumas formas de manejo no solo, como o cultivo intensivo, o aumento das plantações florestais e o uso demasiado de fertilizantes, assim como as alterações climáticas podem impactar a diversidade destes organismos no solo (RUSEK, 1998).

Um dos principais representantes da macrofauna edáfica são as minhocas, agrupadas no filo Annelida, na classe Oligoqueta, atuam nos processos de movimentação de partículas e ciclagem de nutrientes. Alimentam-se de resíduos vegetais, juntamente com organismos decompositores acompanhantes, como fungos, bactérias, protozoários e nematoides. Também podem ingerir seus próprios excrementos, bem como fezes de outros organismos (STEFFEN et al., 2013), misturando o solo e a matéria orgânica nos seus coprólitos (dejetos) e criando túneis no solo (BROWN et al., 2015).

No solo, as minhocas representam os maiores componentes da biomassa animal, são importantes no estado inicial da reciclagem da matéria orgânica (BARTZ et al., 2010) e comumente denominados "engenheiros do ecossistema" (BLOUIN et al., 2013). As minhocas são consideradas indicadoras da qualidade ambiental e realizam serviços ecossistêmicos, como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a formação e a agregação do solo, fatores estes que beneficiam o crescimento das plantas (BROWN; DOMÍNGUEZ, 2010).

As minhocas são classificadas em três categorias ecológicas, que podem contribuir de forma diferente aos processos ecossistêmicos, podendo ser epígeas, endógeas ou anécicas. As espécies epígeas, vivem na superfície dos solos, na camada de 0 a 10 cm, afetam a rugosidade e produção de macroporos, podem habitar a serapilheira e normalmente são pigmentadas. As espécies anécicas são maiores e vivem em galerias, tocas verticais, que podem ultrapassar 40 cm de profundidade. E as espécies endógeas habitam os horizontes minerais do solo, em profundidades de 10 a 40 cm (BROWN; JAMES, 2007).

As minhocas epígeas são transformadoras da serapilheira, já as anécicas e endógeas têm efeitos nas propriedades e processos do solo e suas atividades pode modificar significativamente a disponibilidade de recursos para outros organismos do solo (BROWN et al., 2000).

As minhocas podem ser influenciadas pelos diferentes resíduos culturais, refletindo na atividade da biomassa microbiana do solo (ERNST et al., 2009). Juntamente com a população

microbiana de biocontrole podem atuar no controle biológico de doenças nas plantas (AYUKE et al., 2017).

A inoculação de minhocas em sistemas degradados pode melhorar a estrutura do solo, com a redução da erosão e melhoria na infiltração de água e na produtividade das culturas (BLOUIN et al., 2013). Alterações no ecossistema, sejam elas provocadas ou por eventos naturais, podem resultar na eliminação ou redução das populações de minhocas, devido a alterações bruscas na estrutura do solo, na ciclagem de nutrientes e no microclima (STEFFEN et al., 2013).

2.2.3 Interações dos organismos

No solo, as respostas dos organismos podem ser influenciadas de forma positiva ou negativa principalmente por competição, no qual as espécies mais resistentes conseguem explorar melhor os recursos disponíveis (EVANS, 2016).

As interações da fauna de solo com os microrganismos e a sua ação sobre a decomposição e ciclagem de nutrientes variam e são resultantes de características intrínsecas de cada grupo (CORREIA; OLIVEIRA, 2005). A fauna edáfica pode alterar as comunidades de fungos e bactérias por predação (CRAGG; BARDGETT, 2001), e o pastejo pode modificar o desenvolvimento das hifas de FMAs no solo (KLIRONOMOS; URSIC, 1998).

Os colêmbolos podem interferir na presença dos fungos no solo. Agem como dispersores dos esporos de fungos no solo (GANGE, 2000) e o pastejo sobre os FMAs modulam direta ou indiretamente a regulação da simbiose com as raízes (CARAVACA; RUESS, 2014).

Alguns colêmbolos ao se alimentar das hifas fúngicas extrarradiculares pode tornar a simbiose por FMAs com a planta ineficaz (WARNOCK et al., 1982) e, em outros casos a eficiência da simbiose não é modificada (ENDLWEBER, 2007; INNOCENTI et al., 2009).

Quando presentes no solo em densidade moderada, os colêmbolos podem aumentar a colonização micorrízica promovendo melhor crescimento das plantas e aumento da resistência dos tecidos foliares (GANGE, 2000). A interação de FMAs e colêmbolos pode promover o aumento da estabilidade de agregados no solo e da colonização micorrízica radicular e diminuir o comprimento das hifas no solo (SIDDIKY et al., 2012).

As minhocas e os fungos micorrízicos arbusculares são engenheiros importantes do ecossistema que ocorrem no solo (LI et al., 2017). A interação destes organismos pode

aumentar a biomassa e nutrição das plantas (WURST et al., 2004) e modificar a diversidade, a estrutura e o funcionamento de sistemas (ZALLER et al., 2011).

As minhocas ao se alimentarem de FMAs, podem perturbar a rede de hifas no solo (PATTINSON et al., 1997). Isso pode gerar uma influência negativa sobre a colonização das raízes e o comprimento das hifas no solo (LAWRENCE et al., 2003; ORTIZ-CEBALLOS et al., 2007), que normalmente é transitória (PATTINSON et al., 1997).

A inoculação de minhocas e FMAs podem aumentar a biomassa e P acumulado no milho, à colonização radicular, sem influenciar no comprimento das hifas no solo (CAO et al., 2015). Podendo estimular ou diminuir o carbono da biomassa microbiana do solo, o que está relacionado com as espécies introduzidas no sistema (AGHABABAEI et al., 2014). O desempenho das minhocas não são modificados pela presença dos FMAs no solo (EISENHAUER et al., 2009) e a inoculação destes organismos pode aumentar a colonização radicular total e arbuscular nas raízes (ZHANG et al., 2016).

As interações de minhocas e FMAs são importantes para a fertilidade do solo e sustentabilidade dos agroecossistemas (CAO et al., 2015; LI et al., 2017), podendo ainda, auxiliar na degradação de antibióticos presentes no solo (CAO et al., 2018).

As interações entre a fauna do solo variam principalmente com a identidade das espécies e a composição da comunidade. Isso resulta em relações complexas e de difícil previsão de seus efeitos nos processos do ecossistema, como a decomposição e o ciclo do nitrogênio (GRUBERT et al., 2016).

Variações na diversidade de mesofauna ou estrutura da comunidade são susceptíveis de causar alterações na composição da comunidade microbiana e, portanto, na atividade das minhocas (UVAROV; KARABAN, 2015). Já as minhocas podem determinar a abundância e diversidade da mesofauna edáfica (LAVELLE, 1996; UVAROV, KARABAN, 2015).

O desenvolvimento de grandes populações de artrópodes do solo, entre estes dos colêmbolos, pode ser influenciada pela atividade das minhocas nos processos iniciais de decomposição (MONROY et al., 2011). O aumento da macroporosidade promovido pela atividade de minhocas anécicas, permite o aumento de populações de colêmbolos pelo acesso ao maior volume de solo (SALMON et al., 2005).

Os microartópodes podem ser afetados pelas minhocas pelas mudanças na estrutura física do solo, por predação ou competição por alimentos. As minhocas podem alterar as redes alimentares, diretamente como objetos de presas, ou indiretamente através de alterações das características físicas do solo (EISENHAUER, 2010). Contudo, as populações de colêmbolos variam menos ao longo do tempo na presença de minhocas, sugerindo que as minhocas

exercem uma pressão regulatória sobre os alimentos ou o suprimento de habitat para estes organismos (GAO et al., 2017).

A mesofauna representada pelos ácaros, enquitreídeos e colêmbolos podem causar impactos positivos ou negativos nas populações de minhocas conforme relatado por Uvarov e Karaban (2015). Neste estudo o aumento na densidade da mesofauna diminuiu a biomassa de minhocas epígeas e aumentou a reprodução de minhocas endógeas pela exploração de recursos no solo. Correlações positivas entre minhocas e colêmbolos dependem das espécies e propriedades microbiológicas e bioquímicas do solo causadas pela atividade das minhocas (WICKENBROCK; HEISLER, 1997).

As minhocas ajudam a conduzir a sucessão de plantas e comunidades de colêmbolos em áreas degradadas (MUDRÁK et al., 2012). A interação de minhocas e colêmbolos podem aumentar o crescimento vegetal pela transferência de nitrogênio do solo e diminuição da incidência de pragas nas plantas (KE; SCHEU, 2008).

É importante que os organismos convivam em estado de equilíbrio dinâmico, com interações essenciais para a sobrevivência, proporcionando desta maneira, condições para a manutenção da biodiversidade edáfica (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002).

2.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

O clima não é constante, e registros de mudanças climáticas globais, em particular os regionais, mostram que o clima foi sistematicamente variável nos últimos anos (MINUZZI, 2010). A agricultura depende das condições climáticas, que influenciam as etapas das atividades agrícolas, desde o preparo do solo para semeadura até a colheita, o transporte, o preparo e o armazenamento dos produtos (PEREIRA et al., 2002).

As mudanças projetadas a condições extremas, que excedam a duração de secas, dias quentes e frios podem implicar na mudança dos ecossistemas. As maiores mudanças podem ocorrer provavelmente pela diminuição das chuvas, que vem acompanhada do aquecimento, resultando em mudanças na estrutura do solo e/ ou na comunidade microbiana (IPCC, 2014).

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (2015) o teor de umidade dos solos será afetado principalmente no verão pelas altas temperaturas e alterações no volume de chuvas nos próximos anos. A mobilização do solo acelera o processo de mineralização e decomposição da matéria orgânica do solo. Para aumentar a conservação de C e nutrientes do solo é necessária à prática de rotação de culturas com proteção da superfície do solo pelos

restos culturais. A qualidade dos solos modificada altera não só a emissão de C, mas também o armazenamento de água.

A quantidade e o tempo de chuva têm efeitos nos processos biológicos, como na germinação e estabelecimento das plantas, decomposição e respiração, processos microbianos e teores de nutrientes no solo (IPCC, 2014).

As mudanças climáticas globais podem ter impactos significativos em toda a biodiversidade do solo e serviços relacionados (KHURSHEED, 2016). As comunidades do solo são compostas por organismos com características e capacidades de dispersão diferentes, não reagindo às mudanças climáticas de forma semelhante (CLASSEN et al., 2015). As comunidades de microrganismos respondem ao aquecimento ou outras alterações no ecossistema através da resistência, habilitado por plasticidade, ou resiliência quando a comunidade tem a capacidade de retornar a uma composição inicial após sofrer uma condição de estresse (ALLISON; MARTINY, 2008).

Caso as perturbações nos solos ocasionadas pelas mudanças climáticas sejam significativas, os serviços ecossistêmicos fornecidos pela biodiversidade do solo podem ser afetados, e a quantificação desses impactos é necessária para verificar o funcionamento do solo (KHURSHEED, 2016).

2.4 MODELOS DE ECOSSISTEMAS TERRESTRES - TMES

Prever as causas ecológicas e as consequências das mudanças climáticas globais requer uma variedade de abordagens, incluindo o uso de experimentos, modelos e pesquisas (STEWART et al., 2013). Os cientistas de hoje enfrentam a tarefa de prever como as mudanças climáticas afetarão as distribuições e conjuntos de espécies (FORDHAM, 2015).

Os mesocosmos ou modelos de ecossistemas terrestres (Terrestrial Model Ecosystems - TMEs) consistem em colunas de solo intactas retiradas de um sistema de uso. Esses experimentos são utilizados para diminuir lacunas entre experimentos de campo e laboratório (MOSER et al., 2004; RÖMBKE et al., 2004). A padronização e a reprodutibilidade são consideradas principais vantagens para estes ensaios (VAN DEN BRINK et al., 2005).

Os experimentos com mesocosmos permitem testar os impactos climáticos nos organismos, melhorando a compreensão teórica das respostas ecológicas a mudanças climáticas prováveis (BENTON et al., 2007). Possibilitando estabelecer como os fatores abióticos ou bióticos interferem na estrutura das comunidades e processos ecossistêmicos (FORDHAM, 2015).

O termo "cosmo", que inclui tanto micro quanto mesocosmos, são limitados em tamanho e massa, com componentes bióticos e abióticos, e com limites que restringem a interação com o resto do ecossistema. Não imitam exatamente os sistemas naturais em todos os níveis da organização, mas minimizam a variabilidade sem reduzir o realismo (KNACKER et al., 2004), mesmo que as réplicas no espaço e tempo, normalmente resultem em um menor realismo ecológico (VAN DEN BRINK et al., 2005).

O tamanho e a complexidade dos cosmos utilizados dependem da natureza da questão a ser testada. Os microcosmos e mesocosmos podem ser distinguidos pelo tamanho ou com base na representatividade ecológica do sistema. Os microcosmos tem composição das espécies e características abióticas definidas e os mesocosmos são sistemas mais semelhantes aos naturais, com composição indígena de organismos (VAN DEN BRINK et al., 2005). O termo microcosmos pode ser utilizado para experimentos em pequena escala e mesocosmos em escalas maiores (CARBONELL; TARAZONA, 2014). Basicamente, microcosmos são experimentos com ecossistemas pequenos recipientes, atuam como uma ponte entre a teoria e natureza, não refletindo seu estado por completo, sendo capaz de aumentar nossa compreensão sobre o sistema (VIDICAN, SANDOR, 2015).

De acordo com Carbonell e Tarazona (2014), os microcosmos representam um passo de teste intermediário entre testes de toxicidade de uma única espécie e estudos de campo. Para avaliar o meio terrestre, podem ser utilizadas abordagens baseadas em conjuntos naturais com núcleos de solo intactos e conjuntos artificiais com solo reconstruído. Os trabalhos com solo peneirado possuem vantagens práticas e oferecem maior reprodutibilidade. Os cosmos com solos intactos, também denominados modelo de ecossistemas terrestres (TMEs), oferecem realismos mais elevados para estudar os efeitos sobre os efeitos naturais.

Os modelos de ecossistemas terrestres são usados em estudos com solos, avaliando seus processos em parte do espaço natural, sendo possível controlar variáveis de entrada e saída no sistema (FÖRSTER et al., 2009). Capaz de estudar as funções do ecossistema com maior semelhança das avaliações a campo (MORGAN; KNACKER, 1994).

Indicados para a avaliação de diferentes estressores ambientais principalmente em áreas agrícolas, do efeito de agroquímicos, como os pesticidas e fertilizantes, das alterações ambientais, como a flutuação da temperatura e umidade do solo (BANDOW et al., 2016), e sua influencia sobre a comunidade edáfica. Os TMEs tornam-se uma importante ferramenta de estudo para avaliações de risco ecológico (SOUSA et al., 2004).

REFERÊNCIAS

Agência Europeia do Ambiente (AEA). **O Ambiente na Europa: Estado e perspectivas 2015 – Relatório síntese**. Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, 2015. 203 p.

AGHABABAEI, F.; RAIESI, F.; HOSSEINPUR, A. The combined effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on microbial biomass and enzyme activities in a calcareous soil spiked with cadmium. **Applied Soil Ecology**, v. 75, p. 33-42, 2014.

ALLISON, S. D.; MARTINY, J. B. H. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, v. 105, p. 11512-11519, 2008.

ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R.; FASIABEN, M. C. R.; GARCIA, J. R. Dinâmica do uso do solo e valoração de serviços ecossistêmicos: notas de orientação para políticas ambientais. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, s.l., v. 25, p. 53-71, 2012.

ANGELINI; G. A. R.; SAGGIN-JÚNIOR, O. J.; SILVA, E. M. R. Seleção de fungos micorrízicos arbusculares e ectomicorrízicos para simbioses eficientes com *Acacia mangium* willd. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, p. 3529-3542, 2013.

ARBEA, J. I.; BLASCO-ZUMETA, J. Ecología de los Colémbolos (Hexapoda, Collembola) en Los Monegros (Zaragoza, España). **Aracnet**, Sociedade Entomológica Aragonesa, v. 28, p. 35-48, 2001.

AUGÉ, R. M.; TOLER, H. D.; SAMS, C. E.; NASIM, G. Hydraulic conductance and water potential gradients in squash leaves showing mycorrhiza-induced increases in stomatal conductance. **Mycorrhiza**, Berlin, v. 18, p. 115-121, 2008.

AYUKE, F. O.; LAGERLÖFA, J.; JORGE, G.; SÖDERLUND, S.; , MUTURI, J. J.; SAROSH, B. R.; MEIJER, J. Effects of biocontrol bacteria and earthworms on the severity of *Alternaria brassicae* disease and the growth of oilseed rape plants (*Brassica napus*). **Applied Soil Ecology**, Barcelona, p. 63-69, 2017.

BANDOW, C.; NG, E. L.; SCHMELZ, R. M.; SOUSA, J. P.; RÖMBKE, J. A TME study with the fungicide pyrimethanil combined with different moisture regimes: effects on enchytraeids. **Ecotoxicology**, Paris, v. 25, p. 213-224, 2016.

BARETTA, D. **Fauna do solo e outros atributos edáficos como indicadores da qualidade ambiental em áreas com *Araucaria angustifolia* no estado de São Paulo**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2007. 158 p.

BARETTA, D.; FERREIRA, C. S.; SOUSA, J. P.; CARDOSO, E. J. B. N. Colêmbolos (Hexapoda: Collembola) como bioindicadores de qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2693- 2699, 2008.

BARRIOS, E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. **Ecological Economics**, s.l., v. 64, p. 269-285, 2007.

BARTZ, M. L. C.; COSTA, A. C. S.; TORMENA, C. A.; SOUZA-JUNIOR, I. G.; BROWN, G. G. Sobrevivência, produção e atributos químicos de coprólitos de minhocas em um latossolo vermelho distroférico (oxisol) sob diferentes sistemas de manejo. **Acta Zoológica Mexicana**, s.l., v. 2, p. 261-280, 2010.

BENTON, T. G.; SOLAN, M.; TRAVIS, J. M. J.; SAIT, S. M. Microcosm experiments can inform global ecological problems. **Trends in Ecology & Evolution**, s.l., v. 22, p. 516-521, 2007.

BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, M. S. (Ed). **Nutrição Mineral de Plantas**. SBCS, Viçosa, 2006. 432 p.

BERRUTI, A.; BORRIELLO, R.; LUMINI, E.; SCARIOT, V.; BIANCIOTTO, V.; BALESTRINI, R. Application of laser microdissection to identify the mycorrhizal fungi that establish arbuscules inside root cells. **Frontiers in Plant Science**, s. l., v. 4, p. 1-10, 2013.

BERRUTI, A.; LUMINI, E.; BALESTRINI, R.; BIANCIOTTO, V. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. **Frontiers in Microbiology**, s. l., v. 6, p. 1-13, 2016.

BERUDE, M. C.; GALOTE, J. K. B.; PINTO, P. H.; AMARAL, A. A. A mesofauna do solo e sua importância como bioindicadora. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, p. 14-28, 2015.

BLOUIN, M.; HODSON, M. E.; DELGADO, E. A.; BAKER, G.; BRUSSARD, L.; BUTT, K. R.; DAI, J.; DENDOOVEN, L.; PERES, G. , TONDOH, J. E.; CLUZEAU, D.; BRUN, J.-J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. **European journal of soil science**, p. 161-182, 2013.

BROWN, G. G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das Minhocas como Bioindicadoras Ambientais: Princípios e Práticas – O 3º Encontro Latino Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligoquetas (ELAETAO3). **Acta Zoológica Mexicana**, v. 2, p. 1-18, 2010.

BROWN, G. G.; JAMES, S. W. Ecologia, biodiversidade e biogeografia das minhocas no Brasil. In: BROWN, G. G.; FRAGOSO, C. (Eds.). **Minhocas na América Latina: Biodiversidade e ecologia**. Embrapa Soja, Londrina, p. 297-381, 2007.

BROWN, G. G.; NIVA, C. C.; ZAGATTO, M. R. G.; FERREIRA, S. A.; NADOLNY, H. S.; CARDOSO, G. B. X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G. A.; PASINI, A.; BARTZ, M. C. L.; SAUTTER, K. D.; THOMAZINI, M. J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z. I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P. M.; SOUSA, J. P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Eds.). **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Embrapa Florestas, Brasília, p. 122-154, 2015.

BRUSSAARD, L. Ecosystem Services Provided by the Soil Biota. In: WALL, D.H.; BARDGETT, R. D.; BEHAN-PELLETIER, V.; HERRICK, J. E.; JONES, T. H.; RITZ, K.; SIX, J.; STRONG, D. R.; VAN DER PUTTEN, W. H. (Eds.). **Soil Ecology and Ecosystem Services**. Oxford: Oxford University Press, p. 45-58, 2012.

CALAÇA, A. M.; GRELLE, C. E. V. Diversidade Funcional de Comunidades: Discussões Conceituais e Importantes Avanços Metodológicos. **Oecologia Australis**, s. l., v. 20, p. 401-416, 2016.

CAO, J.; HUANG, Y.; WANG, C. Rhizosphere interactions between earthworms (*Eisenia fetida*) and arbuscular mycorrhizal fungus (*Funneliformis mosseae*) promote utilization efficiency of phytate phosphorus in maize. **Applied Soil Ecology**, v. 94, p. 30-39, 2015.

CAO, J.; WANG, C.; DOU, Z.; LIU, M.; JI, D. Hyphospheric impacts of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungus on soil bacterial community to promote oxytetracycline degradation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 341, p. 346-354, 2018.

CARAVACA, F.; RUESS, L. Arbuscular mycorrhizal fungi and their associated microbial community modulated by Collembola grazers in host plant free substrate. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 69, p. 25-33, 2014.

CARBONELL, G.; TARAZONA, J. V. Terrestrial Microcosms and Multispecies Soil Systems. **Encyclopedia of Toxicology**, Madrid, p. 1-4, 2014.

CARDOSO, E. J. B. N.; CARDOSO, I. M.; NOGUEIRA, M. A.; BARETTA, C. R. D. M.; PAULA, A. M. Micorrizas arbusculares na aquisição de nutrientes. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Eds). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. p. 153-214, Lavras: UFLA, 2010.

CHITARRA, W.; PAGLIARANI, C.; MASERTI, B.; LUMINI, E.; SICILIANO, I.; CASCONI, P.; SCHUBERT, A.; GAMBINO, G.; BALESTRINI, R.; GUERRIERI, E. Insights on the Impact of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis on Tomato Tolerance to Water Stress. **Plant Physiology**, s. l., v. 171, p. 1009-1023, 2016.

CLASSEN, A. T.; SUNDQVIST, M. K.; HENNING, J. A.; NEWMAN, G. S.; MOORE, J. A. M.; CREGGER, M. A.; MOORHEAD, L. C.; PATTERSON, C. M. Direct and indirect effects of climate change on soil microbial and soil microbial-plant interactions: what lies ahead? **Ecosphere**, v. 6, p.1-21, 2015.

CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. Importância da Fauna de Solo para a Ciclagem de Nutrientes. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Eds.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, p. 77-99, 2005.

COZZOLINO, V.; DI MEO, V.; PICCOLO, A. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability. **Journal of Geochemical Exploration**, s.l., v. 129, p. 40–44, 2013.

CRAGG, R. G.; BARDGETT, R. How changes in soil faunal diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, p. 2073-2081, 2001.

CRUZ, C.; CORREIA, P.; RAMOS, A.; CARVALHO, L.; BAGO, A.; LOUÇÃO, M. A. M. Arbuscular Mycorrhiza in Physiological and Morphological Adaptations of Mediterranean Plants. In: VARMA, A. (ed.) **Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, EcoFunction, Biotechnonology, Eco-Physiology, Structure and Systematics**. Berlin: Springer-Verlag, p. 733-752, 2008.

DE BELLO, F.; LAVOREL, S.; DÍAZ, S.; HARRINGTON, R.; CORNELISSEN, J. H. C.; BARDGETT, R. D.; BERG, M. P.; CIPRIOTTI, P.; FELD, C. K.; HERING, D.; SILVA, P. M.; POTTS, S. G.; SANDIN, L.; SOUSA, J. P.; STORKEY, J.; WARDLE, D. A.; HARRISON, P. A. Towards an Assessment of Multiple Ecosystem Processes and Services via Functional Traits. **Biodiversity and Conservation**, s.l., v. 19, p. 2873-2893, 2010.

DODD, J. C.; BODDINGTON, C. L.; RODRIGUEZ, A.; GONZALEZ-CHAVEZ, C.; MANSUR, I. Mycelium of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) from different genera: form, function and detection. **Plant and Soil**, s.l., v. 226, p. 131-151, 2000.

EISENHAUER, N. The action of an animal ecosystem engineer: identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods. **Pedobiologia**, Jena, v. 53, p. 343-352, 2010.

EISENHAUER, N.; KÖNIG, S.; SABAIS, A. C. W.; RENKER, C.; BUSCOT, F.; SCHEU, S. Impacts of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus intraradices*) on plant performance are not interrelated. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 41, p. 561-567, 2009.

ENDLWEBER, K. Decomposer-plant interactions: effects of Collembola on plant performance and competitiveness. Tese (doutorado em Biologia). Universidade Técnica de Darmstadt, Darmstadt, 2007. 105 p.

EVANS, E. W. Biodiversity, ecosystem functioning, and classical biological control. **Applied Entomology and Zoology**, Japan, v. 51, p. 173-184, 2016.

ERNST, G.; HENSELER, I.; FELTEN, D.; EMMERLING, C. Decomposition and mineralization of energy crop residues governed by earthworms. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 41, p. 1548-1554, 2009.

FOLLI-PEREIRA, M. S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1663-1679, 2012.

FORDHAM, D. A. Mesocosms Reveal Ecological Surprises from Climate Change. **PLOS Biology**, s.l., v. 13, p. 1-7, 2015.

FÖRSTER, B.; GARCIA, M.; HÖFER, H.; MORGAN, E.; RÖMBKE, J. Tropical terrestrial model ecosystems for evaluation of soil fauna and leaf litter quality effects on litter consumption, soil microbial biomass and plant growth. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.44, p.1063-1071, 2009.

GANGE, A. Arbuscular mycorrhizal fungi, Collembola and plant growth. **TREE**, s.l., v. 15, p. 369-372, 2000.

- GAO, M.; TAYLOR, M. K.; CALLAHAM-JR, M. A. Trophic dynamics in a simple experimental ecosystem: interactions among centipedes, Collembola and introduced earthworms. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 115, p. 66-72, 2017.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BRUNETTO, G. Fósforo da biomassa microbiana a atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1085-1091, 2008.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.
- GOMIDE, P. H. O.; SANTOS, J. G. D.; SIQUEIRA, L. O.; SOARES, C. R. F. S. Diversidade e função de fungos micorrízicos arbusculares em sucessão de espécies hospedeiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.1483-1490, 2009.
- GRIFFITHS, B. S.; PHILIPPOT, L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. **Federation of European Microbiological Societies**, s.l., v. 37, p. 112-129, 2013.
- GRUBERT, D.; BUTENSCHOEN, O.; MARAUN, M.; SCHEU, S. Understanding earthworm e Collembola interactions and their importance for ecosystem processes needs consideration of species identity. **European Journal of Soil Biology**, Mountrouge, v. 77, p. 66-67, 2016.
- HAMEL, C. Prospects and problems pertaining to the management of arbuscular mycorrhizae in agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 60, p. 197-210, 1996.
- HIPPLER, F. W. R. et al. Fungos micorrízicos arbusculares nativos e doses de fósforo no desenvolvimento do amendoim RUNNER IAC 8861. **Revista Ciência Agronômica**, s.l., v. 42, p. 605-610, 2011.
- INNOCENTI, G.; GANASSI, S.; MONTANARI, M.; BRANZANTI, M. B.; SABATINI, M. A. Response of plant growth to Collembola, arbuscular mycorrhizal and plant pathogenic fungi interactions. **Bulletin of Insectology**, s.l., v. 62, p. 191-195, 2009.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. SETTELE, J.; SCHOLLES, R.; BETTS, R. A.; BUNN, S.; LEADLEY, P.; NEPSTAD, D.; OVERPECK, J. T.; TABOADA, M. A. 2014: Terrestrial and inland water systems. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P.R.; WHITE, L.L. (Eds.). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.** Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change []. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, p. 271-359, 2014.

JEFFRIES, P.; GIANINAZZI, S.; PEROTTO, P.; TURNAU, K.; BAREA, M. J. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 37, p.1-16, 2003.

JOHNSON, N. C.; GRAHAM, J. H.; SMITH, F. A. Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism– parasitism continuum. **New Phytologist**, s.l., v. 135, p. 575-585, 1997.

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVIDSDÓTTIR, B. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, s. l., v. 145, p. 24-38, 2016.

KE, X.; SCHEU, S. Earthworms, Collembola and Residue Management Change Wheat (*Triticum aestivum*) and Herbivore Pest Performance (Aphidina: *Rhopalosiphum padi*). **Oecologia**, v. 157, p. 603-617, 2008.

KERNAGHAN, G. Mycorrhizal diversity: Cause and effect? **Pedobiologia**, s.l., v. 49, p. 511-520, 2005.

KHURSHEED, S. Soil Biodiversity and Climate Change. **Advances in Plants & Agriculture Research**, s.l., v. 3, p. 1-3, 2016.

KLIRONOMOS, J. N.; URSIC, M. Density-dependent grazing on the extraradical hyphal network of the arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus intraradices*, by the collembolan, *Folsomia candida*. **Nature**, s.l., v. 396, p. 69-72, 1998.

KNACKER T.; VAN GESTEL, C. A. M.; JONES, S. E.; SOARES, A. M. V. M.; SCHALLNAß, H. J.; FÖRSTER, B.; EDWARDS, C. A. Ring-testing and field-validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) - An instrument for testing potentially harmful substances: Conceptual approach and study design. **Ecotoxicology**, v. 13, p. 9-28, 2004.

LAVELLE, P. Diversity of soil fauna and ecosystem function. **Biology International**, v. 33, p. 3-16, 1996.

LAWRENCE, B.; FISK, M. C.; FAHEY, T. J.; SUÁREZ, E. R. BLACKWELL. Influence of nonnative earthworms on mycorrhizal colonization of sugar maple (*Acer saccharum*). **New Phytologist**, Saint Paul, v. 157, p. 145-153, 2003.

LI, H.; XIANG, D.; WANG, C. Hyphosphere regulation of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungus on soil N and P availability. **Soil & Plant Science**, v. 67 , p. 542-550, 2017.

LUCK G. W.; DAILY, G. C.; EHRLICH, P. R. Population diversity and ecosystem services. **Trends in Ecology and Evolution**, s. l., v. 18, p. 331-336, 2003.

MACHINESKI, O.; BALOTA, E. L.; SOUZA, J. R. P. Resposta da mamoneira a fungos micorrízicos arbusculares e a níveis de fósforo. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, p. 1855-1862, 2011.

MAIA, L. C.; SILVA, F. S. B.; GOTO, B. T. Estrutura, ultraestrutura e germinação de glomerosporos. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Eds). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. p. 75-118, Lavras: UFLA, 2010.

MEA. **Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystem and Human Well-being: A Framework for Assessment**. Washington: Island Press, p. 1-28, 2005.

MINUZZI, R. B. Tendências na variabilidade climática de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.1288-1293, 2010.

MONROY, F.; AIRA, M.; DOMÍNGUEZ, J. Epigeic earthworms increase soil arthropod populations during first steps of decomposition of organic matter. **Pedobiologia**, v. 54, p. 93-99, 2011.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. 625p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006. 729p.

MORGAN, E.; KNACKER, T. The role of laboratory terrestrial model ecosystems in the testing of potentially harmful substances. **Ecotoxicology**, Paris, v. 3, p. 213-233, 1994.

MORTON, J. B. Problems and solutions for the integration of glomalean taxonomy, systematic biology, and the study of endomycorrhizal phenomena. **Mycorrhiza**, v. 2, p. 97-109, 1993.

MOSER, T.; VAN GESTEL, C. A. M.; JONES, S. E.; KOOLHAAS, J. E.; RODRIGUES, J. M. L.; RÖMBKE, J. Ring-Testing and Field-Validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) – An Instrument for Testing Potentially Harmful Substances: Effects of Carbendazim on Enchytraeids. **Ecotoxicology**, v. 13, p. 89-103, 2004.

MUNKVOLD, L.; KJOLLER, R.; VESTBERG, M.; ROSENDAHL, S.; JAKOBSEN, I. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Cambridge, v. 164, p. 357-364, 2004.

MUDRÁK, O.; UTESENY, K.; FROUZ, J. Earthworms drive succession of both plant and Collembola communities in post-mining sites. **Applied Soil Ecology**, v. 62, p. 170-177, 2012.

ODUM, E. P. **Fundamentos de Ecologia**. 6ª ed. São Paulo: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004. 820 p.

OLIVEIRA-FILHO, L. C. I.; BARETTA, D. Por que devemos nos importar com os colêmbolos edáficos? **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v. 17, p. 21-40, 2016.

ORTIZ-CEBALLOS, A. I., PENÁ-CABRIALES, J. J., FRAGOSO, C., BROWN, G. G. Mycorrhizal colonization and nitrogen uptake by maize: combined effect of tropical earthworms and velvetbean mulch. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 44, p. 181-186, 2007.

PATTINSON, G. S.; SMITH, S. E.; DOUBE, B. M. Earthworm *Aporrectodea trapezoides* had no effect on the dispersal of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi, *Glomus intraradices*. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.29, p. 1079-1088, 1997.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p.

PETERSEN, H. General aspects of collembolan ecology at the turn of the 116 millennium. **Pedobiologia**, Jena, v. 46, p. 246-260, 2002.

PILLAR, V. P. **Ecosistemas, comunidades e populações: conceitos básicos**. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Ecologia, 2002. Disponível em: <<http://www.ecoqua.ecologia.ufrgs.br>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

POWLSON, D. S.; GREGORY, P. J.; WHALLEY, W. R.; QUINTON, J. N.; HOPKINS, D. W.; WHITMORE, A. P.; HIRSCH, P. R.; GOUDING, K. W. T. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. **Food Policy**, s.l.; v. 36, p. S72-S87, 2011.

RÖMBKE, J.; VAN GESTEL, C. A. M.; JONES, S. E.; KOOLHAAS, J. E.; RODRIGUES, J. M. L.; MOSER, T. Ring-Testing and Field-Validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) – An Instrument for Testing Potentially Harmful Substances: Effects of Carbendazim on Earthworms. **Ecotoxicology**, v. 13, p. 105-118, 2004.

RUBIN, J. G. K. R.; STÜRMER, S. L. Potencial de inóculo micorrízico e importância do comprimento do micélio para a agregação de solos de ambiente fluvial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 59-68, 2015.

RUSEK, J. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, London, v. 7, p. 1207-1219, 1998.

SALMON, S.; GEOFFROY, J. J.; PONGE, J. F. Earthworms and collembola relationships: effects of predatory centipedes and humus forms. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 37, p. 487-495, 2005.

SANTOS, R. S.; BARRETO, P. A. B.; SCORIZA, R. N. Efeito da sazonalidade na comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em um fragmento de mata de cipó em Vitória da Conquista, Bahia. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 12, p. 46-51, 2014.

SAUTTER, K. D.; MOITA-NETO, J. A.; MORAES, A.; SANTOS, H. R.; RIBEIRO-JÚNIOR, P. J. População de Oribatei e Collembola em pastagens na recuperação de solos degradados pela mineração do xisto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 1509-1513, 1998.

SCHERER-LORENZEN, M. Biodiversity and ecosystem functioning: basic principles. In: BARTHLOTT, W.; LINSÉNMAIR, K. E.; POREMBSKI, S. (Eds). **Biodiversity: structure and function**. Encyclopedia of life support systems, Oxford, p. 68-88, 2005.

SCHWILCH, G.; BERNET, L.; FLESKENS, L.; GIANNAKIS, E.; LEVENTONE, J.; MARANÓN, T.; MILLS, J.; SHORT, C.; STOLTE, J.; DELDENJ, H.; VERZANDVOORT,

S. Operationalizing ecosystem services for the mitigation of soil threats: A proposed framework. **Ecological Indicators**, s.l., v. 67, p. 586–597, 2016.

SENA, J. O. A.; STEFANUTTI, R.; DONHA, R. M. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Cinética de absorção com doses de fósforo e fungos micorrízicos arbusculares em *Nicotiana tabacum*. **Científica**, Jaboticabal, v. 42, p. 294-298, 2014.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. **Soil Science**, s.l., v. 164, p. 224-234, 1999.

SIDDIKY, M. R. K.; KOHLER, J.; COSME, M.; RILLIG, M. C. Soil biota effects on soil structure: Interactions between arbuscular mycorrhizal fungal mycelium and collembola. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 50, p. 33-39, 2012.

SILVA, R. F.; CORASSA, G. M.; BERTOLLO, G. M.; SANTI, A. L.; STEFFEN, R. B. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, p. 130-137, 2013.

SOUSA, J. P.; RODRIGUES, J. M. L.; LOUREIRO, S.; SOARES, A. M. V. M.; JONES, E. S.; FÖRSTER, B.; VAN GESTEL, C. A. M. Ring-Testing and Field-validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) – An Instrument for Testing Potentially Harmful Substances: Effects of Carbendazim on Soil Microbial Parameters. **Ecotoxicology**, Paris, v. 13, p. 43-60, 2004.

SOUZA; F. A.; GOMES, E. A.; VASCONCELOS, M. J. V.; SOUSA, S. M. Micorrizas Arbusculares: Perspectivas para Aumento da Eficiência de Aquisição de Fósforo (P) em Poaceae – Gramíneas. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, 2011. 30 p.

SOUZA, F. A.; STÜRMER, S. L.; CARRENHO, R.; TRUFEM, S. F. B. Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Eds). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. p. 15-73, Lavras: UFLA, 2010.

STEFFEN, G. P. K.; ANTONIOLLI, Z. I.; STEFFEN, R. B.; JACQUES, R. J.S. Importância ecológica e ambiental das minhocas. **Revista de Ciências Agrárias**, s.l., v. 32, p. 137-147, 2013.

STEWART, R. I. A.; DOSSENA, M.; BOHAN, D. A.; JEPPESEN, E.; KORDAS, R. L.; LEDGER, M. E.; MEERHOFF, M.; MOSS, B.; MULDER, C.; SHURIN, J. B.; SUTTLE, B.; THOMPSON, R.; TRIMMER, M.; WOODWARD, G. Mesocosm Experiments as a Tool for

Ecological Climate-Change Research. **Advances in Ecological Research**, v. 48, p. 71-181, 2013.

SWINTON, S. M.; LUPI, F.; ROBERTSON, G. P.; HAMILTON, S. K. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. **Ecological Economics**, s.l., v. 64, p. 245-252, 2007.

UVAROV, A. V.; KARABAN, K. Do alterations in mesofauna community affect earthworms? **Oecologia**, s.l., v. 179, p. 877–887, 2015.

VAN DEN BRINK, P. J.; TARAZONA, J. V.; SOLOMON, K. R.; KNACKER, T.; VAN DEN BRINK, N. W.; BROCK, T. C. M.; HOOGLAND, J. P. The use of terrestrial and aquatic microcosms and mesocosms for the ecological risk assessment of veterinary medicinal products. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 24, p. 820-829, 2005.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A., SCHEUBLIN, T. R. Functional traits in mycorrhizal ecology: their use for predicting the impact of arbuscular mycorrhizal fungal communities on plant growth and ecosystem functioning. **New Phytologist**, v. 174, p. 244-250, 2007.

VAZ DE MELLO, F. Z.; BROWN, G. G.; CONSTANTINO, R.; LOUZADA, J. N. C.; LUIZAO, F. J.; MORAIS, J. W.; ZANETTI, R. A importância da mesa e macrofauna do solo na fertilidade como bioindicadores. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 39-43, 2009.

VERBRUGGEN, E.; KIERS, E. T. Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems. **Evolutionary Applications**, v. 3, p. 547-560, 2010.

VEZZANI, F. M. Solos e os serviços ecossistêmicos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 8, p. 673-684, 2015.

VIDICAN, R.; SANDOR, V. Microcosm Experiments as a Tool in Soil Ecology Studies. **Bulletin UASVM Agriculture**, v. 72, p. 319-320, 2015.

ZALLER, J. G.; HEIGL, F.; GRABMAIER, A.; LICHTENEGGER, C.; PILLER, K.; ALLABASHI, R. FRANK, T.; DRAPELA, T. Earthworm-mycorrhiza interactions can affect the diversity, structure and functioning of establishing model grassland communities. **PLoS ONE**, s. l., v. 6, p. 1-11, 2011.

ZHANG, W.; CAO, J.; ZHANG, S.; WANG, C. Effect of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on the microbial community and maize growth under salt stress. **Applied Soil Ecology**, v. 107, p. 214-223, 2016.

ZEPPELINI, D.; BELLINI, B. C. Checklist dos Collembola (Arthropoda, Hexapoda) do Estado do Mato Grosso do Sul. **Iheringia**, Porto Alegre, v. 107, p. 1-3, 2017.

WAGG, C.; BENDER, F.; WIDMER, F.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. **PNAS**, s.l., v. 111, p. 5266-5270, 2014.

WARNOCK, A. J.; FITTER, A. H.; USHER, M. B. The influence of a springtail *Folsomia candida* (insecta, Collembola) on the mycorrhizal association of leek allium porrum and the vesicular-arbuscular mycorrhizal endophyte *Glomus fasciculatus*. **New Phytologist**, Saint Paul, v. 90, p. 285-292, 1982.

WICKENBROCK, L.; HEISLER, C. Influence of earthworm activity on the abundance of collembola in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 29, p. 517-521, 1997.

WIDENFALK, L. A.; MALMSTROM, A.; BERG, M. P. B.; BENGTSSON, J. Small-scale Collembola community composition in a pine forest soil e Overdispersion in functional traits indicates the importance of species interactions. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 103, p. 52-62, 2016.

WINK, C.; GUEDES, J. V. C.; FAGUNDES, C. K.; ROVEDDER, A. P. Insetos edáficos como indicadores da qualidade ambiental. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.4, p. 60-71, 2005.

WURST, S. DEYN, G. B.; ORWIN, K. Soil Biodiversity and Functions. In: WALL, D.H.; BARDGETT, R. D.; BEHAN-PELLETIER, V.; HERRICK, J. E.; JONES, T. H.; RITZ, K.; SIX, J.; STRONG, D. R.; VAN DER PUTTEN, W. H. (Eds). **Soil Ecology and Ecosystem Services**. Oxford: Oxford University Press, p. 28-44, 2012.

WURST, S.; DUGASSA-GOBENA, D.; LANGEL, R.; BONKOWSKI, M.; SCHEU, S. Combined effects of earthworms and vesicular arbuscular mycorrhizas on plant and aphid performance. **New Phytologist**, Saint Paul, v. 163, p. 169-176, 2004.

3 CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS DE RESPOSTA E EFEITO DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM ASSOCIAÇÃO COM MILHO

RESUMO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são organismos biotróficos obrigatórios, que se associam com raízes de diversas plantas formando relação simbiótica mutualista, são encontrados em diferentes ecossistemas, e sua diversidade no solo está ligada à produtividade e à diversidade das comunidades vegetais. Fatores ambientais e de manejo podem afetar as comunidades de FMAs e de outros organismos do solo, modificando a prestação de serviços e a regulação dos ecossistemas. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos de resposta (estruturais) e de efeito (funcionais) de populações de FMAs pertencentes à Coleção Internacional de Culturas de Glomeromycota (CICG) em milho (*Zea mays*), quando submetidos a condições de chuvas (experimento I) e doses de fósforo (experimento II). Para ambos os experimentos foram inoculados nove isolados de FMAs em vasos com substrato composto por areia e vermiculita (1:1, v/v), utilizando o milho como planta hospedeira. No experimento I se realizou a simulação de três regimes de chuva artificial (baixa, normal, alta) e no II o ensaio foi conduzido sobre três doses de fósforo (reduzido, baixa, alta). O delineamento foi inteiramente casualizado com cinco repetições. As análises avaliadas foram a colonização micorrízica total (CT), comprimento de hifas (CH), número de esporos (Esp), altura da planta (AP), massa seca da parte aérea (MSPA), concentração e acúmulo de fósforo (P) e nitrogênio (N) no tecido vegetal. A inoculação e os regimes de chuvas modificaram a resposta do milho na concentração e acumulação de fósforo na parte aérea da planta, e as características dos fungos micorrízicos (CT, CH, Esp). A chuva alta aumentou a concentração e acumulação de fósforo na parte aérea do milho. A *Gigaspora albida* SCT200A proporcionou elevada fitomassa e nutrição de fósforo na parte aérea do milho, em todas as condições de chuvas, com alta colonização micorrízica radicular. O *Rhizophagus clarus* RJN102A aumentou o nitrogênio acumulado na parte aérea do milho, quando submetido a diferentes regimes de chuvas. A inoculação e as doses de fósforo apresentaram interação na resposta do milho para a fitomassa, concentração e acúmulo de fósforo na parte aérea da planta. A *Acaulospora morrowiae* SCT056A manteve a concentração e acumulação de fósforo na planta elevada independente da dose de fósforo, com alto comprimento de hifas e número de esporos. A *Acaulospora morrowiae* SCT400B apresentou baixo comprimento de hifas e colonização radicular, mas apresentou incremento na altura da planta, nos tratamentos com doses de fósforo. As respostas dos isolados de FMAs e benefícios na fitomassa e nutrição das plantas variaram com as condições ambientais impostas.

Palavras -chave: Fungos micorrízicos arbusculares. Regimes de chuvas. Doses de fósforo.

TRAITS OF RESPONSE AND EFFECT OF ARBUSCULAR MYCORRHIZIC FUNGI IN MAIZE ASSOCIATION

ABSTRACT

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are obligatory biotrophic organisms, which are associated with roots of several plants forming a symbiotic mutualist relationship, are found in different ecosystems, and their soil diversity is linked to the productivity and diversity of plant communities. Environmental and management factors may affect AMF communities and other soil organisms by modifying service delivery and ecosystem regulation. The objective this study was to evaluate the (structural) and affect (functional) response attributes of AMF populations belonging to the International Collection of Glomeromycota Cultures (CICG) in maize (*Zea mays*) when submitted to rainfall conditions (experiment I) and phosphorus rates (experiment II). For both experiments, nine isolates of AMF were inoculated in pots with substrate composed of sand and vermiculite (1:1), using corn as host plant. In the experiment I the simulation of three artificial rainfall regimes (low, normal, high) and in II the test was conducted on three doses of phosphorus (without, low, high). The design was completely randomized with five replicates. The total mycorrhizal colonization (TC), hyphae length (HL), number of spores (Spo), plant height (PH), shoot dry mass (SDM), concentration and accumulation of phosphorus (P) and nitrogen (N) in plant tissue. Inoculation and rainfall regimes modified maize response in concentration and accumulation of phosphorus in aerial part of plant, and the characteristics of mycorrhizal fungi (TC, HL, Spo). High rainfall increased the concentration and accumulation of phosphorus in aerial part of the maize. *Gigaspora albida* SCT200A provided high phytomass and phosphorus nutrition in the aerial part of maize in all rainfall conditions, with high root mycorrhizal colonization. *Rhizophagus clarus* RJN102A increased the nitrogen accumulated in the aerial part of maize, when submitted to different rainfall regimes. Inoculation and phosphorus doses showed interaction in maize response to phytomass, concentration and accumulation of phosphorus in the aerial part of plant. The *Acaulospora morrowiae* SCT056A maintained the concentration and accumulation of phosphorus in the high plant independent of the dose of phosphorus, with high hyphae length and number of spores. The *Acaulospora morrowiae* SCT400B presented low hyphae length and root colonization, but showed an increase in plant height in treatments with phosphorus doses. The responses of the AMF isolates and plant biomass and plant nutrition benefits varied with the environmental conditions imposed.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi. Rain regimes. Phosphorus rates.

3.1 INTRODUÇÃO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são organismos biotróficos importantes, encontrados nos mais variados ecossistemas, que podem beneficiar às plantas principalmente em relação à absorção de água e fósforo. As plantas que fazem esta associação simbiótica podem ter maior capacidade de enfrentar fatores de estresses, relacionados com a água, temperatura e nutrientes, melhorando ou mantendo sua produção vegetal, mas a resposta da planta hospedeira pode variar conforme as inoculações de isolados de FMAs (NOVAIS et al., 2014).

A simbiose micorrízica é influenciada principalmente por fatores relacionados com a espécie de FMA, a planta hospedeira (necessidade hídrica e nutricional), teor de fósforo no solo, condições climáticas, temperatura e umidade. Estes fatores podem interferir na ocorrência, diversidade e no desempenho da simbiose dos FMAs (SIQUEIRA, SAGGIN-JUNIOR, 1992; SANTOS et al., 2014). Algumas características têm significado sobre a funcionalidade dos FMAs, como o comprimento das hifas, grau de colonização das raízes e formação de esporos (VAN DER HEIJDEN; SCHEUBLIN, 2007).

Essas características dos FMAs podem diferir entre si e, a individualidade e plasticidade de isolados precisam ser avaliadas, pois isolados da mesma espécie podem não ter propriedades idênticas (KUHN et al., 2001). As espécies apresentam diferenças em termos de eficiência na produtividade vegetal, entretanto, pouco se conhecem sobre as características das populações e comunidades que determinam seus benefícios (VAN DER HEIJDEN et al., 1998).

Os FMAs são essenciais na prestação de serviços ecossistêmicos em ambientes naturais e agrícolas (ABIALLA et al., 2013). Os registros de mudanças climáticas globais e, em particular os regionais, mostram que o clima foi sistematicamente variável (MINUZZI, 2010), com mudanças nas temperaturas e distribuição das chuvas. A agricultura depende das condições climáticas, que influenciam as atividades agrícolas, o solo, plantio, colheita, transporte, preparo e armazenamento dos produtos (PEREIRA et al., 2002). Para beneficiar a agricultura com novas tecnologias nesta área é necessário maior entendimento sobre o funcionamento da simbiose das micorrizas, em relação as plantas e condições de solo e clima em que ocorrem (CARDOSO et al., 2010).

Estudos que abordem as características de diferentes espécies ou mesmas espécies de diferentes locais são necessários para ampliar o conhecimento da variabilidade e eficiência destes fungos. Determinando as características de resposta dos FMAs, produção de hifas,

colonização radicular e esporulação, e de efeito na produção vegetal, nutrição das plantas e melhoria dos processos hídricos.

Este estudo teve como objetivo avaliar as características de respostas e de efeito de isolados de FMAs, pertencentes às famílias Acaulosporaceae, Glomeraceae e Gigasporaceae, sob regimes hídricos extremos e diferentes doses de P no solo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados dois experimentos utilizando nove isolados de fungos micorrízicos arbusculares (Tabela 1.1). O experimento I teve por objetivo avaliar as características de resposta (colonização radicular, comprimento de hifas, esporulação) e efeito (produção de biomassa, nutrição de P e N) dos isolados de FMAs sob extremos de chuva. O experimento II teve como objetivo avaliar as mesmas características de resposta e diferentes características de efeito (produção de biomassa, nutrição de P e N, teor de clorofila) dos isolados de FMAs sob diferentes doses de fósforo.

Descrição dos isolados

Foram inoculados isolados de FMAs provenientes de diferentes áreas conforme a Tabela 1.1. Os isolados fazem parte da Coleção Internacional de Culturas de Glomeromycota (CICG), localizada na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em Santa Catarina (www.furb.br/cicg). Quatro isolados, sendo estes *Acaulospora morrowiae* SCT063A, *Acaulospora morrowiae* SCT056A, *Acaulospora koskei* SCT049C e *Acaulospora koskei* SCT048A são oriundos de diferentes regiões do estado de Santa Catarina e foram isolados durante a execução do Projeto Sistema Nacional de Pesquisa em Biodiversidade-SC (SISBIOTA-SC, edital MCT/CNPq/MMA/MEC/CAPES/FNDCT – Ação Transversal/FAPs Nº 47/2010; www.biotasc.com). Cinco isolados, sendo estes *Acaulospora colombiana* SCT115A, *Acaulospora morrowiae* SCT400B, *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A, *Gigaspora albida* SCT200A e *Rhizophagus clarus* RJN102A, foram selecionados para estudos relacionados a uso e produção de inoculantes micorrízicos, oriundos do Projeto PRONEM (Programa de Apoio a Núcleos Emergentes de Pesquisa).

Tabela 1.1 - Isolados de fungos micorrízicos arbusculares provenientes da Coleção Internacional de Cultura de Glomeromycota (CICG).

Espécie e código da CICG	Histórico
<i>Acaulospora colombiana</i> SCT115A (Spain & Schenck) Morton & Bever	Isolado da Mina do Apartado, em Lauro Muller, SC. Solo com pH < 4. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 2003.
<i>Acaulospora morrowiae</i> SCT400B Spain & Schenck	Isolado de Campo Nativo, em Campo Belo do Sul, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 2005.
<i>Acaulospora morrowiae</i> SCT056A Spain & Schenck	Isolado de Campo Nativo, em Nitossolo Bruno, de Lages, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 2012.
<i>Acaulospora morrowiae</i> SCT063A Spain & Schenck	Isolado de Campo Nativo, em Latossolo vermelho, de São Miguel do Oeste, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 2012.
<i>Acaulospora koskei</i> SCT049C Blaszkowski	Isolado de plantação de Eucalipto, em Cambissolo húmico, de Otacilio Costa, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 2011.
<i>Acaulospora koskei</i> SCT048A Blaszkowski	Isolado de Campo Nativo, em Cambissolo húmico, de Otacilio Costa, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 2011.
<i>Claroideoglo mus etunicatum</i> SCT101A (Becker & Gerdemann) Walker & Schussler	Isolado de pomares de macieira em Caçador, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Isolado estabelecido em 1998.
<i>Gigaspora albida</i> SCT200A Schenck & Sm	Isolado de Dunas marítimas, associada a <i>Sporobulus</i> , na praia do Santinho, Florianópolis, SC. Ambiente méxico, clima subtropical. Solo com pH entre 7,1 e 8. Isolado estabelecido em 2005.
<i>Rhizophagus clarus</i> RJN102A (Nicolson & Schenck) Walker & Schussler	Isolado obtido via CNPAB-UFLA e originado da Flórida, USA.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O substrato utilizado nos experimentos foi composto por mistura de areia e vermiculita no volume de 1:1. O substrato foi esterilizado em autoclave a 120 °C durante 30 minutos. A mistura apresentava pH 5,1.

3.2.1 Experimento I – Isolados de FMAs submetidos a regimes de chuvas

Este experimento foi conduzido em câmara de crescimento, localizada no laboratório de Biotecnologia na Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri - Lages/SC) de janeiro a maio de 2014.

A planta hospedeira utilizada foi o milho (*Zea mays*), variedade AS 1551 PRO2, escolhida por se tratar de uma espécie micotrófica e amplamente utilizada no Estado de Santa Catarina no sistema de plantio direto. Três sementes foram plantadas pré-germinadas. Após o estabelecimento das plantas, uma foi mantida em cada vaso de 4 kg, composto por substrato de areia e vermiculita (1:1, v/v) estéreis. O tratamento controle não foi inoculado. Nos demais tratamentos as plantas foram inoculadas com os nove isolados de FMAs descritos na Tabela 1.1, dispostos próximos à semente, contendo aproximadamente 200 esporos. O experimento permaneceu na câmara de crescimento com temperatura constante de 25 °C e fotoperíodo de 14 horas. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições.

A adubação foi realizada conforme exigência da cultura, utilizando a solução nutritiva de Long - Ashton (BRUNDRETT et al., 1994) modificada contendo 10 % de fósforo da concentração original. Foi aplicada ureia em solução para o fornecimento de nitrogênio as plantas, na dose de 30 kg ha⁻¹.

Regimes de chuvas

Foram testados regimes de chuvas característicos na região do Planalto Sul Catarinense, seguindo três tratamentos:

1. Regime de precipitação baixo: 3 mm
2. Regime de precipitação normal (média): 5 mm
3. Regime de precipitação alto: 15 mm

Os cálculos das chuvas basearam-se na média mensal de 12 anos na região do Planalto Catarinense do ano 2000 a 2012, segundo publicado pelo CIRAM, Epagri – Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina.

Os regimes de chuvas foram simulados em dias alternados após o estabelecimento da colonização micorrízica (aproximadamente após 30 dias do plantio) nas plantas e conduzido por aproximadamente 60 dias nos vasos para avaliação do experimento. As simulações de

chuva foram realizadas utilizando chuva artificial conforme protocolo proposto por Velthorst (1993).

3.2.2 Experimento II – Isolados de FMAs submetidos a doses de fósforo

Este experimento foi conduzido em casa de vegetação na Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri - Lages/SC) de dezembro de 2014 a maio de 2015.

Os tratamentos testados foram nove isolados de FMAs, com um controle sem inoculação e três níveis de fósforo: sem adição de P (10 % de P presente na solução nutritiva de Long – Ashton; BRUNDRETT et al., 1994), baixo P (60 mg kg^{-1}) e alto P (180 mg kg^{-1}). O experimento seguiu um arranjo fatorial 10×3 em delineamento completamente casualizado com 5 repetições.

O experimento foi conduzido em vasos de 8 kg com substrato composto de areia e vermiculita (1:1, v/v) esterilizado. Nos vasos foram semeadas três sementes pré-germinadas de milho (*Zea mays*, variedade AS 1551 PRO2). O tratamento controle não foi inoculado. Nos demais tratamentos, no momento da semeadura procederam-se a inoculação com FMAs adicionando aproximadamente 200 esporos por vaso de cada isolado, junto às sementes. 15 dias após semeadura procedeu-se o desbaste das plântulas deixando uma planta por vaso.

A adubação fosfatada foi realizada misturando KH_2PO_4 aos substratos em quantidades necessárias para cada nível de P a ser testado. Para o cálculo da aplicação das doses do P nos vasos levou-se em consideração a curva de disponibilidade de P do substrato.

A umidade do substrato foi mantida na capacidade de campo e a adubação foi realizada conforme exigência da cultura, utilizando a solução nutritiva de Long-Ashton (BRUNDRETT et al., 1994) modificada, sem de fósforo nos tratamentos com as doses baixa e alta de P; e com 10 % de P para o controle. Foi aplicada ureia em solução para o fornecimento de nitrogênio as plantas, com dose de 30 kg ha^{-1} .

3.2.3 Análises

As amostras de raízes foram lavadas em peneiras de 2 mm para determinar a colonização micorrízica total (CT) e coloridas conforme proposto por Koske e Gemma (1989). As raízes foram submersas em solução de hidróxido de potássio (KOH) 10 % e

mantidas em banho-maria a 90 °C por 50 - 60 minutos. Em seguida, lavadas com água corrente (2 - 3 vezes) e imersas em solução de ácido clorídrico HCl 1 % por 10 minutos, após retirou-se o ácido e foi adicionado solução corante azul de tripan. As amostras permaneceram em banho-maria por mais 50 - 60 minutos até a coloração. Para determinação da colonização micorrízica foi seguida a metodologia proposta por McGonigle et al. (1990). Para este procedimento foram montadas três lâminas por amostra, com dez segmentos de raiz com aproximadamente 1 cm de comprimento para cada lâmina. Em cada lâmina se observou 200 pontos, avaliados quanto à presença de colonização por FMAs (hifas, vesículas, arbusculos e esporos) foram expressos em porcentagem de colonização considerando os valores de fragmentos colonizados em relação aos não colonizados, os valores de colonização foram calculados em arco seno $(x/100)^{1/2}$.

Os esporos (Esp) de FMAs foram extraídos de 50 g de substrato pela técnica de peneiragem úmida (GERDEMANN; NICOLSON, 1963), seguida por centrifugação em gradiente de sacarose 20 e 60 %. A amostra foi suspensa em 2 L de água por agitação, e a suspensão passada por peneiras sobrepostas de 710 e 45 µm. O material retido na peneira de 45 µm foi transferido para tubos de 50 ml, contendo o gradiente de sacarose e centrifugado a 2.000 rpm durante 1 min. O material retido na peneira de 45 µm foi lavado com água de torneira para retirar o excesso de sacarose e transferido para placas quadriculadas para a contagem.

A quantificação do comprimento de micélio extrarradicular total no solo foi realizada conforme descrito por Melloni (1996), representados neste estudo como comprimento de hifas (CH). Utilizou-se uma subamostra de substrato, com aproximadamente 10 g para a extração das hifas, sendo que uma segunda foi determinada a umidade após secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. A extração foi obtida pela suspensão das amostras de solo em 500 ml de água e passando-se o sobrenadante em peneiras sobrepostas, com malhas de 1 e 0,25 mm, repetindo três vezes esta operação e o filtrado foi submetido à agitação em liquidificador durante 30 segundos na menor velocidade. Após um período de repouso de 2 minutos, o sobrenadante foi passado por uma peneira de 0,053 mm, o material retido na peneira foi filtrado a vácuo em membrana quadriculada de triacetato de celulose, com diâmetro de 4,7 cm e porosidade de 0,47 µm. Esta membrana foi colocada sob lâmina de vidro de 5 x 5 cm, lubrificada com uma gota de óleo de amêndoas para facilitar a visualização no microscópio óptico. Foram avaliados 64 campos em cada membrana, determinando-se o número de intersecções de hifas com as linhas horizontais de uma grade (8 x 8 quadrículos de 1 mm) na ocular do microscópio no aumento de 162,5 vezes. Em uma das oculares se acoplou uma lente com grade de 20 x 20

quadrículos, para determinação do número de interseções das hifas com as linhas horizontais da grade da ocular. O comprimento das hifas, expresso em centímetros de hifa por grama de solo seco, foi obtido pela seguinte relação:

$$C = [(0,0347 \cdot N) / (10 - U)] \cdot 100, \text{ onde:}$$

C = comprimento de micélio extrarradicular total, em centímetros de hifa por grama de solo seco;

N = soma do número de interseções entre as hifas e linhas horizontais do gride;

U = umidade da amostra de solo, expressa em gramas de água.

A altura da planta (AP) foi medida e expressa em centímetros, assim como a massa seca da parte aérea (MSPA), fitomassa, expressa em gramas. A parte aérea foi separada das raízes, armazenada em sacos de papel e secas em estufa com ventilação forçada a uma temperatura de 60 °C até massa constante para determinação da MSPA.

A MSPA foi submetida à moagem e digestão ácida para a extração do fósforo (P) e nitrogênio (N) do tecido vegetal, conforme Tedesco et al. (1995). A determinação do teor de P foi realizada por espectrofotometria, conforme Murphy e Riley (1962) e do N pela destilação conforme Tedesco et al. (1995). As concentrações de P e N na planta foram usadas para calcular o acúmulo destes nutrientes na parte aérea das plantas.

No experimento II, o teor de clorofila A (CLOa) e B (CLOb) foram avaliados na folha, com o equipamento Clorofilog (FALKER – CFL1030), determinado com base na absorção de luz em comprimentos de onda característicos da clorofila.

3.2.4 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância fatorial e ao teste de médias (Tukey a 5 % de probabilidade) quando F era significativo, utilizando o programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004). Dados que não atenderam os pressupostos de homogeneidade da variância e distribuição normal foram transformados seguindo a transformação logarítmica de Box e Cox (1964), assumindo $\lambda = 0,1$ para obter a normalidade dos dados, utilizando o programa estatístico Minitab 17 (Minitab 17 Statistical Software) sob licença de uso acadêmico.

A transformação de Box e Cox transforma o valor observado y (positivo) em z, sendo λ uma constante que assume um valor entre -2 e 2, conforme a função:

$$z = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}$$

Os dados transformados foram submetidos à análise de variância e ao teste de comparação de médias (Tukey a 5 % de probabilidade).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Experimento I – isolados de FMAs submetidos a regimes de chuvas

A produção de fitomassa (massa seca da parte aérea, altura de planta) e o nitrogênio acumulado na parte aérea do milho foram influenciados pela inoculação dos FMAs e regimes de chuvas de forma independente. O teor de fósforo e o P acumulado na parte aérea do milho variaram com os regimes de chuvas e os isolados. A produção de hifas, a colonização radicular e a esporulação variaram com entre os regimes de chuvas para os isolados (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 - Resultado da análise de variância fatorial para o experimento com diferentes isolados de FMAs submetidos a três regimes de chuvas em milho (*Zea mays*).

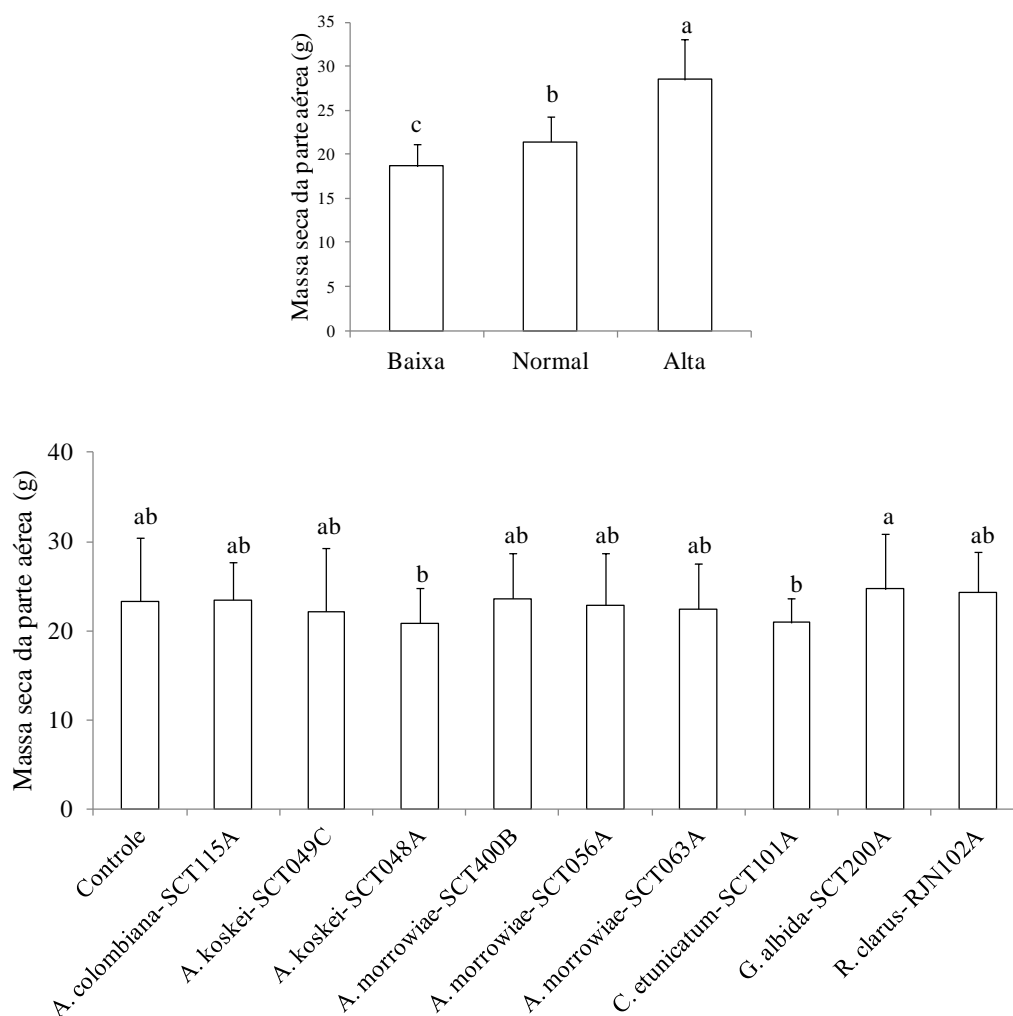
Fator de variação	MSPA	AP	P	P ac.	N	N ac.	CT	CH	Esp
<i>p</i>									
Isolados	0,01*	0,00**	0,00**	0,00**	0,13 ^{ns}	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**
Chuvas	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,04*
Isolados x Chuvas	0,09 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,01**	0,01**	0,07 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,01*	0,00**	0,00**

** significativo a 1 %. * significativo a 5 %. ns – não significativo. MSPA - massa seca de parte aérea. AP - altura da parte aérea. P - teor de fósforo da parte aérea. P ac. – fósforo acumulado na parte aérea. N - teor de nitrogênio da parte aérea. N ac. – nitrogênio acumulado na parte aérea. CT - colonização micorrízica total. CH - comprimento de hifas. Esp - número de esporos. n = 150. n = 135 para CT, CH e Esp.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A fitomassa foi alterada pelos regimes de chuvas, menor na condição de seca e maior na precipitação alta (Figura 1.1). Não apresentou variações entre os isolados e o controle. Efeitos positivos ocorreram com a inoculação da *Gigaspora albida* SCT200A (24,7 g) e negativos com a *Acaulospora koskei* SCT048A (20,8 g) e o *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A (20,9 g).

Figura 1.1 - Fitomassa do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas.

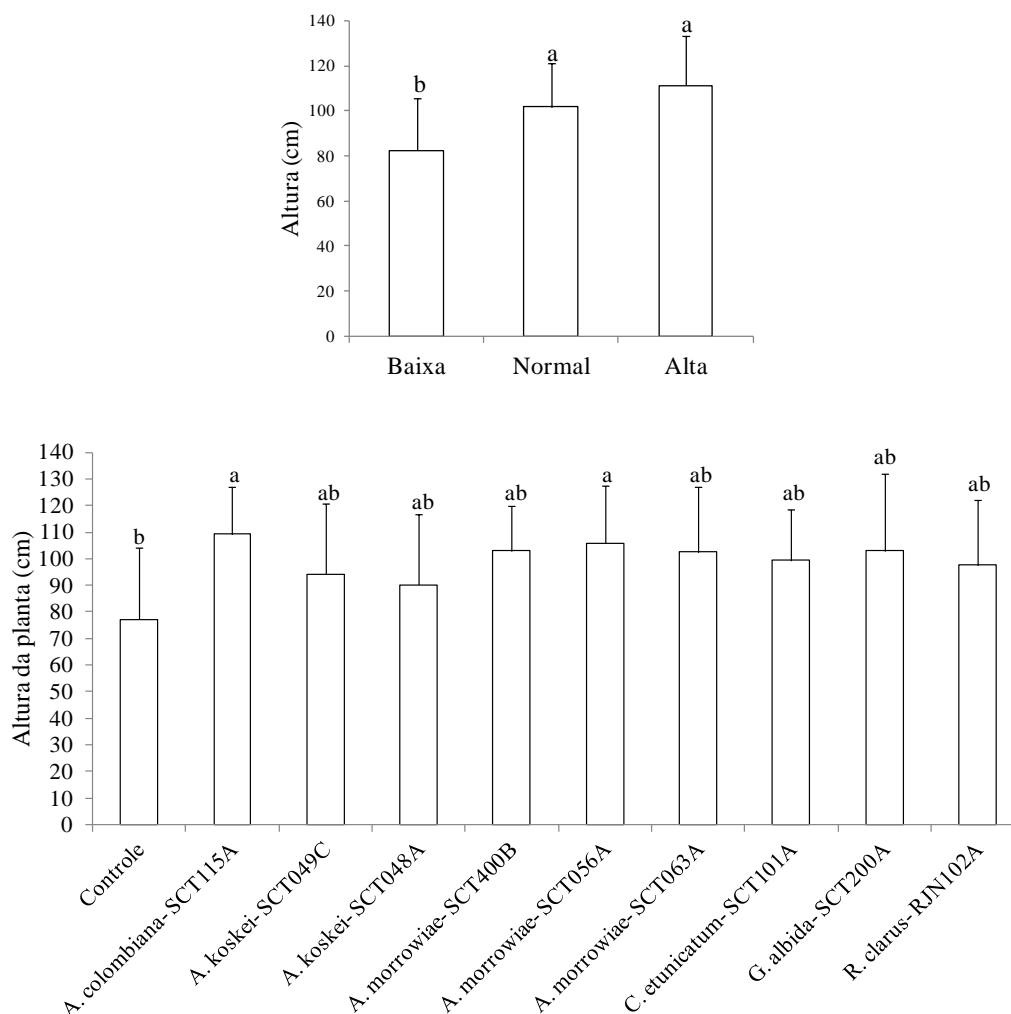


Médias comparadas entre os tratamentos, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (T) Desvio padrão. n = 50. n = 15.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Os regimes de chuva normal e alto não diferenciaram a altura da planta (Figura 1.2). O controle apresentou menor altura (77,2 cm) diferentemente dos tratamentos com os isolados *Acaulospora colombiana* SCT115A (109,3 cm) e *Acaulospora morrowiae* SCT056A (105,8 cm). Estes isolados representaram um incremento de 29 e 27 %, respectivamente na altura da planta em relação ao tratamento não inoculado (controle).

Figura 1.2 - Altura do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas.



Médias comparadas entre os tratamentos, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (⊥) Desvio padrão. n = 50. n = 15.
 Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A concentração de fósforo variou conforme o regime de chuva e o isolado (Tabela 1.3). A concentração e acúmulo de fósforo na planta foram maiores nos regimes de chuva alto, com $2,11 \text{ g kg}^{-1}$ e $53,8 \text{ mg planta}^{-1}$, respectivamente. A inoculação com a *Gigaspora albida* SCT200A proporcionou o aumento de fósforo (baixa $2,6 \text{ g kg}^{-1}$, normal $2,06 \text{ g kg}^{-1}$, alta $2,27 \text{ g kg}^{-1}$) e acumulado na parte aérea do milho (baixa $61,1 \text{ mg planta}^{-1}$, normal $46,8 \text{ mg planta}^{-1}$, alta $69,1 \text{ mg planta}^{-1}$) nos três regimes de chuvas, diferindo do controle. A inoculação com *Acaulospora koskei* STC049C, *Acaulospora morrowiae* STC400B e *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A, não aumentaram o teor de P na parte aérea do milho em todos os regimes de chuvas aplicados, quando comparados ao controle.

Tabela 1.3 - Fósforo na parte aérea do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas.

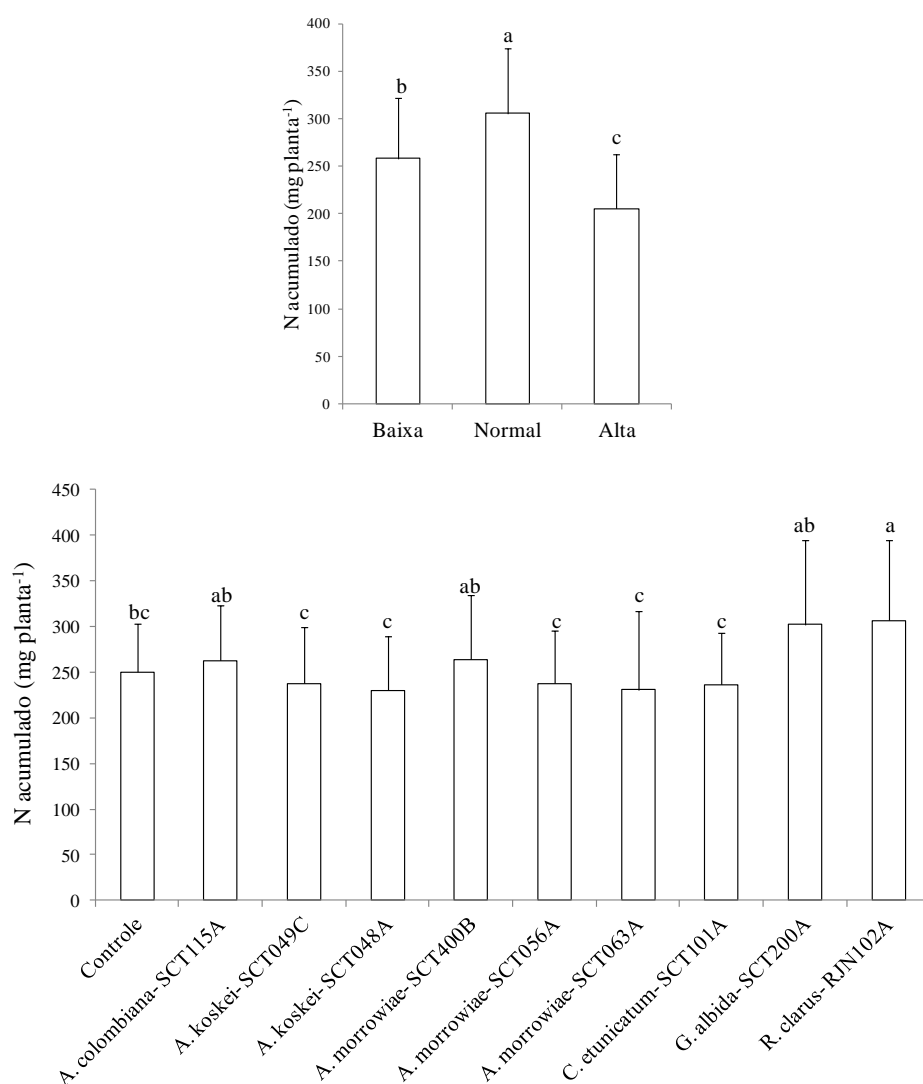
Tratamentos	----- P (g kg ⁻¹) -----			----- P ac. (mg planta ⁻¹) -----		
	Baixa	Normal	Alta	Baixa	Normal	Alta
Controle	1,18 c A	1,11 b A	1,48 b A	18,8 b B	26,3 c B	43,9 b A
<i>A. colombiana</i> SCT115A	1,16 c B	1,52 ab B	2,46 a A	23,4 b B	32,5 abc B	70,9 a A
<i>A. koskei</i> SCT049C	1,14 c A	1,77 ab A	1,94 ab A	20,0 b B	32,2 abc B	56,0 ab A
<i>A. koskei</i> SCT048A	1,39 bc B	2,02 a A	2,05 ab A	24,0 b B	42,8 ab AB	49,7 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	1,17 c B	1,38 b AB	1,56 b A	23,3 b B	28,3 bc B	47,0 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	1,62 ab AB	1,11 b B	2,08 ab A	28,8 b B	23,8 bc B	62,0 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	1,83 ab A	1,67 ab A	1,99 ab A	33,3 b B	35,7 abc B	54,3 ab A
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	1,05 c B	1,20 b AB	1,61 b A	19,6 b B	24,4 c B	37,9 b A
<i>G. albida</i> SCT200A	2,60 a A	2,06 a A	2,27 a A	61,1 a A	46,8 a A	69,1 a A
<i>R. clarus</i> RJN102A	1,69 ab A	1,26 ab A	1,67 ab A	35,8 b AB	29,3 bc B	47,0 ab A
Médias ¹	1,51 B	1,50 B	2,11 A	28,8 B	32,2 B	53,8 A
C.V. (%)	40,3	35,1	27,6	45,3	37,4	27,8

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. P - fósforo na parte aérea. P ac. - fósforo acumulado na parte área. n = 5. ¹n = 50. Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O acúmulo de P na planta, no regime de chuva baixo, foi maior no tratamento com a *Gigaspora albida* SCT200A (61,1 mg planta⁻¹), em relação aos demais tratamentos com FMAs e o controle. No regime de chuva alto, o fósforo acumulado na planta foi maior no tratamento com *Acaulospora colombiana* SCT115A (70,9 mg planta⁻¹) e *Gigaspora albida* SCT200A (69,1 mg planta⁻¹), diferindo do controle (43,9 mg planta⁻¹) e tratamento com *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A (37,9 mg planta⁻¹).

O teor de nitrogênio acumulado na parte aérea do milho variou separadamente entre os isolados e os regimes de chuvas (Figura 1.3). O regime de chuva médio proporcionou aumento do N acumulado na planta. O nitrogênio acumulado na planta foi menor nos tratamentos com isolados da família Acaulosporaceae, ocorrendo para as *Acaulospora koskei* SCT049C (238,0 mg planta⁻¹) e SCT048A (229,9 mg planta⁻¹) e as *Acaulospora morrowiae* STC056A (237,4 mg planta⁻¹) e SCT063A (230,7 mg planta⁻¹). O *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A (236,2 mg planta⁻¹) e o *Rhizophagus clarus* RJN102A (306,9 mg planta⁻¹), apresentaram respostas negativas e positivas, respectivamente, para o acúmulo de N na parte aérea da planta.

Figura 1.3 - Nitrogênio acumulado na parte aérea do milho para os tratamentos submetidos a diferentes regimes de chuvas.



Médias comparadas entre os tratamentos, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (┐) Desvio padrão. n = 50. n = 15.
 Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A condição de seca (chuva baixa) diminuiu a colonização micorrízica total (CT), diferindo dos regimes de chuva normal e alto, conforme a Tabela 1.4. A *Gigaspora albida* SCT200A apresentou maior CT, sem diferir entre os regimes de chuvas, com 54,9 %, 69 % e 71,5 %, na chuva baixa, normal e alta, respectivamente. Outros isolados apresentaram taxas altas de colonização na raiz sem variação significativa entre os regimes de chuvas, sendo estes a *Acaulospora morrowiae* STC056A e SCT063A, e *Acaulospora koskei* SCT048A. As menores taxas de colonização na raiz ocorreram no tratamento *Acaulospora morrowiae* SCT400B, com 31 % (baixa), 27,7 % (normal) e 21,7 % (alta). O *Claroideoglossum*

etunicatum SCT101A, apresentou a taxa de colonização da raiz influenciada pelos regimes de chuvas.

O comprimento de hifas (CH) variou entre a chuva baixa e alta, com 38,3 cm g⁻¹ e 51,5 cm g⁻¹, respectivamente (Tabela 1.4). A *Gigaspora albida* SCT200A apresentou maior CH no regime de chuva alta, com 73,9 cm g⁻¹. Os regimes de chuvas não influenciaram o comprimento de hifas nos tratamentos com os isolados da família Acaulosporaceae, exceto para a *Acaulospora morrowiae* SCT400B.

Tabela 1.4 - Colonização micorrízica total (CT) e comprimento de hifas (CH) para tratamentos submetidos a regimes de chuvas.

Tratamento	Baixa	Normal	Alta	Baixa	Normal	Alta
	----- CT (%) -----			----- CH (cm g ⁻¹) -----		
<i>A. colombiana</i> SCT115A	36,0 bcd B	41,5 cde AB	53,3 bc A	33,3 abc A	51,5 a A	53,6 ab A
<i>A. koskei</i> SCT049C	50,6 abc A	48,0 bcd A	59,0 ab A	49,1 ab A	47,7 ab A	30,9 bc A
<i>A. koskei</i> SCT048A	63,1 a A	66,0 ab A	64,0 ab A	47,0 ab A	50,7 a A	66,1 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	31,0 cd A	27,7 e AB	21,7 d B	26,2 bc B	29,0 ab AB	58,1 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	52,6 ab A	57,0 abc A	59,5 ab A	42,3 abc A	38,6 ab A	32,3 bc A
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	50,0 abc B	55,3 abc AB	63,0 ab A	55,2 a A	41,4 ab A	50,3 ab A
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	19,9 d C	31,6 de B	38,4 cd A	17,7 c B	54,0 a A	49,0 ab A
<i>G. albida</i> SCT200A	54,9 ab B	69,0 a A	71,5 a A	35,2 abc B	43,4 ab AB	73,9 a A
<i>R. clarus</i> RJN102A	40,1 bcd A	60,0 abc A	50,3 bc A	38,3 abc AB	28,6 b B	48,9 ab A
Médias ¹	39,8 B	45,6 A	48,1 A	38,3 B	42,8 AB	51,5 A
C.V. (%)	35,5	32,0	30,7	41,3	37,2	40,4

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. n = 5. ¹n = 45.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O número de esporos variou entre os tratamentos com FMAs (Tabela 1.5). O tratamento com *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A apresentou o maior número de esporos e com *Acaulospora koskei* SCT049C o menor. Os regimes de chuvas influenciaram o número de esporos nos tratamentos com *Acaulospora morrowiae* SCT400B e *Acaulospora morrowiae* SCT063A.

Tabela 1.5 - Número de esporos para tratamentos submetidos a regimes de chuvas.

Tratamento	Número de esporos ¹		
	Baixa	Normal	Alta
<i>A. colombiana</i> SCT115A	1,28 ab A	1,20 b A	1,22 bc A
<i>A. koskei</i> SCT049C	1,13 b A	1,16 b A	1,11 c A
<i>A. koskei</i> SCT048A	1,18 ab A	1,16 b A	1,25 bc A
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	1,19 ab B	1,31 ab AB	1,40 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	1,30 ab A	1,20 b A	1,29 bc A
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	1,19 ab B	1,25 b B	1,56 a A
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	1,37 a A	1,50 a A	1,37 ab A
<i>G. albida</i> SCT200A	1,34 a A	1,22 b A	1,27 bc A
<i>R. clarus</i> RJN102A	1,27 ab A	1,26 ab A	1,27 bc A
Médias ²	1,25 A	1,25 A	1,30 A
C.V. (%)	9,1	11,4	12,7

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ¹Os dados foram transformados segundo Box e Cox ($\lambda = 0,1$). n = 5. ²n = 45.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

3.3.2 Experimento II – isolados de FMAs submetidos a doses de fósforo

Determinadas características avaliadas relacionadas com a produção vegetal apresentaram interação entre o isolado de fungo micorrízico arbuscular e a dose de fósforo aplicada, sendo estas a massa seca da parte aérea, concentração e acumulação de fósforo e nitrogênio na parte aérea da planta e a clorofila a (Tabela 1.6). Em relação às características dos FMAs, o número de esporos apresentou interação entre isolados e doses, diferente da colonização radicular total e o comprimento de hifas, que não apresentaram interação destes fatores.

Tabela 1.6 - Resultado da análise de variância fatorial para o experimento com diferentes isolados de FMAs submetidos a doses de fósforo em milho (*Zea mays*).

Fator de variação	MSPA	AP	P	P ac.	N	N ac.	CLOa	CLOb	CT	CH	Esp
	<i>p</i>										
Isolados	0,00**	0,01**	0,00**	0,00**	0,00**	0,01**	0,34 ^{ns}	0,03*	0,00**	0,00**	0,00**
Doses	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**	0,33 ^{ns}	0,00**	0,00**
Isolados x Doses	0,00**	0,32 ^{ns}	0,00**	0,01**	0,00**	0,00**	0,01*	0,27 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,00**

** significativo a 1 %. * significativo a 5 %. ns – não significativo. MSPA - massa seca de parte aérea. AP - altura da parte aérea. P - teor de fósforo da parte aérea. N - teor de nitrogênio da parte aérea. P ac.- fósforo acumulado. N ac.- nitrogênio acumulado. CLOa – clorofila a. CLOb – clorofila b. CT - colonização micorrízica total. CH - comprimento de hifas. Esp - números de esporos. n = 150. n = 135 para CT, CH e Esp.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

As doses de P influenciaram de maneira diferente a fitomassa do milho (MSPA), conforme a Tabela 1.7. Apresentou média de 18,1 g no tratamento com fósforo reduzido (sem P), 25 g na dose baixa (60 mg kg⁻¹) e 16,1 g na dose alta (180 mg kg⁻¹).

Tabela 1.7 - Massa seca da parte aérea (MSPA) do milho submetida a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P).

Tratamento	Sem P	Baixa	Alta
	----- MSPA (g) -----		
Controle	15,0 c C	26,3 ab A	17,5 a B
<i>A. colombiana</i> SCT115A	21,9 ab B	25,8 ab A	16,3 a C
<i>A. koskei</i> SCT049C	17,0 c B	23,6 ab A	16,0 a B
<i>A. koskei</i> SCT048A	17,8 c B	25,5 ab A	15,9 a B
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	17,4 c B	25,6 ab A	16,9 a B
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	16,0 c B	24,1 ab A	16,0 a B
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	18,1 c B	24,6 ab A	15,8 a B
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	18,7 bc B	28,3 a A	14,9 a B
<i>G. albida</i> SCT200A	16,0 c B	21,7 b A	14,5 a B
<i>R. clarus</i> RJN102A	22,9 a A	23,9 ab A	17,3 a B
Médias ¹	18,1 B	25,0 A	16,1 C
C.V. (%)	16,0	12,3	10,4

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. n = 5. ¹n = 50.

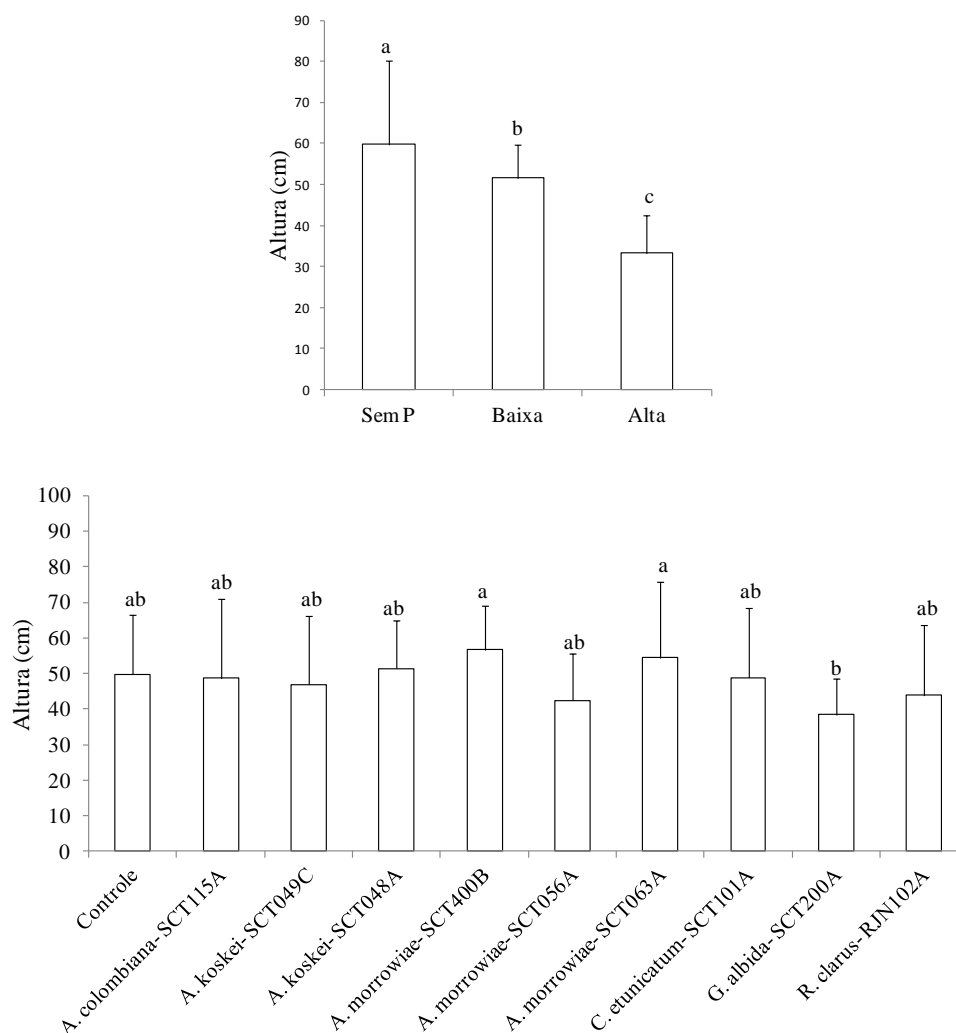
Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O *Rhizophagus clarus* RJN102A e *Acaulospora colombiana* SCT115A aumentaram a MSPA no tratamento com P reduzido (sem P) em relação ao controle. Na dose baixa, o

Claroideoglomus etunicatum SCT101A apresentou maior MSPA, com 28,3 g. Os tratamentos não diferiram entre si na dose alta.

A altura da planta (AP) foi influenciada separadamente pelas doses de P e inoculação (Figura 1.4). A maior dose de fósforo (180 mg kg^{-1}) teve efeito negativo na altura da planta. A AP foi maior para o tratamento com as *Acaulospora morrowiae* SCT400B (56,7 cm) e SCT063A (54,5 cm) diferindo da *Gigaspora albida* SCT200A, que apresentou menor altura (38,5 cm).

Figura 1.4 - Altura da parte aérea do milho para tratamentos submetidos a diferentes doses de fósforo.



Médias comparadas entre os tratamentos, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (σ) Desvio padrão. n = 50. n = 15.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A concentração de P na parte aérea da planta foi influenciada pelas doses de fósforo aplicadas, variando com as doses e inoculação (Tabela 1.8). O P acumulado na parte aérea foi menor no tratamento sem P. A inoculação com *Acaulospora morrowiae* SCT056A aumentou a concentração de fósforo na parte aérea da planta no tratamento com P reduzido e baixo e, aumentou o P acumulado nas três doses, sem P, baixo P (60 mg kg⁻¹) e alto P (180 mg kg⁻¹). A *Acaulospora koskei* SCT049C no tratamento sem P, apresentou a menor concentração de fósforo e acumulado na parte aérea da planta. O controle apresentou menor teor de P e acumulado na parte aérea do milho na dose alta de fósforo.

Tabela 1.8 - Teor de fósforo na parte aérea do milho submetido a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P).

Tratamentos	Sem P	Baixa	Alta	Sem P	Baixa	Alta
	----- P ¹ -----			----- P ac. ¹ -----		
Controle	0,98 d B	1,15 bc A	1,17 b A	1,32 cd B	1,61 abc A	1,45 b AB
<i>A. colombiana</i> SCT115A	1,05 bcd B	1,20 ab A	1,21 ab A	1,42 bc B	1,65 a A	1,61 ab A
<i>A. koskei</i> SCT049C	0,97 d C	1,18 abc B	1,25 ab A	1,29 d B	1,63 ab A	1,64 ab A
<i>A. koskei</i> SCT048A	0,98 d C	1,15 bc B	1,22 ab A	1,31 cd B	1,58 bc A	1,61 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	1,02 cd C	1,15 bc B	1,21 ab A	1,35 bcd B	1,60 abc A	1,61 ab A
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	1,19 a A	1,21 a A	1,25 ab A	1,57 a A	1,66 a A	1,65 a A
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	0,97 d C	1,14 c B	1,25 ab A	1,30 cd C	1,56 bc B	1,64 ab A
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	1,01 cd B	1,15 bc A	1,18 ab A	1,35 bcd B	1,60 abc A	1,54 ab A
<i>G. albida</i> SCT200A	1,12 b B	1,13 c B	1,28 a A	1,46 ab C	1,54 c B	1,67 a A
<i>R. clarus</i> RJN102A	1,09 bc B	1,15 bc A	1,21 ab A	1,46 ab B	1,58 bc A	1,61 ab A
Médias ²	1,03 C	1,16 B	1,22 A	1,38 B	1,60 A	1,60 A
C.V. (%)	7,30	2,93	4,25	7,37	2,90	6,13

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. P - fósforo na parte aérea. P ac. - fósforo acumulado na parte aérea. ¹Os dados foram transformados segundo Box - Cox ($\lambda = 0,1$). n = 5. ²n = 50.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

De acordo com a Tabela 1.9 o teor de N na parte aérea do milho apresentou variação para as doses de P e os tratamentos com FMAs. No tratamento com P reduzido, a *Gigaspora albida* SCT200A apresentou efeito positivo (20,4 g kg⁻¹) e o *Rhizophagus clarus* RJN102A negativo (13,2 g kg⁻¹), para a concentração de nitrogênio na parte aérea da planta. O *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A apresentou efeito negativo com a inoculação, na dose baixa de P (8,7 g kg⁻¹). Na dose baixa (60 mg kg⁻¹), com exceção do *Claroideoglossum*

etunicatum SCT101A que apresentou o menor valor (137 mg planta⁻¹), os demais tratamentos e o controle, apresentaram concentrações altas de N acumulado na parte aérea do milho.

Tabela 1.9 - Teor de nitrogênio na parte aérea do milho submetido a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P).

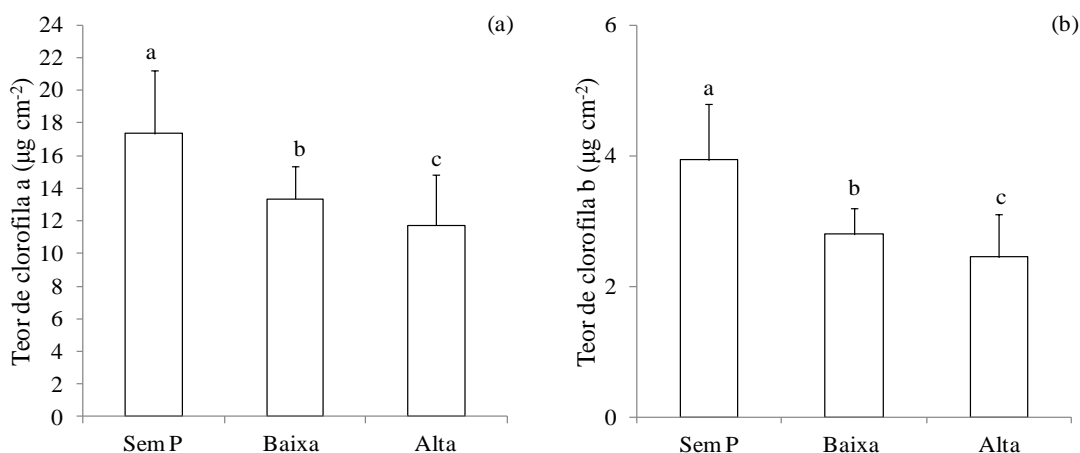
Tratamentos	Sem P	Baixa	Alta	Sem P	Baixa	Alta
	----- N (g kg ⁻¹) -----			-- N ac. (mg planta ⁻¹) --		
Controle	15,7 ab A	18,7 a A	15,0 ab A	238 ab A	495 a A	263 ab B
<i>A. colombiana</i> SCT115A	17,0 ab AB	19,0 a A	13,9 ab A	373 a A	489 a A	228 ab C
<i>A. koskei</i> SCT049C	14,7 ab B	19,1 a A	15,1 ab A	251 ab A	449 a A	244 ab B
<i>A. koskei</i> SCT048A	14,7 ab A	18,3 a A	14,4 ab A	265 ab B	467 a A	234 ab B
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	18,6 ab A	15,9 a A	13,9 ab A	329 ab AB	408 a A	232 ab B
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	14,3 ab A	15,5 a A	13,2 ab A	189 b B	375 ab A	211 b B
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	18,1 ab A	16,3 a A	12,1 b B	326 ab A	405 a A	191 b B
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	14,5 ab A	8,7 b B	14,1 ab A	272 ab A	137 b B	218 b AB
<i>G. albida</i> SCT200A	20,4 a A	18,8 a AB	13,6 ab B	329 ab A	409 a A	194 b B
<i>R. clarus</i> RJN102A	13,2 b A	16,5 a A	17,0 a A	307 ab A	395 ab A	298 a A
Médias ¹	16,1 A	16,3 A	14,2 B	287,8 B	402,9 A	231,3 C
C.V. (%)	27,2	26,6	19,1	35,3	27,8	24,5

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. N - nitrogênio na parte aérea. N ac. - nitrogênio acumulado na parte aérea. n = 5. ¹n = 50.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O teor de clorofila a e b variaram conforme a dose de fósforo (Figura 1.5). No tratamento com fósforo reduzido (sem P) a clorofila a e b apresentaram maiores teores desses pigmentos fotossintéticos, com 17,3 e 3,9 µg cm⁻², respectivamente.

Figura 1.5 - Teor de clorofila a (a) e b (b) para tratamentos submetidos a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P).

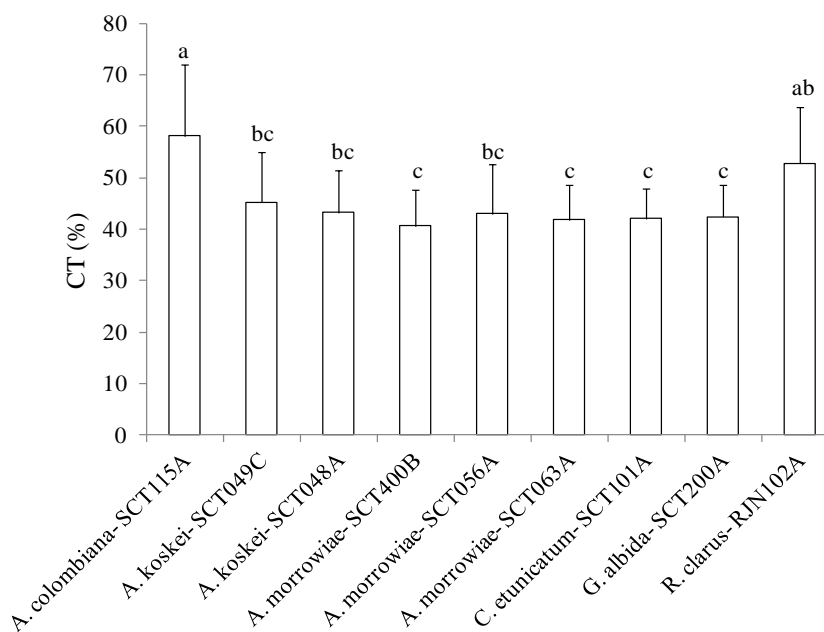


Médias comparadas entre as doses, para a mesma determinação, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (⊥) Desvio padrão. n = 50.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A colonização micorrízica radicular total (CT) foi influenciada pela inoculação dos fungos micorrízicos arbusculares (Figura 1.6). A *Acaulospora colombiana* SCT115A apresentou maior taxa de colonização com 58 %, não diferindo do *Rhizophagus clarus* RJN102A com 53 %. Os demais tratamentos com os isolados de FMAs não diferiram entre si, apresentado variações entre 40 e 45 % de colonização nas raízes do milho.

Figura 1.6 - Colonização total radicular para os tratamentos submetidos a diferentes doses de fósforo.

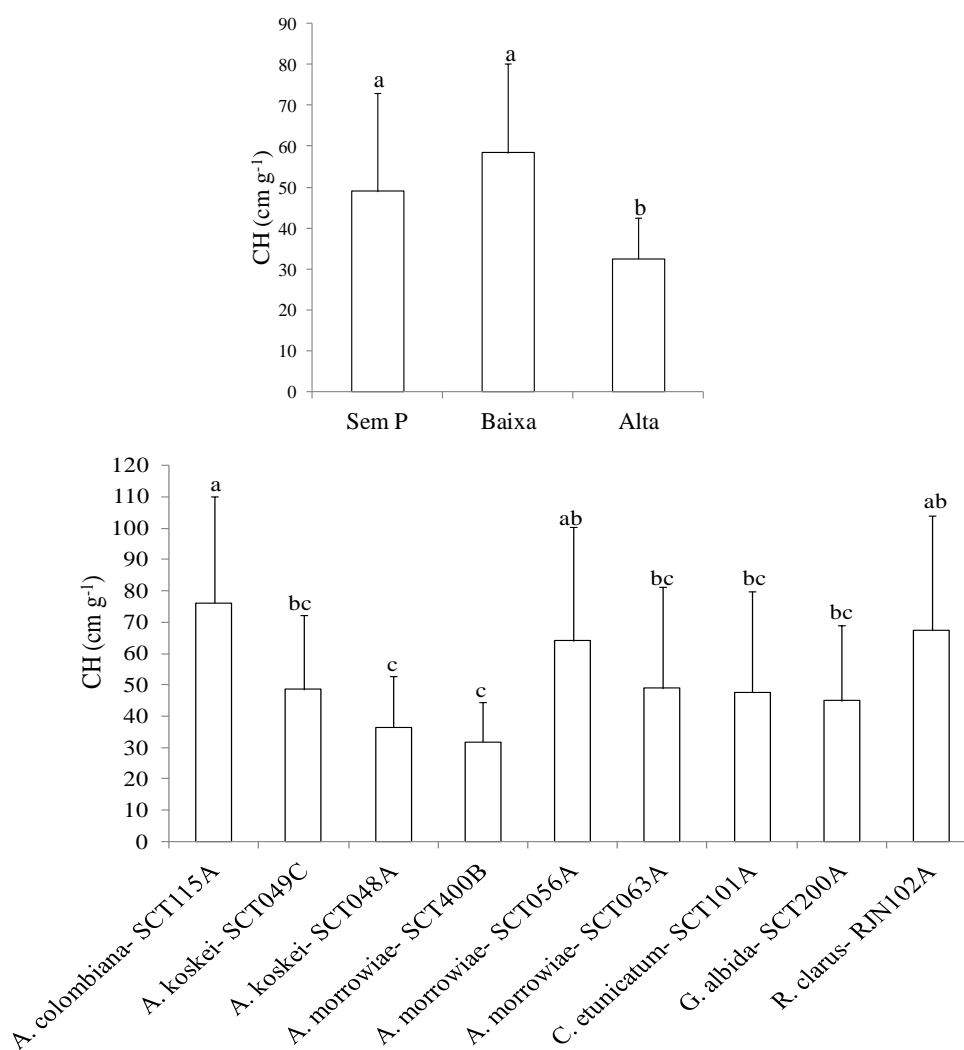


Médias comparadas entre os tratamentos, para a mesma determinação, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (⊥) Desvio padrão. n = 15.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O comprimento de hifas (CH) variou com a dose de fósforo e a inoculação dos FMAs separadamente (Figura 1.7). A dose alta de fósforo (180 mg kg^{-1}) diminuiu o comprimento de hifas. O CH foi maior no tratamento com *Acaulospora colombiana* SCT115A, apresentando 76 cm g^{-1} de substrato, e menor para *Acaulospora koskei* SCT048A e *Acaulospora morrowiae* SCT400A, com 36 e 32 cm g^{-1} de substrato, respectivamente.

Figura 1.7- Comprimento de hifas para os tratamentos submetidos a diferentes doses de fósforo.



Médias comparadas entre os tratamentos, para a mesma determinação, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. (T) Desvio padrão. n = 45. n = 15.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A esporulação variou com as doses de fósforo e os tratamentos com FMAs (Tabela 1.10). O aumento da dose de fósforo aplicada diminuiu a esporulação dos FMAs. A inoculação com *Acaulospora colombiana* SCT115A, *Acaulospora morrowiae* SCT056A e

Claroideoglossum etunicatum SCT101A apresentaram o maior número de esporos. As *Acaulospora koskei* SCT049C e SCT048A tiveram a menor esporulação quando comparados com os demais tratamentos com FMAs.

Tabela 1.10 - Número de esporos para tratamentos submetidos a duas doses de fósforo (baixa - 60 mg kg⁻¹ e alta - 180 mg kg⁻¹) e o controle (sem P).

Tratamento	Sem P	Número de esporos ¹	
		Baixa	Alta
<i>A. colombiana</i> SCT115A	1,98 a A	1,83 ab A	1,60 abc B
<i>A. koskei</i> SCT049C	1,62 bc A	1,36 e B	1,50 abc AB
<i>A. koskei</i> SCT048A	1,60 c A	1,41 de A	1,41 c A
<i>A. morrowiae</i> SCT400B	1,87 abc A	1,81 ab AB	1,59 abc B
<i>A. morrowiae</i> SCT056A	1,90 ab A	1,86 ab AB	1,67 ab B
<i>A. morrowiae</i> SCT063A	1,84 abc A	1,68 bc A	1,71 a A
<i>C. etunicatum</i> SCT101A	1,94 a A	1,98 a A	1,58 abc B
<i>G. albida</i> SCT200A	1,72 bc A	1,69 bc A	1,58 abc A
<i>R. clarus</i> RJN102A	1,60 c A	1,58 cd AB	1,47 bc B
Médias ²	1,79 A	1,69 B	1,57 C
C.V. (%)	10,8	12,9	8,8

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ¹Os dados foram transformados segundo Box e Cox ($\lambda = 0,1$). n = 5. ²n = 45.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

3.4 DISCUSSÃO

As diferentes condições hídricas influenciaram a produção vegetal. A inoculação aumentou a altura da planta no tratamento com *Acaulospora colombiana* SCT115A e *Acaulospora morrowiae* SCT056A, no experimento I. O clima influencia diretamente a produtividade, formação da associação e estabelecimento das comunidades de FMAs, pela maior disponibilidade hídrica e altas temperaturas, e indiretamente, pela maior necessidade nutricional e hídrica das plantas conforme condições da época (SANTOS et al., 2014).

A inoculação dos FMAs não proporcionou aumentos da fitomassa (massa seca e altura) do milho na condição de seca, porém, alguns isolados aumentaram a nutrição de P em relação ao controle. A inoculação com fungos micorrízicos arbusculares pode aumentar a tolerância das plantas a estresses ambientais, como o estresse hídrico, em condições de seca (TANG et al., 2009; LENOIR et al., 2016). Nestas condições, plantas micorrizadas tem maior

resistência ao estresse hídrico, mesmo que ocorra a diminuição da massa seca e o teor de nutrientes da planta, a rehidratação após a seca ocorre mais rapidamente (ZHAO et al., 2015).

A fitomassa e altura do milho diminuíram no regime de chuva baixo e na dose de P alta. A dose alta de fósforo aumentou o P na parte aérea e diminuiu a fitomassa. O maior regime de chuva aumentou a fitomassa e altura do milho. A eficiência dos FMAs diminuiu com altas doses de P (HIPPLER et al., 2011), já o estresse hídrico e excesso de P no solo pode prejudicar o milho durante o seu ciclo vegetativo (VASCONCELLOS et al., 2000). Esses fatores influenciaram a massa seca da parte aérea, que foi significativamente menor na dose de P alta (180 mg kg^{-1} de P_2O_5), de acordo com a Tabela 1.7.

O aumento do crescimento de plantas micorrízicas é favorecido em solos com baixa ou moderada fertilidade (MATHIMARAN et al., 2017). O substrato utilizado nos experimentos, composto por areia e vermiculita, apresenta rápida drenagem e saturação por fósforo, por ser um substrato arenoso. A saturação dos solos por fósforo pode ser mais iminente em solos arenosos, que apresentam menor quantidade de cargas positivas com menor capacidade máxima de adsorção de fósforo, assim, em solos mais saturados, o fósforo pode permanecer em maiores concentrações em solução ou solúvel em água (NOVAIS et al., 2007).

As diferentes doses de fósforo influenciaram a fitomassa do milho, concentração de P e N. Doses elevadas de fósforo diminuíram a esporulação e o comprimento de hifas. Em um estudo realizado por Machineski et al. (2011) com adubação fosfatada em mamoeiro, a adição de doses de P influenciou a produção de matéria seca e os teores de P no tecido, e diminuiu a colonização radicular e o número de esporos de FMAs. O aumento dos teores de P na parte aérea ocorreu pelo aumento da adição no solo, independente da inoculação.

Além da nutrição de fósforo as plantas, os FMAs podem fornecer outros nutrientes às plantas como é o caso do nitrogênio (GARG, CHANDEL, 2010; MOREIRA et al., 2010; HODGE, STORER, 2015), cobre e zinco (SMITH et al., 2004; GARG, CHANDEL, 2010). Neste estudo, a inoculação com o *Rhizophagus clarus* RJN102A aumentou o nitrogênio acumulado na parte aérea do milho, nas diferentes condições hídricas. No experimento com fósforo, determinados isolados incrementaram o nitrogênio na fitomassa do milho, no entanto, sem diferenciar do controle. O papel dos FMAs na aquisição N ainda é questionável, embora possam facilitar mineralização do N orgânico (MILLER; CRAMER, 2004). Alguns autores não encontram resultados significativos com inoculação de FMAs no aumento de N para as plantas (RINAUDO et al., 2010).

Freitas et al. (2006) na avaliação de espécies de FMAs, concluíram que na ausência da adubação fosfatada, a inoculação com *Gigaspora margarita* e *Glomus clarum* promoveram incrementos na produção de fitomassa da menta e nos conteúdos de N, P e K. Já o *Claroideoglomus etunicatum* e a *Acaulospora scrobiculata* não provocaram a mesma resposta positiva na planta.

Neste estudo, a condição de estresse nutricional, no tratamento com fósforo reduzido, aumentou o teor de clorofila a e b nas folhas do milho, sem influencia da inoculação. As clorofilas são os pigmentos fotossintéticos naturais presentes nas plantas e ocorrem nos cloroplastos das folhas (STREIT et al., 2005). Condições edáficas, como a acidez do solo (CAIRES; ROSOLEM, 1999), condições de estresse hídrico, podem alterar a capacidade fotossintética e modificar as clorofilas nas folhas (GONÇALVES et al., 2010; SILVA et al., 2014).

Além disso, a associação micorrízica pode aumentar o teor de clorofila das folhas de plantas crescendo sob condições de estresse, apresentando folhas mais verdes, sugerindo que o estresse interfere na síntese de clorofila (COLLA et al., 2008). Abdelmoneim et al. (2014) encontraram valores mais elevados de clorofila em plantas inoculadas, sob condições de seca quando comparadas com tratamento sem inoculação e irrigação normal.

As condições de diferentes regimes de chuvas não influenciaram a taxa de colonização micorrízica total nas raízes do milho, nos tratamentos com isolados *Acaulospora koskei* STC049C e SCT048A, *Acaulospora morrowiae* STC056A e *Rhizophagus clarus* RJN102A (Tabela 1.4). As doses de fósforo não influenciaram a colonização na raiz (Tabela 1.6), ocorrendo variação conforme o isolado, maior para *Acaulospora colombiana* SCT115A. Condições ambientais e a quantidade de P disponível e absorvida pela planta podem influenciar a colonização das raízes (CAVALCANTE et al., 2009).

Contudo, maiores taxas de colonização na raiz não se associaram necessariamente ao incremento de P nos tecidos das plantas, nos experimentos com chuvas e doses de P. Este resultado também foi encontrado por Costa et al. (2012), com variações de 62 % na taxa de colonização das raízes, onde a inoculação com *Scutellospora heterograma* apresentou a menor CT (38,5 %) e o maior teor de P na planta (0,124 %).

Dos parâmetros relacionados com as características dos FMAs, a colonização micorrízica total (Figura 1.6) e o número de esporos (Tabela 1.10), não apresentaram variações significativas intraespecíficas para os FMAs, *Acaulospora koskei* (SCT049C, SCT048A) e *Acaulospora morrowiae* (SCT0400B, SCT056A, SCT063A). Já para o comprimento de hifas (Figura 1.7), houve variação intraespecífica entre as *Acaulospora*

morrowiae SCT056A e a SCT0400B. No caso dos fungos micorrízicos arbusculares, grandes variações podem ocorrer dentro e entre espécies e gêneros, modificando os padrões de respostas de crescimento das plantas (HART, READER, 2002; MUNKVOLD et al., 2004).

O comprimento de hifas variou entre os isolados de FMAs (Tabela 1.4, Figura 1.7) não apresentando o mesmo comportamento quando submetidos a diferentes condições hídricas e nutricionais. No experimento com doses de P, a *Acaulopora morrowiae* SCT400B apresentou baixo comprimento de hifas e colonização radicular, mas apresentou incremento na altura da planta. A *Acaulospora colombiana* SCT115A apresentou alto comprimento de hifas quando submetido às diferentes doses de P e regime de chuva normal.

Nogueira e Cardoso (2000) encontraram efeitos negativos das doses de P sobre o micélio externo ativo, nos tratamentos com inoculação de fungos micorrízicos arbusculares, a partir de 30 dias de condução do experimento. O mesmo foi verificado neste estudo, a maior dose de fósforo diminuiu o comprimento de hifas no substrato.

As hifas estão relacionadas com a absorção de nutrientes do solo, em especial do P, na translocação e disponibilização desses nutrientes para células contendo arbúsculos no córtex de raízes de plantas e sua eficiência está relacionada com a concentração de P na solução do solo, e crescimento do micélio (BERBARA et al., 2006).

A esporulação variou conforme o isolado e as condições abióticas. O tratamento com P reduzido aumentou o número de esporos para inoculação da *Acaulospora colombiana* SCT115A. Nos regimes de chuvas a *Acaulospora koskei* SCT049C apresentou a menor esporulação.

Abdelmoneim et al. (2014), trabalharam com a espécie *Glomus mosseae* em milho sob condições de irrigação normal e seca, e inoculação de 300, 600 e 900 esporos do FMA por vaso. Encontraram como resultados que na condição de chuva normal, o número de esporos não influenciou a altura da planta, mas foi diferente do controle e na condição de seca somente o tratamento com 900 esporos foi eficaz e não diferiu do regime normal. Neste mesmo trabalho, a MSPA foi diferente na condição de chuva normal, maior nos tratamentos com 600 e 900 esporos e, na seca foi maior no tratamento com 900 esporos, semelhante ao tratamento com 600 esporos na condição normal. O teor de fósforo na planta aumentou proporcionalmente com o aumento no número de esporos nas duas condições hídricas. A eficácia da manutenção da produtividade da planta em condição de estresse hídrico foi relacionada com o número de esporos inoculados nos vasos.

A *Gigaspora albida* SCT200A foi eficiente em manter a nutrição da planta relacionada com o fósforo sob todas as condições de chuvas. Em outro estudo com mudas de

maracujazeiro-doce, apesar de não existir especificidade de hospedeiro na associação micorrízica arbuscular, apenas a *Gigaspora albida* promoveu respostas significativas na planta, indicando a existência de maior compatibilidade funcional entre esses simbioses (SILVA et al., 2004).

Os FMAs apresentam diferenças em termos de eficiência na produtividade vegetal (VAN DER HEIJDEN et al., 1998). As respostas das plantas e dos FMAs podem ser diferenciadas e altamente específicas em determinadas condições edáficas e ambientais (KLIRONOMOS, 2003). Neste estudo, as diferentes condições hídricas e nutricionais determinaram respostas diferentes no milho e nas características dos FMAs, para o mesmo isolado inoculado.

Com vista na produção de inoculantes de fungos micorrízicos, os isolados devem ser eficientes na promoção do crescimento das plantas sobre condições bióticas e abióticas adversas. Os fungos micorrízicos arbusculares isolados, provenientes de diferentes sistemas de uso, podem ser resistentes ao estresse e considerados uma ferramenta potencial biotecnológica para a inoculação de plantas (LEONIR et al., 2016).

3.5 CONCLUSÕES

A inoculação e os regimes de chuvas influenciaram a resposta do milho na concentração e acumulação de fósforo na parte aérea da planta e as características dos fungos micorrízicos (colonização radicular, o comprimento de hifas e o número de esporos). A chuva alta aumentou a fitomassa e a concentração e acumulação de fósforo na parte aérea do milho.

A *Acaulospora colombiana* SCT115A promoveu incremento na altura da planta e aumentou a concentração e acumulação de fósforo na parte aérea do milho na condição de chuva alta.

A *Gigaspora albida* SCT200A foi eficiente em manter elevada a fitomassa e nutrição de fósforo na parte aérea do milho, em todas as condições de chuvas. Apresentou alta colonização micorrízica radicular.

O *Rhizophagus clarus* RJN102A proporcionou o aumento do nitrogênio acumulado na parte aérea do milho, quando submetido a diferentes regimes de chuvas.

A inoculação e as doses de fósforo apresentaram interação na resposta do milho para a fitomassa, concentração e acúmulo de fósforo na parte aérea da planta.

A *Acaulospora morrowiae* SCT056A manteve a concentração e acumulação de fósforo na planta elevada independente da dose de fósforo, apresentando alto comprimento de hifas e número de esporos.

A *Acaulospora morrowiae* SCT400B apresentou baixo comprimento de hifas e colonização radicular, com incremento na altura da planta, nos tratamentos com doses de fósforo.

As respostas das espécies de FMAs e benefícios as plantas variaram com as condições ambientais impostas.

REFERÊNCIAS

- ABDELMONEIM, T. S.; MOUSSA, T. A. A.; ALMAGHRABI, O. A.; ALZHRANI, H. S.; ABDELBAGI, I. Increasing Plant Tolerance to Drought Stress by Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi. **Life Science Journal**, s.l., v.11, p. 10-17, 2014.
- ABIALA, M. A.; POPOOLA, O. O.; OLAWUYI, O. J.; OYELUDE, J. O.; AKANMU, A. O.; KILLANI, A. S.; OSONUBI, O.; ODOBE, A. C. Harnessing the Potentials of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal (VAM) Fungi to Plant Growth – A Review. **International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology**, s.l., v.14, p.61-79, 2013.
- BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, M. S. (Ed). **Nutrição Mineral de Plantas**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2006. 432 p.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Society**, s.l., v. 26, p. 211-252, 1964.
- BRUNDRETT, M.; MELVILLE, L.; PETERSON, L. **Practical Methods in Mycorrhiza Research**. Waterloo: Mycologue Publications, 1994. 80 p.
- CAIRES, E. F.; ROSOLEM, C. A. Efeitos da calagem, cobalto e molibdênio sobre a concentração de clorofila nas folhas de amendoim. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 79-84, 1999.
- CARDOSO, E. J. B. N.; CARDOSO, I. M.; NOGUEIRA, M. A.; BARETTA, C. R. D. M.; PAULA, A. M. Micorrizas arbusculares na aquisição de nutrientes. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Eds). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. p. 153-214, Lavras: UFLA, 2010.
- CAVALCANTE, U. M. T.; GOTO, B. T.; MAIA, L. C. Aspectos da simbiose micorrízica arbuscular. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 5, p. 180-208, 2009.
- COLLA, G.; ROUPHAEL, Y.; CARDARELLI, M.; TULLIO, M.; RIVERA, C. M.; REA, E. Alleviation of salt stress by arbuscular mycorrhizal in zucchini plants grown at low and high phosphorus concentration.. **Biology and Fertility Soils**, s.l., v. 44, p. 501-509, 2008.
- COSTA, E. L.; PAULINO, V. T.; COSTA, R. S. C.; PEREIRA, R. G. A.; TOWNSEND, C. R.; MAGALHÃES, J. A. Efeito de micorrizas arbusculares sobre o crescimento e nutrição

mineral de *Brachiaria brizantha* CV. Marandu. **Ciência Animal Brasileira**, s.l., v. 13, p. 406-411, 2012.

FREITAS; M. S. M.; MARTINS; M. A.; CARVALHO, A. J. C. Crescimento e composição mineral da menta em resposta à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada. **Horticultura Brasileira**, v. 24, p. 11-16, 2006.

GARG, N.; CHANDEL, S. Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, s.l., 2010, v. 30, p. 581-599, 2010.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 46, p. 235-244, 1963.

GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. P.; DUARTE, W. G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p. 378-386, 2010.

HART, M. M.; READER, R. J. Host plant benefit from association with arbuscular mycorrhizal fungi: variation due to differences in size of mycelium. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 36, p. 357–366, 2002.

HIPPLER, F. W. R. et al. Fungos micorrízicos arbusculares nativos e doses de fósforo no desenvolvimento do amendoim RUNNER IAC 8861. **Revista Ciência Agronômica**, s.l., v. 42, p. 605-610, 2011.

HODGE, A. STORER. K. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. **Plant Soil**, Hague, v. 386, p. 1-19, 2015.

KLIRONOMOS, J. N. Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. **Ecology**, Tempe, v. 84, p. 2292-2301, 2003.

KOSKE, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycology Research**, Amsterdam, v. 92, p.486- 488, 1989.

KUHN, G.; HIJRI, M.; SANDERS, I. R. Evidence for the evolution of multiple genomes in arbuscular mycorrhizal fungi. **Nature**, London, v. 414, p. 745–748, 2001.

LENOIR, I.; FONTAINE, J.; SAHRAOUI, A. L-H. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. **Phytochemistry**, s.l., v. 123, p. 4-15, 2016.

MACHINESKI, O.; BALOTA, E. L.; SOUZA, J. R. P. Resposta da mamoneira a fungos micorrízicos arbusculares e a níveis de fósforo. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, p. 1855-1862, 2011.

MATHIMARAN, N.; MAHAVEER, P. S.; MOHAN, R. B.; BAGYARAJ, D. J. Mycosphere Essay 17 Arbuscular mycorrhizal symbiosis and drought tolerance in crop plants. **Mycosphere**, s.l., v. 8, p. 361-376, 2017.

McGONIGLE, T. P. MILLER, M. H.; EVANS, D. G.; FAIRCHILD, G. L.; SWAN, J. A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Saint Paul, v.115, p.495-501, 1990.

MELLONI, R. **Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas**. 1996. 83 f. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1996.

MILLER, A. J.; CRAMER, M.D. Root nitrogen acquisition and assimilation. **Plant and Soil**, s.l., v. 274, p. 1-36, 2004.

MINUZZI, R. B. Tendências na variabilidade climática de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.1288-1293, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; FARIA, S. M.; BALEIRO, F. C.; FLORENTINO, L. A. Bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares em espécies florestais: avanços e aplicações biotecnológicas. In: **Biotecnologia Aplicada à Agricultura**. Embrapa Informação Tecnológica, Instituto agrônômico de Pernambuco, v. 761, p. 456-468, 2010.

MUNKVOLD, L.; KJOLLER, R.; VESTBERG, M.; ROSENDAHL, S.; JAKOBSEN, I. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Cambridge, v. 164, p. 357-364, 2004.

MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chemical Acta**, Oxford, v. 27, p. 31-36, 1962.

- NOGUEIRA, M. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Produção de micélio externo por fungos micorrízicos arbusculares e crescimento da soja em função de doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 329-338, 2000.
- NOVAIS, C. B.; BORGES, W. L.; JESUS, E. C.; SAGGIN-JÚNIOR, O. J.; SIQUEIRA, J. O. Inter- and intraspecific functional variability of tropical arbuscular mycorrhizal fungi isolates colonizing corn plants. **Applied Soil Ecology**, Barcelona, v. 76, p. 78-86, 2014.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V., H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 472-550, 2007.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.
- RINAUDO, V.; BÀRBERI, P.; GIOVANNETTI, M.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Mycorrhizal fungi suppress aggressive agricultural weeds. **Plant Soil**, Hague, v. 333, p. 7-20, 2010.
- SANTOS, R. S.; BARRETO, P. A. B.; SCORIZA, R. N. Efeito da sazonalidade na comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em um fragmento de mata de cipó em Vitória da Conquista, Bahia. **Revista Brasileira de Biociência**, Porto Alegre, v. 12, p. 46-51, 2014.
- SILVA, M. A., CAVALCANTE, U. M. T.; SILVA, F. S. B.; SOARES, S. A. G.; MAIA, L. C. Crescimento de mudas de maracujazeiro-doce (*Passiflora alata* Curtis) associadas a fungos micorrízicos arbusculares (Glomeromycota). **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 18, p. 981-985, 2004.
- SILVA, M. A.; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIN, A. F. L. Pigmentos fotossintéticos e índice spad como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em canade-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 173-181, 2014.
- SIQUEIRA, J. O.; SAGGIN-JUNIOR, O. J. The importance of mycorrhizae association in natural in low fertility. In: MACHADO, A. T.; MAGNAVACA, R.; PANDEY, S.; SILVA; A. F. (Eds.). **Poc. Int. Symposium on Environmental Stress: maize in perspective**, 3. Embrapa - CNPMS, Minas Gerais, p. 240-280, 1992.
- SMITH, S. E.; SMITH, F. A.; JAKOBSEN, I. Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with

mycorrhizal responses in growth or total P uptake. **New Phytologist**, Cambridge, v. 162, p. 511-524, 2004.

STATSOFT. **STATISTICA 7.0 (data analysis software system)**. [s.l]. 2004. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>> Acesso em: 15 abr. 2017.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H. As Clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.748-755, 2005.

TANG, M.; CHEN, H.; HUANG, J. C.; TIAN, Z. Q. AM fungi effects on the growth and physiology of *Zea mays* seedlings under diesel stress. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, p. 936-940, 2009.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; KLIRONOMOS, J. N.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF, E. R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. **Nature**, London, v. 396, p. 69-72, 1998.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A., SCHEUBLIN, T. R. Functional traits in mycorrhizal ecology: their use for predicting the impact of arbuscular mycorrhizal fungal communities on plant growth and ecosystem functioning. **New Phytologist**, v. 174, p. 244-250, 2007.

VASCONCELLOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; ALVES, V. M. C. Fósforo para o milho? **Revista Cultivar Grandes Culturas**, Embrapa Milho e Sorgo, v. 12, 2000.

VELTHORST, E. J. **Manual for Chemical Water Analysis**. Wageningen: Agricultural University. 1993.

ZHAO, R.; GUO, W.; BI, N.; GUO, J.; WANG, L.; ZHAO, J.; ZHANG, J. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress. **Applied Soil Ecology**, Barcelona, v. 88, p. 41-49, 2015.

4 CAPÍTULO II

DISSIMILARIDADE FUNCIONAL EM MODELOS DE ECOSISTEMAS TERRESTRES (TMES): INTERAÇÃO COM A BIOTA DO SOLO

RESUMO

O sistema solo-planta-organismos está sujeito a grandes variações ocasionadas por fatores ambientais e de manejo. Os organismos edáficos e suas interações desempenham importante papel na ciclagem de nutrientes, nutrição das plantas e na manutenção da qualidade do solo. Este experimento teve o objetivo de avaliar o efeito da dissimilaridade funcional no solo promovido pela introdução de populações de minhocas (epígeas e endógeas), colêmbolos (epígeos, hemiedáficos e edáficos) e fungos micorrízicos arbusculares de diferentes famílias (Acaulosporaceae, Gigasporaceae e Glomeraceae) nos modelos de ecossistemas terrestres – TMES (mesocosmos), separadamente e em combinações. Amostras de solo não perturbadas foram coletadas com as colunas dos TMES (40 cm de profundidade e 17 cm de diâmetro) no sistema plantio direto (PD), em Nitossolo Bruno, Campo Belo do Sul – SC, e conduzidos em ambiente controlado, na UDESC/ Lages - SC. Após o período de aclimação dos mesocosmos, realizou-se a semeadura da aveia preta e a inoculação no sistema dos fungos micorrízicos arbusculares, minhocas e colêmbolos. O experimento seguiu delineamento completamente casualizado com 4 repetições e 12 controles. Foram avaliadas as seguintes características: produtividade vegetal (fitomassa, concentração de P e N), simbiose micorrízica (comprimento de hifas, colonização micorrízica total, esporos), parâmetros microbianos (carbono e quociente microbiano), atividade enzimática, parâmetros físicos (argila e estabilidade de agregados), parâmetros químicos (fracionamento da matéria orgânica do solo, C, N, entre outros) e a decomposição da serapilheira. Os resultados da análise de variância mostraram que as variáveis, colonização micorrízica total, comprimento de hifas, carbono microbiano, quociente microbiano e N acumulado no tecido vegetal foram sensíveis à diversidade funcional ocasionada com a inoculação de organismos edáficos em sistema de plantio direto. A inoculação do fungo micorrízico arbuscular *Gigaspora albida* influenciou os serviços relacionados com a produção vegetal e simbiose micorrízica no sistema de plantio direto. O tratamento de interação entre minhocas e fungos micorrízicos arbusculares proporcionou aumento do C microbiano no solo. A inoculação de minhocas epígeas diminuiu o C e quociente microbiano no solo. A colonização micorrízica radicular diminuiu no tratamento com minhocas epígeas e endógeas.

Palavras-chave: Plantio direto. Mesocosmos. Serviços ecossistêmicos. Organismos edáficos.

FUNCTIONAL DISSIMILARITY IN TERRESTRIAL MODEL ECOSYSTEMS (TMES): INTERACTION WITH SOIL BIOTA

ABSTRACT

The soil-plant-organisms system is subject to large variations due environmental factors and management. Edaphic organisms and their interactions play an important role in nutrients cycling, plant nutrition and soil quality maintenance. The objective of this experiment was to evaluate the effect of functional dissimilarity in soil promoted by the introduction populations of earthworm (epigeous, endogenous), springtails (epigeous, hemiedaphic, edaphic) and arbuscular mycorrhizal fungi of different families (Acaulosporaceae, Claroideoglomeraceae, Gigasporaceae, Glomeraceae) in terrestrial ecosystem models - TMEs (mesocosms) separately and in combinations. Samples of undisturbed soils were collected with TME columns (40 cm depth and 17 cm diameter) in the no - tillage system (NT), in Nitossolo Bruno, Campo Belo do Sul - SC, and conducted in a controlled environment in the UDESC/ Lages - SC. After the period of acclimatization of the mesocosms, black oats were sown and inoculated in the system, arbuscular mycorrhizal fungi, earthworms, and springtails. The experiment followed a completely randomized design with 4 replicates and 12 controls. The following characteristics were evaluated: plant productivity (phytomass, P and N concentration), mycorrhizal symbiosis (total mycorrhizal colonization, hyphae length, spores), microbial parameters (carbon and microbial quotient), enzymatic activity, physical parameters (clay and aggregate stability), chemical parameters (fractionation of soil organic matter, C, N, among others) and decomposition of litter. The results of the analysis of variance showed that the variables, total mycorrhizal colonization, hyphae length, microbial carbon, microbial quotient and N accumulated in the plant tissue were sensitive to the functional diversity caused by the inoculation of edaphic organisms in no-tillage system. The inoculation of arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora albida* influenced the services related to plant production and mycorrhizal symbiosis in no tillage system. The interaction treatment between earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi provided an increase in microbial C in soil. The inoculation of epigeal earthworms decreased the C and microbial quotient in soil. The root mycorrhizal colonization decreased in treatment with epigeal and endogenous earthworms.

Key words: No tillage. Mesocosms. Ecosystem services. Edaphic organisms.

4.1 INTRODUÇÃO

As espécies representam um papel importante no ecossistema, remover ou adicionar espécies pode representar mudanças nas outras espécies, no ecossistema ou de processos ecossistêmicos chave (SCHERER-LORENZEN, 2005). A diversidade de espécies é importante para a estabilidade do ecossistema de forma mais ampla, garantindo uma produtividade maior e mais estável (EVANS, 2016).

As diferenças de características entre as espécies são as causas subjacentes a quaisquer efeitos da biodiversidade no funcionamento do ecossistema, em consequência, o número de grupos funcionais é normalmente um determinante mais forte do funcionamento do ecossistema do que o número de espécies (SCHERER-LORENZEN, 2005). Alterar a diversidade dos organismos no solo modifica a prestação de serviços ecossistêmicos relacionados com a produção vegetal, ciclagem de nutrientes, estabilidade de agregados e emissão de CO₂ (EVANS, 2016).

Um desafio da pesquisa ecológica atual é determinar as respostas das comunidades de plantas, biota do solo e dos processos ecossistêmicos às futuras condições ambientais. Os ecossistemas respondem as mudanças de maneira complexa e os resultados podem depender de forma significativa da biodiversidade local (SANTONJA et al., 2017).

A sustentabilidade da produção agrícola está ligada aos efeitos benéficos dos organismos do solo. As micorrizas atuando sobre a nutrição e resistência das plantas (BERBARA et al., 2006) e a fauna principalmente na decomposição, ciclagem de nutrientes e estruturação do solo (VAZ DE MELLO et al., 2009; GRUBERT et al., 2016). As práticas de manejo do solo afetam a diversidade das espécies de FMAs (HAMEL, 1996; MATHIMARAN et al., 2005) e da fauna edáfica (SILVA et al., 2006; SILVA et al., 2013), especialmente quando o solo fica descoberto ou possui baixa diversidade e cobertura vegetal, pode modificar a densidade e diversidade destes grupos.

O conhecimento da composição e dinâmica dos organismos do solo é importante para o desenvolvimento de sistemas de manejo mais eficientes (MIRANDA et al., 2010). Nos sistemas agrícolas, processos e propriedades relacionadas com produtividade primária, biomassa e a decomposição da palhada traduzem diretamente os serviços ecossistêmicos, incluindo os rendimentos da colheita e associados ao balanço de nutrientes (LAVOREL et al., 2011). Entender como as alterações na composição da diversidade do solo pode afetar a oferta de serviços pode elucidar questões sobre perdas, ganhos ou manutenções de serviços específicos realizados pelos fungos micorrizicos e fauna edáfica em agrossistemas.

Neste sentido, esta etapa do estudo objetivou avaliar os efeitos da diversidade funcional de organismos do solo nos serviços ecossistêmicos relacionados com a produção vegetal, transformações do C, ciclagem de nutrientes, manutenção da estrutura do solo e a simbiose micorrízica. Para tanto se realizou a promoção da dissimilaridade de funções no solo executadas por populações com diferentes características funcionais de FMAs, colêmbolos e minhocas em condições de semi-campo, em mesocosmos do tipo “terrestrial model ecosystems” - TMEs.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste experimento populações de minhocas, colêmbolos e fungos micorrízicos arbusculares foram introduzidas nos mesocosmos separadamente e em combinações, para buscar promover a dissimilaridade funcional no sistema. Foi conduzido em uma sala climatizada, sob condições de "semi - campo", nos modelos de ecossistemas terrestres (TMEs), na Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC.

Amostras de solos intactas (não perturbadas) foram coletadas nos mesocosmos (colunas de PVC com 40 cm de profundidade e 17 cm de diâmetro, Figura 2.1), inseridas e retiradas no solo com o auxílio de uma retroescavadeira.

Figura 2.1 - Esquema do amostrador, mesocosmo e amostragem de “terrestrial model ecosystems” a campo.

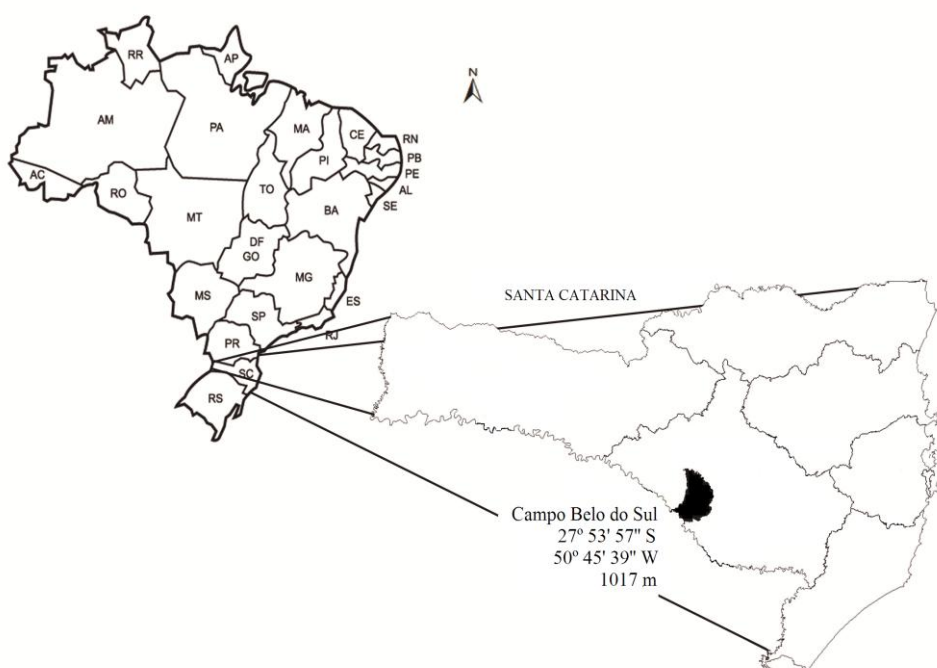


Fonte: adaptado de Knacker et al. (2004); produção do próprio autor, 2017.

Características da área de coleta

A coleta foi em um Nitossolo Bruno, no município de Campo Belo do Sul – SC (Figura 2.2). Segundo Köppen o município apresenta clima subtropical tipo *Cfb*, chuvoso com invernos e verões amenos. As coordenadas geográficas da área de amostragem são S27 52.365 W50 40.366, em 923 m de altitude.

Figura 2.2 - Localização do município de Campo Belo do Sul.



Fonte: produção do próprio autor, 2017.

No sistema de plantio direto a soja, o milho e o feijão são as culturas de verão, e a aveia, o azevém e eventualmente o trigo são as culturas de inverno plantadas anualmente na área. Em 2006 foi realizada calagem e há utilização de agroquímicos (herbicidas, inseticidas, fungicidas). Este tipo de manejo vem sendo adotado há aproximadamente 15 anos.

As características químicas e físicas do solo do sistema de plantio direto são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características químicas e físicas do solo na camada de 0 - 10 cm do plantio direto.

pH	5,1	Mg	4,0 cmol _c dm ⁻³	Macrop.	0,20 m ³ m ⁻³
Na	27,1 mg dm ⁻³	CTC 7	19,7 cmol _c dm ⁻³	Bioporos	0,01 m ³ m ⁻³
P	12,7 mg dm ⁻³	Bases	63,7 %	RP	1,85 MPa
K	120,9 mg dm ⁻³	Dens.	1,01 g cm ⁻³	Areia	185 g kg ⁻¹
Al	0,3 cmol _c dm ⁻³	Poros.	0,65 m ³ m ⁻³	Silte	338 g kg ⁻¹
Ca	8,0 cmol _c dm ⁻³	Microp.	0,45 m ³ m ⁻³	Argila	471 g kg ⁻¹

Dens. - densidade do solo. Poros. - porosidade total. Microp. - microporosidade. Macrop. - macroporosidade. RP - resistência à penetração. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Foram coletados 72 mesocosmos no sistema plantio direto (PD) que foram mantidos em ambiente controlado a 25 °C, 60 % de umidade relativa do ar e fotoperíodo de 14 h. A umidade do solo foi mantida na capacidade de campo. As amostras foram mantidas para aclimatização por duas semanas, após foi semeada aveia preta (*Avena strigosa*).

Os isolados de FMAs inoculados foram definidos a partir do capítulo I (Tabela 1.1). A escolha foi baseada na representatividade de famílias diferentes de FMAs, sendo estes: *Acaulospora colombiana* SCT115A, *Acaulospora koskei* SCT048A, *Acaulospora morrowiae* SCT400B, *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A, *Gigaspora albida* SCT200A e *Rhizophagus clarus* RJN102A. As minhocas introduzidas no sistema pertencem a duas formas de vida diferentes, sendo estas classificadas em epígeas e endógeas. Estas foram coletadas no município de Lages, dentro do campus da Universidade do Estado de Santa Catarina, em área de pastagem. Os colêmbolos foram morfotipados e adicionados nos mesocosmos, seguindo uma classificação conforme a forma de vida, classificados em edáficos, hemiedáficos e epígeos, conforme a profundidade em que habitam o solo, de acordo com Carvalho (2012). Nessa classificação cinco características morfológicas (olhos, antena, fúrcula, pelos e coloração) foram avaliadas e atribuídas pesos a estas (0, 2 e 4), a soma dos pesos às características determinaram o morfotipo do colêmbolo (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Classificação de colêmbolos por tipos morfológicos.

Característica	Padrões	Peso
Olhos	Presente	0
	Ausente	4
Comprimento da antena	> comprimento do corpo	0
	> 0,5 x comprimento do corpo	2
	< 0,5 x comprimento do corpo	4
Fúrcula	Bem desenvolvida	0
	Reduzida/ Curta	4
Pelos /Escamas	Presente	0
	Ausente	4
Coloração	Colorido com padrões	0
	Colorido sem padrões	2
	Ausência de cor	4
Morfortipos	Epígeos	Soma 0-6
	Hemiedáficos	Soma 8-12
	Edáficos	Soma 14-20

Fonte: adaptado de Carvalho, 2012.

Os colêmbolos foram coletados da serapilheira de floresta nativa (área vizinha ao local da amostragem) e do solo de plantio direto (mesmo local da amostragem). A descrição dos tratamentos aplicados no experimento de dissimilaridade funcional encontra-se na Tabela 2.3.

As minhocas epígeas foram adicionadas 10 indivíduos por mesocosmo e as minhocas endógeas, por serem menores, foram adicionadas o número de indivíduos que representou a biomassa viva das epígeas. Foi adicionado um total de 144 colêmbolos e 900 esporos de FMAs em cada mesocosmo correspondente aos tratamentos descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Design dos tratamentos de dissimilaridade funcional.

Tratamentos e Códigos				
Minhocas (MT)	MT 1 Epígeas (<i>Amyntas</i>)	MT 2 Endógeas (Lumbricidae)	MT 3 Epígeas e Endógeas	
Colêmbolos (CT)	CT 4 Epígeos	CT 5 Hemiedáficos	CT 6 Edáficos	CT 7 Epígeos, hemiedáficos, edáficos
FMA's (FT)	FT 8 <i>A. morrowiae</i> ¹ , <i>A. colombiana</i> ² , ³ <i>A. koskei</i>	FT 9 <i>C. etunicatum</i> ⁴ , <i>R. G. albida</i> ⁶ <i>clarus</i> ⁵	FT 10	FT 11 <i>A. morrowiae</i> ¹ , <i>A. colombiana</i> ² , <i>A. koskei</i> ³ , <i>C. etunicatum</i> ⁴ , <i>R. clarus</i> ⁵ , <i>G. albida</i> ⁶
Interações (IT)	IT 12 Minhocas (<i>Amyntas</i>) e colêmbolos (edáficos)	IT 13 Minhocas (<i>Amyntas</i>) e FMA's (<i>A. morrowiae</i> ¹ , <i>A. colombiana</i> ² , <i>A. koskei</i> ³ , <i>C. etunicatum</i> ⁴ , <i>R. clarus</i> ⁵)	IT 14 Colêmbolos (edáficos) e FMA's (<i>A. morrowiae</i> ¹ , <i>A. colombiana</i> ² , <i>A. koskei</i> ³ , <i>C. etunicatum</i> ⁴ , <i>R. clarus</i> ⁵)	IT 15 Minhocas (<i>Amyntas</i>), colêmbolos (edáficos) e FMA's (<i>A. morrowiae</i> ¹ , <i>A. colombiana</i> ² , <i>A. koskei</i> ³ , <i>C. etunicatum</i> ⁴ , <i>R. clarus</i> ⁵)

¹*Acaulospora morrowiae* SCT400B, ²*Acaulospora colombiana* SCT115A, ³*Acaulospora koskei* SCT048A.

⁴*Claroideoglossum etunicatum* SCT101A. ⁵*Rhizophagus clarus* RJN102A. ⁶*Gigaspora albida* SCT200A.

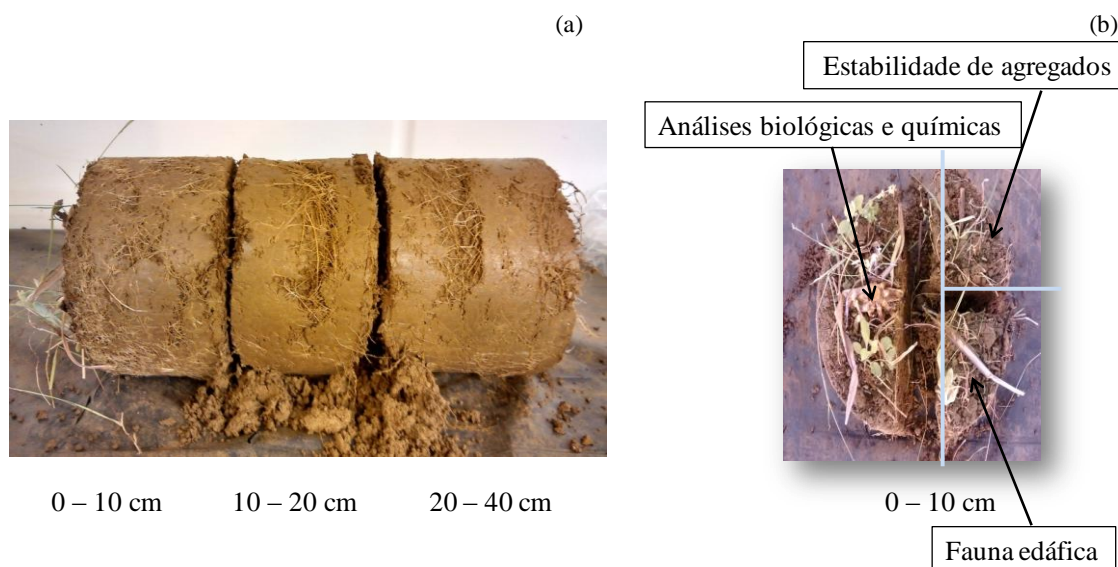
Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Este experimento teve duração de seis meses e os tratamentos foram distribuídos em delineamento completamente casualizado com quatro repetições e doze controles. Os controles continuam as comunidades naturais do solo de plantio direto.

Após seis meses o experimento foi avaliado. Para isso as amostras de solo foram retiradas dos tubos de PVC e divididas em três camadas, de 0 - 10, 10 - 20 e 20 - 40 cm. A primeira camada foi utilizada para procedimento das análises biológicas (FMA's, microbiológicas, enzimáticas), químicas e física, conforme a Figura 2.3. As raízes foram

coletadas das camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm. Na camada de 10 - 20 cm se coletou a mesofauna e minhocas, e de 20 - 40 cm apenas as minhocas.

Figura 2.3 - Amostragem dos mesocosmos para avaliação do experimento. Divisão do TME em camadas de 0 - 10, 10 - 20 e 20 - 40 cm (a); quarteamento da camada de 0-10 cm para análise de estabilidade de agregados, fauna edáfica e análises químicas, físicas e biológicas (b).



Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Além da triagem manual, a fauna edáfica da camada de 0 - 10 cm foi triada através de funis de Berlese - Tullgren (LASEBIKAN, 1974) por 5 dias, apoiados em frascos de vidro contendo uma solução de álcool a 50 % e detergente a 2 %. Após esse período, os organismos foram fixados em álcool absoluto, contados, identificados conforme os grupos, acari, araneae, blattodea, chilopoda, coleoptera, collembola, dermaptera, diptera, hemiptera, hymenoptera, isopoda, isoptera, orthoptera, diplopoda e larvas de diptera e coleoptera. Os colêmbolos foram morfotipados conforme a forma de vida (Tabela 2.2).

4.2.1 Análises

Produção de fitomassa da aveia

A fitomassa, massa seca da parte aérea (MSPA) foi expressa em gramas. Esta foi separada das raízes, armazenada em sacos de papel e secas em estufa com ventilação forçada a uma temperatura de 60 °C até massa constante.

A MSPA foi submetida à moagem e digestão ácida para a extração do fósforo (P) e nitrogênio (N) do tecido vegetal, conforme Tedesco et al. (1995). A determinação do teor de P foi realizada por espectrofotometria, conforme Murphy e Riley (1962) e do N por destilação conforme Tedesco et al. (1995). As concentrações de N na planta foram usadas para calcular o acúmulo destes nutrientes na parte aérea da aveia.

Atividade enzimática

A atividade da desidrogenase foi determinada segundo o método proposto por Öhlinger (1996) e adaptado para leitora de microplacas. Para isso, se pesou 5 g de solo úmido em quatro frascos erlenmeyer de 100 ml. Adicionado 5 ml de cloreto de 2,3,5-trifenil tetrazólio (TTC) a três erlenmeyers (amostras), 5 ml de tampão Tris para o outro erlenmeyer (controle). Em seguida, foi misturado e incubado por 24 h a 40 °C. Após incubação foi extraído o TPF adicionando 25 ml de acetona. As amostras foram agitadas por 2 h no escuro e filtradas em uma sala semi - escura. Atividade da desidrogenase foi quantificada a 546 nm e expressa como $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ de solo seco h^{-1} .

A β -glucosidase foi determinada seguindo o método descrito por Tabatabai (1994), adaptado para leitora de microplacas. Para isso, se pesou 1 g de solo úmido, adicionado 1 ml de solução de *p*-nitrofenil- β -d-glucosídio (PNG) (0,05 M) e incubado a 37 °C durante 1 hora. Depois da incubação, 1 ml de solução de cloreto de cálcio (0,5 M) e 4 ml de tris(hidroximetil) aminometano (0,1 M) foram adicionados. Atividade da β -Glucosidase é medida por fotometria a 405 nm e expressa como $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ de solo seco h^{-1} .

Análises microbiológicas

As amostras de raízes foram lavadas em peneiras de 2 mm para determinar a colonização micorrízica e coloridas conforme proposto por Koske e Gemma (1989). As raízes foram submersas em solução de hidróxido de potássio (KOH) 10 % e mantidas em banho-maria a 90 °C por 50 - 60 minutos. Em seguida, lavadas com água corrente (2 - 3 vezes) e imersas em solução de ácido clorídrico HCl 1 % por 10 minutos, após retirou-se o ácido e foi adicionado solução corante azul de tripan. As amostras permaneceram em banho-maria por mais 50 - 60 minutos até a coloração. Para determinação da colonização micorrízica foi seguido a metodologia proposta por McGonigle et al. (1990). Para este procedimento foram montadas três lâminas por amostra, com dez segmentos de raiz com

aproximadamente 1 cm de comprimento para cada lâmina. Em cada lâmina se observou 200 pontos, avaliados quanto à presença de colonização por FMAs (hifas, vesículas, arbúsculos e esporos) foram expressos em porcentagem de colonização considerando os valores de fragmentos colonizados em relação aos não colonizados, os valores de colonização foram calculados em arco seno $(x/100)^{1/2}$.

Os esporos de FMAs foram extraídos de 50 g de solo pela técnica de peneiragem úmida (GERDEMANN; NICOLSON, 1963), seguida por centrifugação em gradiente de sacarose 20 e 60 %. A amostra foi suspensa em 2 L de água por agitação, e a suspensão passada por peneiras sobrepostas de 710 e 45 μm . O material retido na peneira de 45 μm foi transferido para tubos de 50 ml, contendo o gradiente de sacarose e centrifugado a 2.000 rpm durante 1 min. O material retido na peneira de 45 μm foi lavado com água de torneira para retirar o excesso de sacarose e transferido para placas quadriculadas para a contagem.

A quantificação do comprimento de micélio extrarradicular total no solo foi realizada conforme descrito por Melloni (1996), representados neste estudo como comprimento de hifas (CH). Utilizou-se uma subamostra de substrato, com aproximadamente 10 g para a extração das hifas, sendo que uma segunda foi determinada a umidade após secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. A extração foi obtida pela suspensão das amostras de solo em 500 ml de água e passando-se o sobrenadante em peneiras sobrepostas, com malhas de 1 e 0,25 mm, repetindo três vezes esta operação e o filtrado foi submetido à agitação em liquidificador durante 30 segundos na menor velocidade. Após um período de repouso de 2 minutos, o sobrenadante foi passado por uma peneira de 0,053 mm, o material retido na peneira foi filtrado a vácuo em membrana quadriculada de triacetato de celulose, com diâmetro de 4,7 cm e porosidade de 0,47 μm . Esta membrana foi colocada sob lâmina de vidro de 5 x 5 cm, lubrificada com uma gota de óleo de amêndoas para facilitar a visualização no microscópio óptico. Foram avaliados 64 campos em cada membrana, determinando-se o número de interseções de hifas com as linhas horizontais de uma grade (8 x 8 quadrículos de 1 mm) na ocular do microscópio no aumento de 162,5 vezes. Em uma das oculares se acoplou uma lente com grade de 20 x 20 quadrículos, para determinação do número de interseções das hifas com as linhas horizontais da grade da ocular. O comprimento das hifas, expresso em centímetros de hifa por grama de solo seco, foi obtido pela seguinte relação:

$$C = [(0,0347 \cdot N) / (10 - U)] \cdot 100, \text{ onde:}$$

C = comprimento de micélio extrarradicular total, em centímetros de hifa por grama de solo seco;

N = soma do número de interseções entre as hifas e linhas horizontais do gride;

U = umidade da amostra de solo, expressa em gramas de água.

O carbono da biomassa microbiana (Cmic) foi determinado pelo método de fumigação-extração (VANCE et al., 1987), com três repetições laboratoriais, sendo três amostras fumigadas e três não fumigadas. A fumigação foi realizada com clorofórmio livre de etanol (CHCl₃), as amostras foram incubadas em dessecador por 24 h, a 25 °C, na ausência de luminosidade, após isto o Cmic foi extraído com sulfato de potássio 0,5 mol L⁻¹ (K₂SO₄) agitadas por 30 minutos, permitindo a decantação por uma hora e procedida a filtração lenta em filtro de papel número 42. A leitura das amostras foi realizada através da oxidação destas com dicromato de potássio 66,7 mmol L⁻¹ (K₂Cr₂O₇). O teor de C solúvel foi determinado por titulação com Fe (NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O 33,3 mmol L⁻¹ na presença do indicador difenilamina (1%). O Cmic foi calculado pela diferença entre carbono extraído do solo fumigado e não-fumigado multiplicada pelo fator de correção K_{EC} = 0,33, que representa a eficiência da extração de 33 %, proposto por Sparling e West (1988).

A partir dos resultados de Cmic e C foi calculado o quociente microbiano (*q*_{mic}) expresso como a percentagem de C microbiano em relação ao C orgânico total do solo (ANDERSON, 1994).

A respiração do solo (RS) foi avaliada pelo fluxo de CO₂ do sistema, realizada no último dia do experimento. Para esta medida se utilizou o equipamento Licor LI 8100. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho.

Decomposição da serapilheira

A decomposição da serapilheira foi mensurada com o uso de “*litter bags*”, atribuída pela diferença de peso entre o início e final do experimento. Foi utilizado um por mesocosmo adicionado após 3 meses de condução do experimento, dentro destes foi adicionado 0,5 g de fitomassa da parte aérea de aveia preta (*Avena strigosa*) previamente secas a 60 °C. Os “*litter bags*” possuem tela de nylon com 2 mm de abertura e com dimensões de 5 x 7 cm. No final, o conteúdo foi seco a 60 °C por 48 h e pesado.

Propriedades físicas e químicas do solo

A estabilidade de agregados do solo foi determinada pelo peneiramento úmido de acordo com a metodologia de Kemper e Chepil (1965), representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP).

Para determinação do teor de carbono total (C) e nitrogênio total (N) as amostras foram peneiradas a 2 mm, secas à 60 °C e moídas em gral de porcelana. O C e N foram determinados por combustão seca pelo analisador multi N/C 2100.

Se realizou o fracionamento químico da matéria orgânica do solo, obtendo a fração dos ácidos húmicos, fúlvicos e humina, conforme Benites et al. (2003). As amostras de solo foram tratadas com NaOH 0,1 mol L⁻¹, agitadas manualmente e deixadas em repouso por 24 h. Após esta etapa, as mesmas foram centrifugadas a 5.000 g por 30 minutos. Este procedimento foi repetido por mais duas vezes. O pH do extrato alcalino foi ajustado para 1,0 pela adição de H₂SO₄ e deixado para decantar durante 18 h. O material acidificado foi filtrado e teve o volume aferido para 50 ml com água destilada (fração de ácidos fúlvicos). Sobre o precipitado se adicionou NaOH 0,1 mol L⁻¹ até a lavagem completa do filtro e, o volume aferido para 50 ml usando água destilada (fração ácidos húmicos). O material restante nos tubos de centrífuga foi considerado como a fração humina. A determinação quantitativa de carbono nos extratos das frações ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina foram feitas através da oxidação do C com dicromato de potássio e titulação do excesso, com sulfato ferroso amoniacal.

As amostras para as análises químicas foram secas em estufa a 60 °C e peneiradas em peneira com malha de 2 mm, sendo determinados: pH, SMP, teores de P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, CTC pH 7 e soma de bases, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A umidade do solo foi determinada com as amostras secas em estufa a 105 °C por 24 horas.

As variáveis foram analisadas de acordo com os serviços ecossistêmicos relacionados com a produção vegetal (fitomassa, P, N), ciclagem de nutrientes no solo (N, P), transformações do C (β glucosidase, desidrogenase, fluxo de CO₂, C microbiano, quociente microbiano, C orgânico, fracionamento da matéria orgânica do solo), estrutura do solo (estabilidade de agregados) e simbiose micorrízica (colonização radicular, comprimento de hifas, esporulação).

4.2.2 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância considerada significativa para os valores de $p < 0,05$, após se aplicou o teste de médias (Tukey a 5 % de probabilidade) utilizando o programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada para obter uma representação gráfica das respostas nos diferentes tratamentos para os dados microbiológicos, da fauna total e número de morfotipos de colêmbolos. Para gerar as coordenadas das amostras nos eixos e os gráficos de ACP utilizou-se o programa CANOCO 4.5 (ter BRAAK; SMILAUER, 2002).

4.3 RESULTADOS

Os dados serão apresentados de acordo com os serviços ecossistêmicos relacionados com a produção vegetal, ciclagem de nutrientes, transformações do C, estrutura do solo e simbiose micorrízica. De acordo com os resultados da análise de variância, variações significativas ocorreram para o nitrogênio acumulado na parte aérea, colonização micorrízica, comprimento de hifas no solo, carbono e quociente microbiano (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Resultado da análise de variância para as variáveis relacionadas com os serviços ecossistêmicos.

Fator de variação	----- Produção vegetal -----					Ciclagem de nutrientes		Simbiose micorrízica			Est. do solo
	Fito	P	Pac	N	Nac	N	P	CT	CH	Esp	DMP
Tratamentos	0,27 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,01 ^{**}	0,52 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,00 ^{**}	0,02 [*]	0,28 ^{ns}	0,50 ^{ns}
Fator de variação	----- Transformações do C -----										
	Dec	β gluc	Desid	RS	Cmic	q_{mic}	C	AH	AF	Hu	
Tratamentos	0,75 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,00 ^{**}	0,01 ^{**}	0,61 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,09 ^{ns}	

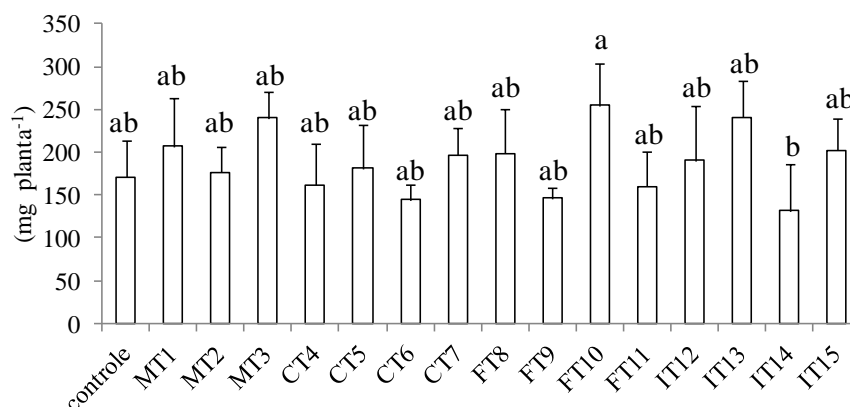
** significativo a 1 %. * significativo a 5 %. ns - não significativo. Fito - fitomassa. Pac - fósforo acumulado. Nac - nitrogênio acumulado. CT - colonização micorrízica total. CH - comprimento de hifas. Esp - número de esporos. DMP - diâmetro médio ponderado. Dec - decomposição da serapilheira. β gluc - β glucosidase. Desid - desidrogenase. RS - respiração do solo. Cmic - carbono microbiano. q_{mic} - quociente microbiano. AH - ácidos húmicos. AF - ácidos fúlvicos. Hu - humina. n = 72.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Para a produção vegetal, o valor da fitomassa da aveia preta variou entre 22,3 g e 18,9 g. O P na parte aérea apresentou valor médio de 2,8 g kg⁻¹ e o P acumulado na parte aérea da planta de 56,9 mg planta⁻¹.

O nitrogênio da parte aérea apresentou média de 9,2 g kg⁻¹ e o N acumulado na planta variou significativamente (Tabela 2.4). O nitrogênio acumulado foi maior no tratamento com a *Gigaspora albida* (FT 10) apresentando 254,6 mg planta⁻¹ e menor na interação com colêmbolos edáficos e FMAs (IT 14) com 131,4 mg planta⁻¹ (Figura 2.4). Os demais tratamentos não diferiram do controle.

Figura 2.4 - Nitrogênio acumulado na parte aérea da planta para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto.



Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. MT1 – minhocas epígeas. MT2 – minhocas endógeas. MT3 – minhocas epígeas e endógeas. CT4 – colêmbolos epígeos. CT5 – colêmbolos hemiedáficos. CT6 – colêmbolos edáficos. CT7 – colêmbolos epígeos, hemiedáficos e edáficos. FT8 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*. FT9 – *C. etunicatum*, *R. clarus*. FT10 – *G. albida*. FT11 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*, *C. etunicatum*, *R. clarus*, *G. albida*. IT12 – interação de minhocas epígeas e colêmbolos edáficos. IT13 – interação de minhocas epígeas e fungos micorrízicos arbusculares. IT14 – interação de colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. IT15 – interação de minhocas epígeas, colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. (⌈) Desvio padrão. n = 12 para o controle e n = 4 para tratamentos. Fonte: produção do próprio autor, 2017.

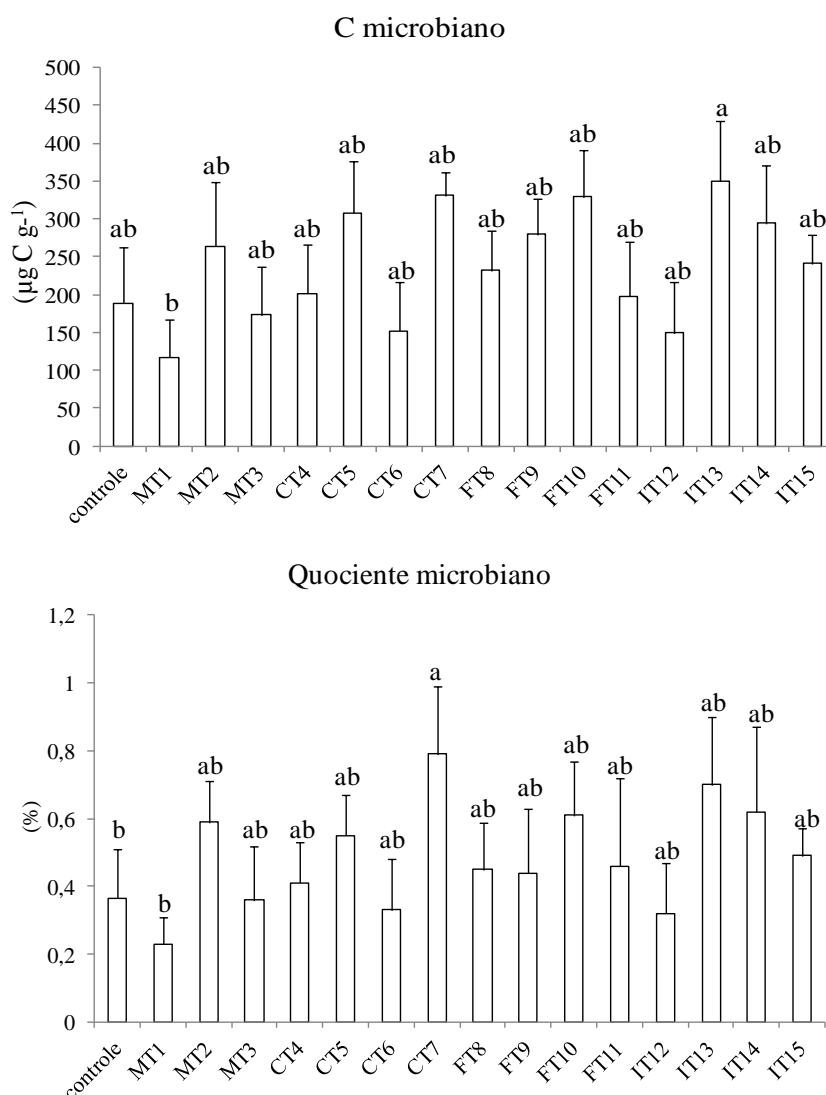
Relacionados com a ciclagem de nutrientes no solo, o fósforo e nitrogênio total no solo não variaram significativamente ($p > 0,05$) entre os tratamentos, conforme a Tabela 2.4. O fósforo apresentou valor médio de 19,9 mg dm⁻³ e o nitrogênio 4,1 g kg⁻¹ no solo.

A taxa de decomposição da serapilheira da aveia ficou em média de 51 % e o C orgânico total de 55 g kg⁻¹ no solo.

A fração dos ácidos húmicos apresentou valor médio de 8,7 mg C g⁻¹, dos ácidos fúlvicos 7,3 mg C g⁻¹ e da humina 22,9 mg C g⁻¹ de solo.

O carbono e o quociente microbiano, relacionados com as transformações do C no solo, variaram de maneira significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos de dissimilaridade (Tabela 2.4). O C microbiano foi maior no tratamento IT13 (interação de minhocas epígeas e FMAs) e menor no MT 1 (minhocas epígeas), com 350,5 e 116,8 $\mu\text{g C g}^{-1}$, respectivamente (Figura 2.5).

Figura 2.5 - C e quociente microbiano para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto.



Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. MT1 – minhocas epígeas. MT2 – minhocas endógeas. MT3 – minhocas epígeas e endógeas. CT4 – colêmbolos epígeos. CT5 – colêmbolos hemiedáficos. CT6 – colêmbolos edáficos. CT7 – colêmbolos epígeos, hemiedáficos e edáficos. FT8 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*. FT9 – *C. etunicatum*, *R. clarus*. FT10 – *G. albida*. FT11 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*, *C. etunicatum*, *R. clarus*, *G. albida*. IT12 – interação de minhocas epígeas e colêmbolos edáficos. IT13 – interação de minhocas epígeas e fungos micorrízicos arbusculares. IT14 – interação de colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. IT15 – interação de minhocas epígeas, colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. (–) Desvio padrão. $n = 12$ para o controle e $n = 4$ para tratamentos. Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O quociente microbiano foi menor no tratamento MT 1 (0,2 %) e controle (0,4 %), e maior no CT 7 (0,8 %) para interação de colêmbolos.

As transformações do C no solo não foram significativamente influenciadas pela atividade enzimática entre os tratamentos de dissimilaridade funcional (Tabela 2.4). A β glucosidase apresentou valor médio entre os tratamentos de 1377 $\mu\text{g p-nitrophenol g dm}^{-1} \text{h}^{-1}$ e a desidrogenase de 4,1 $\mu\text{g TPF g dm}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Na simbiose micorrízica, a colonização micorrízica radicular total (CT) e o comprimento de hifas (CH) variaram significativamente ($p < 0,05$) entre os tratamentos de dissimilaridade funcional, o mesmo não ocorreu para a esporulação (Tabela 2.4). A CT foi maior nos tratamentos *Gigaspora albida* (FT 10) e interação com colêmbolos e FMAs (IT 14) com 53 % (Figura 2.6).

A CT foi menor no controle e tratamento com minhocas epígeas e endógeas (MT 3) com 30 %. O CH foi maior no tratamento CT 4 (colêmbolos epígeos), FT 8 (*A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*) e FT 10 (*G. albida*) com 68,6, 70,2 e 69,9 cm g^{-1} de solo, respectivamente. O CH foi menor no tratamento CT 5, com colêmbolos hemiedáficos e no IT 12, com minhocas epígeas e colêmbolos edáficos (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Características dos fungos micorrízicos arbusculares para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto (Continua).

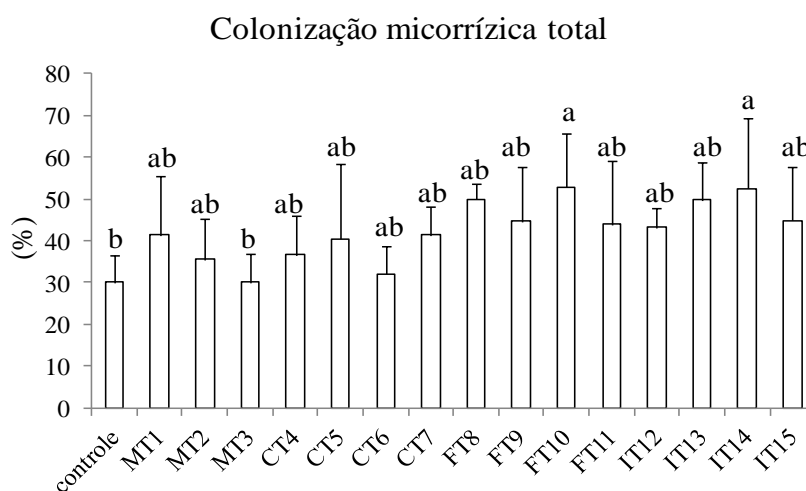
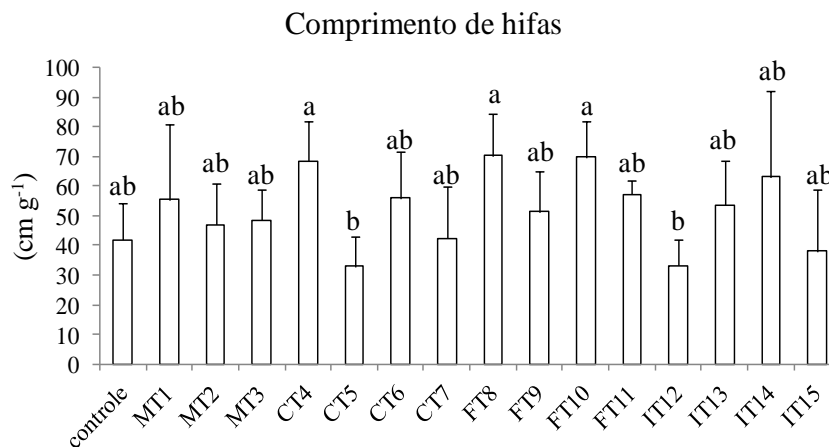


Figura 2.6 - Características dos fungos micorrízicos arbusculares para os tratamentos de dissimilaridade funcional em sistema de plantio direto (Conclusão).



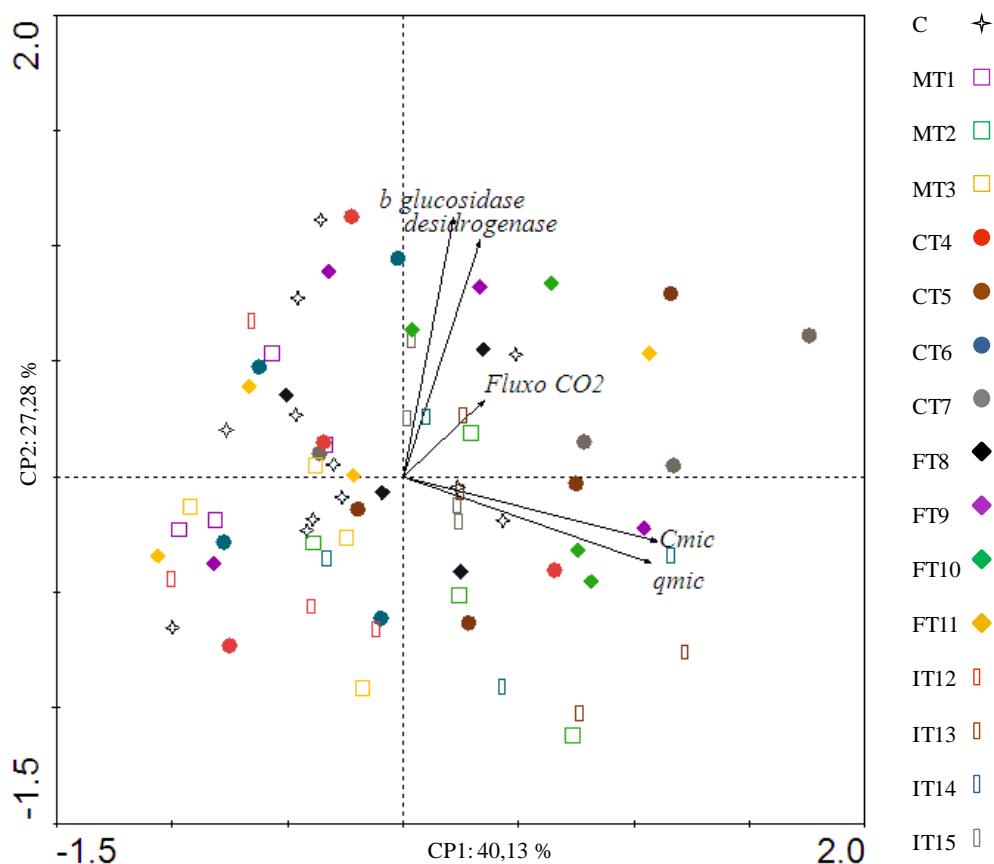
Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. MT1 – minhocas epígeas. MT2 – minhocas endógeas. MT3 – minhocas epígeas e endógeas. CT4 – colêmbolos epígeos. CT5 – colêmbolos hemiedáficos. CT6 – colêmbolos edáficos. CT7 – colêmbolos epígeos, hemiedáficos e edáficos. FT8 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*. FT9 – *C. etunicatum*, *R. clarus*. FT10 – *G. albida*. FT11 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*, *C. etunicatum*, *R. clarus*, *G. albida*. IT12 – interação de minhocas epígeas e colêmbolos edáficos. IT13 – interação de minhocas epígeas e fungos micorrízicos arbusculares. IT14 – interação de colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. IT15 – interação de minhocas epígeas, colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. (⊖) Desvio padrão. n = 12 para o controle e n = 4 para tratamentos. Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Análise multivariada

A análise multivariada de componentes principais (ACP) foi realizada para os atributos microbiológicos e para a fauna edáfica, apresentadas nas Figuras 2.7 e 2.8.

Os atributos microbiológicos explicaram 40,13 % no eixo 1 e 27,28 % no eixo 2, conforme a ACP (Figura 2.7), sem separação clara dos tratamentos. Contudo, o eixo 1 separou os tratamento com a *Gigaspora albida* (FT 10), minhocas epígeas (MT 1), minhocas epígeas e endógeas (MT 3) e a interação de minhocas epígeas e colêmbolos edáficos (IT 12). O eixo 2 separou o tratamento dos colêmbolos epígeos, hemiedáficos e edáficos (CT 7).

Figura 2.7 - Análise de componentes principais (ACP) com os atributos microbiológicos.

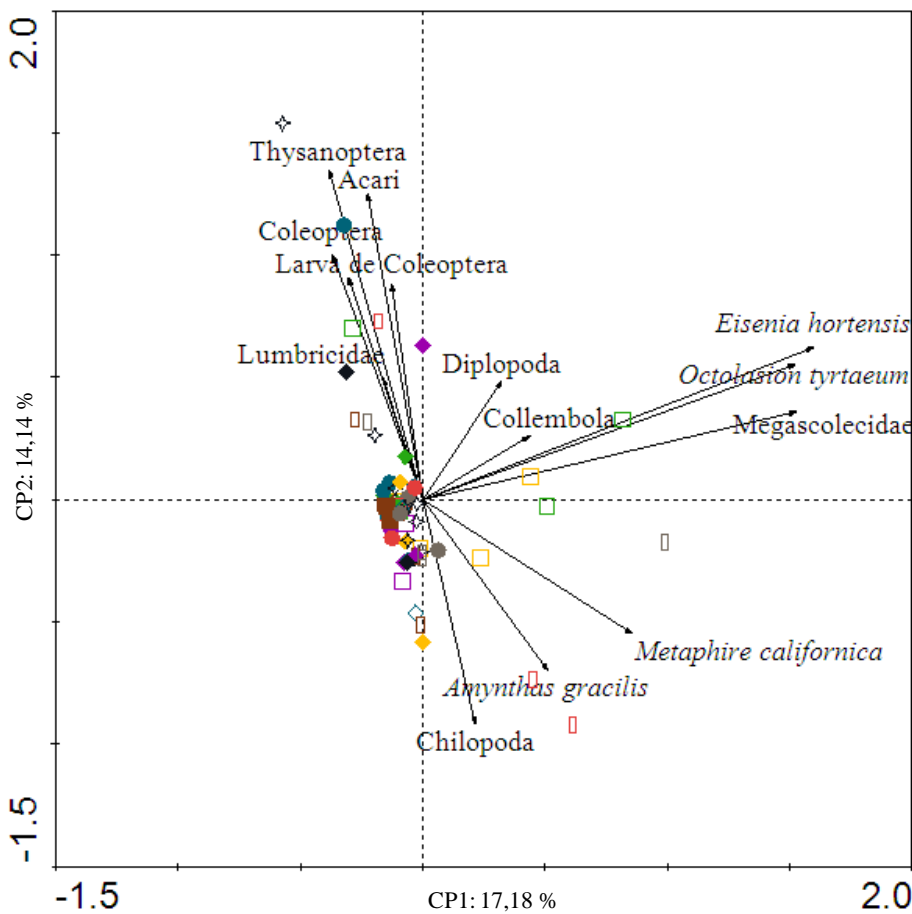


Cmic – carbono microbiano. *qmic* – quociente microbiano. C – controle. MT1 – minhocas epígeas. MT2 – minhocas endógeas. MT3 – minhocas epígeas e endógeas. CT4 – colêmbolos epígeos. CT5 – colêmbolos hemiedáficos. CT6 – colêmbolos edáficos. CT7 – colêmbolos epígeos, hemiedáficos e edáficos. FT8 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*. FT9 – *C. etunicatum*, *R. clarus*. FT10 – *G. albida*. FT11 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*, *C. etunicatum*, *R. clarus*, *G. albida*. IT12 – interação de minhocas epígeas e colêmbolos edáficos. IT13 – interação de minhocas epígeas e fungos micorrízicos arbusculares. IT14 – interação de colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. IT15 – interação de minhocas epígeas, colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. n = 12 para o controle e n = 4 para tratamentos.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A fauna do solo explicou 17,18 % no eixo 1 e 14,14 % no eixo 2, conforme a análise de Coordenadas Principais (Figura 2.8), sem separação clara dos tratamentos. Contudo o eixo 2 separou as espécies *Amyntas gracilis*, *Metaphire californica* e os chilopodas.

Figura 2.8 - Análise de componentes principais (ACP) com a fauna edáfica.



C – controle. MT1 – minhocas epígeas. MT2 – minhocas endógeas. MT3 – minhocas epígeas e endógeas. CT4 – colêmbolos epígeos. CT5 – colêmbolos hemiedáficos. CT6 – colêmbolos edáficos. CT7 – colêmbolos epígeos, hemiedáficos e edáficos. FT8 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*. FT9 – *C. etunicatum*, *R. clarus*. FT10 – *G. albida*. FT11 – *A. morrowiae*, *A. colombiana*, *A. koskei*, *C. etunicatum*, *R. clarus*, *G. albida*. IT12 – interação de minhocas epígeas e colêmbolos edáficos. IT13 – interação de minhocas epígeas e fungos micorrízicos arbusculares. IT14 – interação de colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. IT15 – interação de minhocas epígeas, colêmbolos edáficos e fungos micorrízicos arbusculares. n = 12 para o controle e n = 4 para tratamentos.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

4.4 DISCUSSÃO

O maior acúmulo de nitrogênio na aveia ocorreu no tratamento FT 10, com a inoculação da *Gigaspora albida* (Figura 2.4). Os fungos micorrízicos arbusculares podem fornecer outros nutrientes às plantas como é o caso do nitrogênio (GARG, CHANDEL, 2010; MOREIRA et al., 2010; HODGE, STORER, 2015). O papel dos FMAs na aquisição N esta relacionado com a mineralização do N orgânico (MILLER; CRAMER, 2004). Em outro estudo a *Gigaspora albida* proporcionou maior vigor à planta em relação à *Scutellospora heterogama*, pertencentes à família Gigasporaceae (SILVA et al., 2009). Grandes variações

podem ocorrer dentro e entre espécies e gêneros de FMAs, modificando os padrões de respostas de crescimento das plantas (HART, READER, 2002; MUNKVOLD et al., 2004).

O carbono microbiano foi significativamente maior para o tratamento IT 13, na inoculação de minhocas e fungos micorrízicos arbusculares (Figura 2.5). A biomassa microbiana do solo é representada principalmente por fungos e bactérias, que correspondem respectivamente a 70 e 25 % da biomassa microbiana total dos solos agrícolas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Os FMAs influenciam o C microbiano no solo e as interações da fauna do solo com os microrganismos tem ação sobre a decomposição e a ciclagem de nutrientes (CORREIA; OLIVEIRA, 2005). As minhocas atuam nos processos de movimentação de partículas e ciclagem de nutrientes, alimentam-se de resíduos vegetais (CORREIA; OLIVEIRA, 2005), juntamente com organismos decompositores acompanhantes, como fungos e bactérias (STEFFEN et al., 2013). A interação das minhocas e FMAs promoveu aumento no C microbiano do solo.

A atividade microbiana tem grande relevância para a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo, contribui para a manutenção e elevação do teor de matéria orgânica do solo (BARRETO et al., 2008). A biomassa microbiana representa a fração lábil da matéria orgânica do solo, de natureza dinâmica e sensível a alterações dos fatores bióticos e abióticos (GAMA-RODRIGUES, 1999).

A colonização micorrízica (CT) radicular foi maior nos tratamentos com inoculação de FMAs (FT 10, IT 14) e menor para inoculação de minhocas epígeas e endógeas (MT 3), conforme Figura 2.6. A CT pode ser influenciada por condições ambientais, fatores edáficos e abióticos (CAVALCANTE et al., 2009; SILVA et al., 2015), e por características estruturais relacionadas com as espécies de FMAs (CRUZ et al., 2008). As minhocas ao se alimentarem de FMAs podem perturbar a rede de hifas no solo (PATTINSON et al., 1997), ocasionando efeitos negativos, diminuindo a colonização das raízes e o comprimento de hifas (LAWRENCE et al., 2003; ORTIZ-CEBALLOS et al., 2007). Este efeito negativo normalmente é transitório (PATTINSON et al., 1997) e a porcentagem da CT nem sempre é relacionada com a eficiência dos FMAs na promoção de nutrição as plantas (COSTA et al., 2012).

O comprimento de hifas (CH) foi maior no tratamento com FMAs e com colêmbolos epígeos (Figura 2.6). A inoculação com FMAs da família Acaulosporaceae e Gigasporaceae aumentou o comprimento de hifas no solo. Os colêmbolos que habitam a serapilheira (epígeos) não interferiram no CH. Nos tratamentos com colêmbolos hemiedáficos e interação de minhocas e colêmbolos edáficos, o CH diminuiu no solo. A fauna edáfica pode exercer um

papel na regulação das comunidades microbianas do solo pela predação de fungos e bactérias (CORREIA; OLIVEIRA, 2006). As minhocas, por sua atividade de fragmentação dos resíduos (FIUZA et al., 2012) e os colêmbolos exercem importante função detritívora no controle das populações de microrganismos, especialmente dos fungos (VAZ DE MELLO et al., 2009).

As hifas dos FMAs tem um papel importante no solo, atuando nos processos de nutrição vegetal, entrada de C no solo e estabilidade de agregados. A diversidade funcional das micorrizas arbusculares influenciam as respostas no crescimento (JOHNSON et al., 1997) e absorção de nutrientes das plantas (FOLLI-PEREIRA et al., 2012).

4.5 CONCLUSÕES

As variáveis microbiológicas, carbono e quociente microbiano, colonização micorrízica radicular e comprimento de hifas foram sensíveis ao aumento da diversidade funcional ocasionada pela inoculação de organismos edáficos em sistema de plantio direto.

A inoculação do fungo micorrízico arbuscular *Gigaspora albida* influenciou os serviços relacionados com a produção vegetal e simbiose micorrízica no sistema de plantio direto. Aumentou o N acumulado na parte aérea, a colonização micorrízica na raiz da aveia, e o comprimento de hifas no solo.

O tratamento de interação entre minhocas e fungos micorrízicos arbusculares proporcionou aumento do C microbiano no solo.

A inoculação de minhocas epígeas diminuiu o carbono e quociente microbiano no solo. A inoculação de minhocas epígeas e endógeas diminuiu a colonização micorrízica radicular.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T. H. Physiological analysis of microbial communities in soil: applications and limitations. In: RITZ, K. D.; GILLER, K. E. (Eds.). **Beyond the biomass**. London: British Society of Soil Science, p. 67-76, 1994.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em seqüência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 611-619, 2008.

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 7 p.

BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, M. S. (Ed). **Nutrição Mineral de Plantas**. SBCS, Viçosa, 2006. 432 p.

CARVALHO, F. C. **Efeito de diferentes tipos de gestão em olivais nos microatrópodas de solo usando uma abordagem funcional**. Dissertação de Mestrado- Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012. 56 p.

CAVALCANTE, U. M. T.; GOTO, B. T.; MAIA, L. C. Aspectos da simbiose micorrízica arbuscular. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 5, p. 180-208, 2009.

CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. Importância da Fauna de Solo para a Ciclagem de Nutrientes. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Eds.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, p. 77-99, 2005.

COSTA, E. L.; PAULINO, V. T.; COSTA, R. S. C.; PEREIRA, R. G. A.; TOWNSEND, C. R.; MAGALHÃES, J. A. Efeito de micorrizas arbusculares sobre o crescimento e nutrição mineral de *Brachiaria brizantha* CV. Marandu. **Ciência Animal Brasileira**, s.l., v. 13, p. 406-411, 2012.

CRUZ, C.; CORREIA, P.; RAMOS, A.; CARVALHO, L.; BAGO, A.; LOUÇÃO, M. A. M. Arbuscular Mycorrhiza in Physiological and Morphological Adaptations of Mediterranean Plants. In: VARMA, A. (ed.) **Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular**

Biology, EcoFunction, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics.
Berlin: Springer-Verlag, p. 733-752, 2008.

EVANS, E. W. Biodiversity, ecosystem functioning and classical biological control. **Applied Entomology and Zoology**, Japan, v. 51, p. 173-184, 2016.

FIUZA, D. T. F.; KUSDRA, J. F.; FIUZA, S. S. Crescimento do milho em solo sob atividade de *Chibui bari* (Oligochaeta: Glossoscolecidae). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 359-366, 2012.

FOLLI-PEREIRA, M. S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1663-1679, 2012.

GAMA-RODRIGUES, E. F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da Matéria Orgânica do solo** - Ecossistemas Tropicais e Subtropicais. Porto Alegre: Genesis, 227-243, 1999.

GARG, N.; CHANDEL, S. Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, s.l., 2010, v. 30, p. 581-599, 2010.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 46, p. 235-244, 1963.

GRUBERT, D.; BUTENSCHOEN, O.; MARAUN, M.; SCHEU, S. Understanding earthworm e Collembola interactions and their importance for ecosystem processes needs consideration of species identity. **European Journal of Soil Biology**, Mountrouge, v. 77, p. 66-67, 2016.

HAMEL, C. Prospects and problems pertaining to the management of arbuscular mycorrhizae in agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 60, p. 197-210, 1996.

HART, M. M.; READER, R. J. Host plant benefit from association with arbuscular mycorrhizal fungi: variation due to differences in size of mycelium. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 36, p. 357-366, 2002.

HODGE, A. STORER. K. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. **Plant Soil**, Hague, v. 386, p. 1-19, 2015.

JOHNSON, N. C.; GRAHAM, J. H.; SMITH, F. A. Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism– parasitism continuum. **New Phytologist**, v. 135, p. 575-585, 1997.

KNACKER, T.; GESTEL, C. A. M. V.; JONES, S. E.; SOARES, A. M. V. M.; SCHALLNAß, H-J.; FÖRSTER, B.; EDWARDS, C. A. Ring-Testing and Field-Validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) – An Instrument for Testing Potentially Harmful Substances: Conceptual Approach and Study Design. **Ecotoxicology**, Paris, v. 13, p. 9-27, 2004.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, p. 499-510, 1965.

KOSKE, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycology Research**, Amsterdam, v. 92, p. 486-505, 1989.

LASEBIKAN, B. A. A preliminary communication on microarthropods from a tropical rainforest in Nigeria. **Pedobiologia**, Jena, v. 14, p. 402-411, 1974.

LAVOREL, S., GRIGULIS, K., LAMARQUE, P., COLACE, M.-P., GARDEN, D., GIREL, J., PELLET, G.; DOUZET, R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. **Journal of Ecology**, v. 99, p. 135–147, 2011.

LAWRENCE, B.; FISK, M. C.; FAHEY, T. J.; SUÁREZ, E. R. BLACKWELL. Influence of nonnative earthworms on mycorrhizal colonization of sugar maple (*Acer saccharum*). **New Phytologist**, Saint Paul, v. 157, p. 145-153, 2003.

MATHIMARAN, N.; RUH, R., VULLIOUD, P., FROSSARD, E., JANSA, J. *Glomus intraradices* dominates arbuscular mycorrhizal communities in a heavy textured agricultural soil. **Mycorrhiza**, Berlin, v. 16, p. 61-66, 2005.

McGONIGLE, T. P. MILLER, M. H.; EVANS, D. G.; FAIRCHILD, G. L.; SWAN, J. A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Saint Paul, v. 115 p. 495-501, 1990.

MELLONI, R. **Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas**. 1996. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1996. 83 p.

MILLER, A. J.; CRAMER, M.D. Root nitrogen acquisition and assimilation. **Plant and Soil**, s.l., v. 274, p. 1-36, 2004.

MIRANDA, E. M.; SILVA, E. M. B.; SAGIN-JÚNIOR, O. J. Comunidades de fungos micorrízicos arbusculares associados ao amendoim forrageiro em pastagens consorciadas no Estado do Acre, Brasil. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 40, p. 13-22, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; FARIA, S. M.; BALEIRO, F. C.; FLORENTINO, L. A. Bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares em espécies florestais: avanços e aplicações biotecnológicas. In: **Biotecnologia Aplicada à Agricultura**. Embrapa Informação Tecnológica, Instituto agrônomo de Pernambuco, v. 761, p. 456-468, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MUNKVOLD, L.; KJOLLER, R.; VESTBERG, M.; ROSENDAHL, S.; JAKOBSEN, I. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Cambridge, v. 164, p. 357-364, 2004.

MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chemical Acta**, Oxford, v 27, p. 31-36, 1962.

ÖHLINGER, R. Dehydrogenase activity with the substrate TTC. In: SCHINNER, F.; ÖHLINGER, R.; KANDLER, E.; MARGESIN, R. (Eds.). **Methods in Soil Biology**. Berlin: Springer-Verlag, p. 241-243, 1996.

ORTIZ-CEBALLOS, A. I., PENÃ-CABRIALES, J. J., FRAGOSO, C., BROWN, G. G. Mycorrhizal colonization and nitrogen uptake by maize: combined effect of tropical earthworms and velvetbean mulch. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 44, p. 181-186, 2007.

PATTINSON, G. S.; SMITH, S. E.; DOUBE, B. M. Earthworm Aporectodea trapezoides had no effect on the dispersal of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi, *Glomus intraradices*. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 29, p. 1079-1088, 1997.

SANTONJA, M.; FERNANDEZ, C.; PROFFIT, M.; GERS, C.; GAUQUELIN, T.; REITER, I. M.; CRAMER, W.; BALDY, V. Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil biota and litter decomposition in a Mediterranean oak forest. **Journal of Ecology**, v. 105, p. 801–815, 2017.

SILVA, R. F.; AQUINO, A. M.; MERCANTE, F. M.; GUIMARÃES, M. F. Macrofauna invertebrada do solo sob diferentes sistemas de produção em Latossolo da região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 697- 704, 2006.

SILVA, R. F.; CORASSA, G. M.; BERTOLLO, G. M.; SANTI, A. L.; STEFFEN, R. B. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, p. 130-137, 2013.

SILVA, R. F.; MARCO, R.; BERTOLLO, G. M.; MATSOUKA, M.; MENEGOL, D. R. Influência do uso do solo na ocorrência e diversidade de FMAs em Latossolo no Sul do Brasil. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, p. 1851-1862, 2015.

SILVA, T. F. B.; SANTOS, A. B. S.; ROZAS, C. E. O.; SANTOS, A. C.; PAIVA, L. M. Influência da densidade de fungos micorrízicos arbusculares na produção de maracujazeiro-doce (*Passiflora alata* CURTIS). **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, p. 1-6, 2009.

SCHERER-LORENZEN, M. Biodiversity and ecosystem functioning: basic principles. In: BARTHLOTT, W.; LINSÉNMAIR, K. E.; POREMBSKI, S. (Eds). **Biodiversity: structure and function**. Encyclopedia of life support systems, Oxford, p. 68-88, 2005.

SPARLING, G.P.; WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial - C - calibration in situ using microbial respiration and ^{14}C - labeled cells. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, n.3, 20:337-343, 1988.

STATSOFT. **STATISTICA 7.0 (data analysis software system)**. [s.l.]. 2004. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>> Acesso em: 02 abr. 2017.

STEFFEN, G. P. K.; ANTONIOLLI, Z. I.; STEFFEN, R. B.; JACQUES, R. J.S. Importância ecológica e ambiental das minhocas. **Revista de Ciências Agrárias**, s.l., v. 32, p. 137-147, 2013.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGEL, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (Eds.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties, **Soil Science Society of America**, Madison, p. 778-826, 1994.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

ter BRAAK, C. J. F.; SMILAUER, P. **CANOCO**. Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination, version 4.5. Microcomputer Power, Ithaca, 2002.

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

VAZ DE MELLO, F. Z.; BROWN, G. G.; CONSTANTINO, R.; LOUZADA, J. N. C.; LUIZAO, F. J.; MORAIS, J. W.; ZANETTI, R. A importância da mesa e macrofauna do solo na fertilidade como bioindicadores. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 39-43, 2009.

VELTHORST, E. J. **Manual for Chemical Water Analysis**. Wageningen: Agricultural University. 1993.

5 CAPÍTULO III

RESISTÊNCIA E RESILIÊNCIA DE COMUNIDADES BIOLÓGICAS EM SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO E INTEGRAÇÃO LAVOURA - PECUÁRIA SUBMETIDOS A REGIMES EXTREMOS DE CHUVAS EM MODELOS DE ECOSISTEMAS TERRESTRES (TMEs)

RESUMO

As mudanças climáticas podem alterar as respostas das comunidades do solo e das plantas, modificando a provisão de serviços e a regulação dos ecossistemas. Essas alterações podem interferir na produção vegetal, funcionalidade e desempenho das comunidades microbiológicas do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de diferentes regimes de chuvas (seca e excesso) na resistência e resiliência das comunidades microbiológicas do solo em sistema de plantio direto (PD) e integração lavoura - pecuária (ILP). Para isso foi realizado um ensaio em condições de semi campo, em “terrestrial model ecosystems” (TME) onde foram simulados três regimes hídricos correspondentes a condições de chuvas normais, de seca e de inundação temporária durante dois meses (tempo 1 - resistência) seguidos de três meses de chuvas normais (tempo 2 - resiliência). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento completamente casualizado com 6 repetições, perfazendo 72 mesocosmos (36 de PD e 36 de ILP). Os TMEs foram coletados no município de Campo Belo do Sul – SC em um Nitossolo Bruno e submetidos a climatização em câmara de crescimento com a semeadura de milho (*Zea mays*) e simulação dos regimes hídricos com chuva artificial. Nos tempos 1 e 2 foram determinadas as seguintes variáveis: colonização micorrízica total, número de esporos, comprimento de hifas, estabilidade de agregados, carbono e quociente microbiano, atividade enzimática, carbono e nitrogênio total do solo, decomposição da serapilheira e os atributos químicos. Os diferentes regimes hídricos e períodos (resistência e resiliência) influenciaram a fitomassa e o P da parte aérea do milho. Com o retorno da chuva normal no período de resiliência, a decomposição da serapilheira foi um dos parâmetros influenciados pelos regimes de chuvas aplicados na resistência. A fitomassa do milho diminuiu com o regime de chuva baixo, na resistência e resiliência. A respiração do solo aumentou com regime de chuva alto e a esporulação foi menor na condição de chuva baixa, na resistência. Na resiliência, estes atributos variaram conforme o uso do solo. Os atributos químicos e físicos apresentaram diferentes relações com os atributos microbiológicos estudados, entre os sistemas de uso, PD e ILP. As correlações diferenciaram entre os períodos de resistência e de resiliência.

Palavras-chaves: Regimes de chuvas. Fungos micorrízicos arbusculares. Mesocosmos.

**RESISTANCE AND RESILIENCE OF BIOLOGICAL COMMUNITIES IN NO -
TILLAGE AND CROP - LIVESTOCK INTEGRATION SYSTEMS SUBMITTED TO
EXTREME RAINFALL REGIMES IN TERRESTRIAL MODEL ECOSYSTEM
(TME)**

ABSTRACT

Climate change can alter the responses of soil and soil communities by modifying service provision and ecosystem regulation. These alterations may interfere with the plant production, functionality and performance of soil microbiological communities. The objective of this study was to evaluate the effects of different rainfall regimes (dry and excess) on resistance and resilience of soil microbiological communities under no - tillage system (NT) and crop-livestock integration (ICL). For this, a semi-field test was performed in terrestrial model ecosystems (TME), where three water regimes were simulated, corresponding to normal, dry and temporary flood conditions for two months (time 1 - resistance) Followed by three months of normal rainfall (time 2 - resilience). The treatments were distributed in completely randomized design with 6 replicates, making 72 mesocosms (36 of NT and 36 of ICL). The TMEs were collected in the municipality of Campo Belo do Sul - SC in a Bruno Nitossolo and submitted to climatization in a growth chamber with corn sowing (*Zea mays*) and simulation of water regimes with artificial rainfall. At times 1 and 2 the following variables were determined: total mycorrhizal colonization, number of spores, hyphae length, aggregate stability, carbon and microbial quotient, enzymatic activity, carbon and total soil nitrogen, and chemical attributes. The different water regimes and periods (resistance and resilience) influenced the dry mass and the P content of aerial part of corn. With the return of normal rainfall in the resilience period, the litter decomposition was the parameter influenced by the rainfall regimes applied in the resistance. Soil respiration increased with high rainfall and sporulation was lower in low rainfall, in resistance. In resilience, these attributes varied according to the use of soil. The chemical and physical attributes presented different relations with the microbiological attributes studied, between the systems of use, NT and ICL. The correlations was differentiated between periods of resistance and resilience

Keywords: Rains regime. Arbuscular mycorrhizal fungi. Mesocosms.

5.1 INTRODUÇÃO

Os microrganismos do solo são considerados sensíveis às mudanças no solo e desempenham funções importantes na manutenção da produtividade. São responsáveis por diversos serviços ecossistêmicos do solo, atuando na dinâmica do carbono (decomposição e acúmulo de matéria orgânica), agregação do solo (estabilidade de agregados), produção vegetal (crescimento e nutrição) e a ciclagem de nutrientes (transformação e reserva), considerados os principais serviços (ARAÚJO; MELO, 2012).

Alterações climáticas estão ocorrendo nos últimos anos a nível global, gerando precipitações desiguais, sem distribuição previsível. Isso pode causar modificações na diversidade biológica do solo e na sua provisão dos serviços em ecossistemas agrícolas.

Os fungos micorrízicos arbusculares são influenciados pela umidade e precipitação, alterando seu comportamento fisiológico dos FMA, principalmente em solos com alto grau de umidade, onde a aeração pode diminuir e modificar a ocorrência das espécies, a densidade de esporos e a colonização micorrízica dos FMAs (AUGÉ et al., 2001; MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2012). A intensidade do manejo do solo também pode influenciar a colonização e diversidade destes microrganismos (ALGUACIL et al., 2008).

A atividade dos organismos do solo é afetada por fatores ambientais e de manejo. A prestação de serviços de provisão e regulação dos ecossistemas do solo muda em resposta a variações de fatores do solo e ambientais, tendo resultado em diminuição na biodiversidade nas últimas décadas. As mudanças climáticas globais podem ter impactos significativos em toda a biodiversidade do solo e serviços relacionados (KHURSHEED, 2016).

Sensíveis ao distúrbio e muitas vezes resistentes, quando se recuperam de um período de estresse, são considerados resilientes, retornando as funções anteriores exercidas. Quando não se recuperam ao seu estado original, não se sabe o quanto essas mudanças podem ter afetado os processos ecossistêmicos (ALLISON; MARTINY, 2008). A biodiversidade melhora a resiliência ou a capacidade do sistema de se recuperar de pressões externas, como secas ou alagamentos (FISCHER et al., 2006).

Prever as causas ecológicas e as consequências da mudança climática global requer uma variedade de abordagens, incluindo o uso de experimentos, modelos e pesquisas. Entre os experimentos, os mesocosmos tornaram-se mais populares por permitirem desenvolver pesquisas que se aproximem da realidade, com grande complexidade biológica, em condições

de semi campo (STEWART et al., 2013), possibilitando isolar fatores que não seriam possíveis no campo.

Com isso o objetivo deste estudo foi avaliar sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária em modelos de ecossistemas terrestres – TMEs (mesocosmos), possíveis serviços ecossistêmicos que podem ser modificados ou mantidos quando o solo, a planta e sua comunidade de organismos são submetidos a estresses hídricos ocasionados por regimes de chuvas normal (média), baixo (seca) e alto (inundação temporária). O experimento foi avaliado em dois períodos diferentes (resistência e resiliência) para determinar se o estresse causado no sistema alterou as prestações de serviços do solo (produção vegetal, simbiose micorrízica, atividade enzimática, transformações do C, estrutura do solo).

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma sala climatizada, sob condições de "semi - campo", em mesocosmos do tipo “terrestrial model ecosystem” (TME), na Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC.

Amostras de solos intactas (não perturbadas) foram coletadas a campo de modo a formar os TMEs (40 cm de profundidade e 17 cm de diâmetro, Figura 2.1). As coletas foram realizadas em um Nitossolo Bruno, no município de Campo Belo do Sul – SC, contendo as comunidades naturais do solo (Figura 2.2). Foram coletados 36 mesocosmos (TMEs) do sistema plantio direto (PD) e 36 do sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e mantidos em ambiente controlado a 25 °C, 60 % de umidade relativa do ar e fotoperíodo de 14 h. As amostras foram mantidas para aclimatização por duas semanas, após foi semeado milho (*Zea mays*). Esta planta hospedeira foi escolhida por se tratar de uma espécie micotrófica e amplamente cultivada no Sul do Brasil em sistema de plantio direto.

Segundo Köppen o município apresenta clima subtropical tipo *Cfb*, chuvoso com invernos e verões amenos.

No sistema de plantio direto a soja, o milho e o feijão são as culturas de verão, e a aveia, o azevém e eventualmente o trigo são as culturas de inverno plantadas anualmente na área. Em 2006 foi realizada calagem e há utilização de agroquímicos (herbicidas, inseticidas, fungicidas). Este tipo de manejo vem sendo adotado há aproximadamente 15 anos. As coordenadas geográficas da área de amostragem são S27 52.365 W50 40.366, em 923 m de altitude.

O sistema de integração lavoura-pecuária é manejado sob plantio direto, a soja e o milho são as culturas do verão e a pastagem de inverno, plantadas anualmente na área. Em 2010 foi realizada calagem e há utilização de agroquímicos (herbicidas, inseticidas, fungicidas). A lotação na área é de 2 animais por hectare. As coordenadas geográficas da área de amostragem são S27 52.131 W50 39.980, em 947 m de altitude.

As características químicas e físicas dos sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária foram analisadas na camada de 0 - 10 cm apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 - Características químicas do solo dos sistemas de plantio direto (PD) e integração lavoura-pecuária (ILP) no município de Campo Belo do Sul.

	CT g kg ⁻¹	NT	pH	Na	P	K	Al	Ca	Mg	CTC 7	Bases
				----- mg dm ⁻³ -----				----- cmol _c dm ⁻³ -----			%
PD	53,3	2,7	5,1	27,1	12,7	120,9	0,3	8,0	4,0	19,7	63,7
ILP	56,2	2,4	5,6	39,4	6,8	63,6	0,3	11,4	3,5	19,7	76,7

CT - carbono total. NT - nitrogênio total. n = 18.

Tabela 3.2 - Características físicas do solo dos sistemas de plantio direto (PD) e integração lavoura-pecuária (ILP) no município de Campo Belo do Sul.

	DS g cm ⁻³	PT	Mi	Ma	BP	RP	DMP	Areia	Argila	Silte
			----- m ³ m ⁻³ -----			MPa	mm	----- g kg ⁻¹ -----		
PD	1,01	0,65	0,45	0,20	0,01	1,85	5,62	185	471	338
ILP	1,00	0,65	0,47	0,19	0,01	1,94	5,51	259	499	241

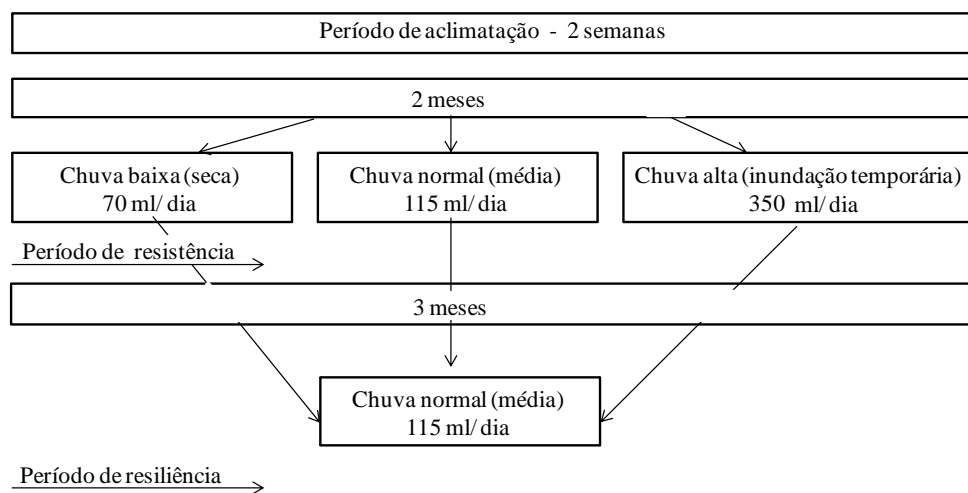
DS - densidade do solo. PT - porosidade total. Mi - microporosidade. Ma - macroporosidade. BP - bioporos. RP - resistência a penetração. DMP - diâmetro médio ponderado. n = 27.

Foram testados três regimes de chuvas, baixo (3 mm), médio (5 mm) e alto (15 mm) estimados com base no regime hídrico da região do Planalto Catarinense do ano 2000 a 2012. Os dados mensais das chuvas foram disponibilizados pela Epagri - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Ciram). A simulação de chuvas foi realizada utilizando chuva artificial conforme protocolo proposto por Velthorst (1993). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento completamente casualizado com seis repetições.

Durante dois meses os TMEs foram submetidos aos três regimes de chuva (baixa, normal e alta) em cada sistema de manejo do solo, correspondendo ao período de resistência. Após este período, metade das unidades experimentais foram coletadas para avaliar a resistência das comunidades biológicas e as modificações na oferta de serviços neste período.

O restante das unidades experimentais permaneceram por mais 3 meses, recebendo apenas regime de chuva normal, correspondendo ao período de resiliência. Após este período, os TMEs foram coletados para avaliar a capacidade de resiliência das comunidades bióticas nos dois sistemas de cultivo de milho (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Regimes de chuvas e os períodos de análises do experimento em TMEs.



Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O solo dos TMEs foi extraído para análise dos resultados dos períodos de resistência e resiliência, conforme descrito no capítulo II (Figura 2.3).

5.2.1 Análises

Produção de fitomassa da aveia

A fitomassa do milho, massa seca da parte aérea (MSPA) foi medida ao final de cada período de análise, e expressa em gramas. Esta foi separada das raízes, armazenada em sacos de papel e secas em estufa com ventilação forçada a uma temperatura de 60 °C até massa constante.

A MSPA foi submetida à moagem e digestão ácida para a extração do fósforo (P) do tecido vegetal, conforme Tedesco et al. (1995). A determinação do teor de P foi realizada por espectrofotometria, conforme Murphy e Riley (1962).

Atividade enzimática

A β -glucosidase foi determinada seguindo o método descrito por Tabatabai (1994), adaptado para leitora de microplacas. Para isso, se pesou 1 g de solo úmido, adicionado 1 ml de solução de *p*-nitrofenil- β -d-glucosídio (PNG) (0,05 M) e incubado a 37 °C durante 1 hora. Depois da incubação, 1 ml de solução de cloreto de cálcio (0,5 M) e 4 ml de tris (hidroximetil) aminometano (0,1 M) foram adicionados. Atividade da β -Glucosidase é medida por fotometria a 405 nm e expressa como $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ de solo seco h^{-1} .

A atividade da desidrogenase foi determinada segundo o método proposto por Öhlinger (1996) e adaptado para leitora de microplacas. Para isso, se pesou 5 g de solo úmido em quatro frascos erlenmeyer de 100 ml. Adicionado 5 ml de cloreto de 2,3,5-trifenil tetrazólio (TTC) a três erlenmeyers (amostras), 5 ml de tampão Tris para o outro erlenmeyer (controle). Em seguida, foi misturado e incubado por 24 h a 40 °C. Após incubação foi extraído o TPF adicionando 25 ml de acetona. As amostras foram agitadas por 2 h no escuro e filtradas em uma sala semi - escura. Atividade da desidrogenase foi quantificada a 546 nm e expressa como $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ de solo seco h^{-1} .

A atividade da fosfatase ácida foi determinada seguindo o método descrito por Margesin (1996), adaptado para leitora de microplacas. Amostras de solo (1 g de peso úmido) foram incubadas em tubos de centrífuga de 15 ml de polietileno com 1 ml de solução de pNP-fosfato (5 mM) e 4 ml de solução tampão de acetato (50 mM, pH = 5), durante 2 h a 35 °C. Após a incubação, 4 ml de THAM buffer [tris (hidroximetil) aminometano] (0,1 M, pH = 12) e 1 ml de solução de cloreto de cálcio (0,5 M) serão adicionados. A suspensão foi misturada em agitador vortex durante 10 segundos e centrifugado durante 4 minutos a 3000 rpm. Após a centrifugação, 1 ml do sobrenadante será pipetado para outro tubo, ao qual se adiciona 1 ml de água destilada. A concentração de p-NP produzido se mediu a 405 nm e expressa como $\mu\text{g pNP g}^{-1}$ de solo seco h^{-1} .

A atividade potencial de nitrificação foi avaliada pelo método proposto por Berg e Rosswall (1985), modificado. As amostras de solo (2 g de peso úmido) foram incubadas em tubos de centrífuga de 15 ml de polietileno com 8 ml de solução de sulfato de amônio (1 mM) e 0,1 ml de solução de clorato de sódio (1,5 M). Os tubos ficaram incubados durante 5 h à temperatura ambiente num agitador e o controle incubado a - 20 °C. Após a incubação, 2 ml de solução de cloreto de potássio (2 M) foi adicionada a cada tubo. A suspensão misturada brevemente e centrifugada durante 4 minutos a 3000 rpm. Após a centrifugação, 5 ml do sobrenadante se pipetou para outro tubo ao qual 3 ml de solução tampão de cloreto de

amônio (0,19 M, pH = 8,5) e 2 ml do reagente de cor, uma solução de sulfanilamida e N-(1-naftil)-hidrocloreto de etilenodiamina, foram adicionados. A mistura permaneceu em repouso de 15 minutos à temperatura ambiente, após a concentração de nitrito foi medida a 540 nm. A nitrificação potencial é expressa como a quantidade de NO_2^- - N liberado a partir de 1 g de solo durante 5 h.

Análises microbiológicas

As amostras de raízes foram lavadas em peneiras de 2 mm para determinar a colonização micorrízica e coloridas conforme proposto por Koske e Gemma (1989). As raízes foram submersas em solução de hidróxido de potássio (KOH) 10 % e mantidas em banho-maria a 90 °C por 50 - 60 minutos. Em seguida, lavadas com água corrente (2 - 3 vezes) e imersas em solução de ácido clorídrico HCl 1 % por 10 minutos, após retirou-se o ácido e foi adicionado solução corante azul de tripan. As amostras permaneceram em banho-maria por mais 50 - 60 minutos até a coloração. Para determinação da colonização micorrízica foi seguido a metodologia proposta por McGonigle et al. (1990). Para este procedimento foram montadas três lâminas por amostra, com dez segmentos de raiz com aproximadamente 1 cm de comprimento para cada lâmina. Em cada lâmina se observou 200 pontos, avaliados quanto à presença de colonização por FMAs (hifas, vesículas, arbúsculos e esporos) foram expressos em porcentagem de colonização considerando os valores de fragmentos colonizados em relação aos não colonizados, os valores de colonização foram calculados em arco seno $(x/100)^{1/2}$.

Os esporos de FMAs foram extraídos de 50 g de solo pela técnica de peneiragem úmida (GERDEMANN; NICOLSON, 1963), seguida por centrifugação em gradiente de sacarose 20 e 60 %. A amostra foi suspensa em 2 L de água por agitação, e a suspensão passada por peneiras sobrepostas de 710 e 45 μm . O material retido na peneira de 45 μm foi transferido para tubos de 50 ml, contendo o gradiente de sacarose e centrifugado a 2.000 rpm durante 1 min. O material retido na peneira de 45 μm foi lavado com água de torneira para retirar o excesso de sacarose e transferido para placas quadriculadas para a contagem.

A quantificação do comprimento de micélio extrarradicular total no solo foi realizada conforme descrito por Melloni (1996), representados neste estudo como comprimento de hifas (CH). Utilizou-se uma sub amostra de substrato, com aproximadamente 10 g para a extração das hifas, sendo que uma segunda foi determinada a umidade após secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. A extração foi obtida pela suspensão das amostras de solo em 500 ml de água

e passando-se o sobrenadante em peneiras sobrepostas, com malhas de 1 e 0,25 mm, repetindo três vezes esta operação e o filtrado foi submetido à agitação em liquidificador durante 30 segundos na menor velocidade. Após um período de repouso de 2 minutos, o sobrenadante foi passado por uma peneira de 0,053 mm, o material retido na peneira foi filtrado a vácuo em membrana quadriculada de triacetato de celulose, com diâmetro de 4,7 cm e porosidade de 0,47 μm . Esta membrana foi colocada sob lâmina de vidro de 5 x 5 cm, lubrificada com uma gota de óleo de amêndoas para facilitar a visualização no microscópio óptico. Foram avaliados 64 campos em cada membrana, determinando-se o número de intersecções de hifas com as linhas horizontais de uma grade (8 x 8 quadrículos de 1 mm) na ocular do microscópio no aumento de 162,5 vezes. Em uma das oculares se acoplou uma lente com grade de 20 x 20 quadrículos, para determinação do número de intersecções das hifas com as linhas horizontais da grade da ocular. O comprimento das hifas, expresso em centímetros de hifa por grama de solo seco, foi obtido pela seguinte relação:

$$C = [(0,0347 \cdot N) / (10 - U)] \cdot 100, \text{ onde:}$$

C = comprimento de micélio extrarradicular total, em centímetros de hifa por grama de solo seco;

N = soma do número de intersecções entre as hifas e linhas horizontais do gride;

U = umidade da amostra de solo, expressa em gramas de água.

O carbono da biomassa microbiana (C_{mic}) foi determinado pelo método de fumigação-extração (VANICE et al., 1987), com três repetições laboratoriais, sendo três amostras fumigadas e três não fumigadas. A fumigação foi realizada com clorofórmio livre de etanol (CHCl_3), as amostras foram incubadas em dessecador por 24 h, a 25 °C, na ausência de luminosidade, após isto o C_{mic} foi extraído com sulfato de potássio 0,5 mol L^{-1} (K_2SO_4) agitadas por 30 minutos, permitindo a decantação por uma hora e procedida a filtração lenta em filtro de papel número 42. A leitura das amostras foi realizada através da oxidação destas com dicromato de potássio 66,7 mmol L^{-1} ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). O teor de C solúvel foi determinado por titulação com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 33,3 mmol L^{-1} na presença do indicador difenilamina (1%). O C_{mic} foi calculado pela diferença entre carbono extraído do solo fumigado e não-fumigado multiplicada pelo fator de correção $K_{EC} = 0,33$, que representa a eficiência da extração de 33 %, proposto por Sparling e West (1988).

A partir dos resultados de C_{mic} e C foi calculado o quociente microbiano (q_{mic}) expresso como a percentagem de C microbiano em relação ao C orgânico total do solo (ANDERSON, 1994).

A respiração do solo (RS) foi avaliada pelo fluxo de CO₂ do sistema, realizada no último dia do experimento. Para esta medida se utilizou o equipamento Licor LI 8100. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho.

Decomposição da serapilheira

A decomposição da serapilheira foi mensurada com o uso de “*litter bags*”, atribuída pela diferença de peso entre o início e final do experimento. Foi utilizado um “*litter bag*” por mesocosmo, adicionado após 3 meses de condução do experimento, dentro destes foi adicionado 0,5 g de serapilheira coletada nos mesocosmos previamente secas a 60 °C. Os “*litter bags*” possuem tela de nylon com 2 mm de abertura e com dimensões de 5 x 7 cm.. No final, o conteúdo foi seco a 60 °C por 48 h e pesado.

Propriedades físicas e químicas do solo

A estabilidade de agregados do solo foi determinada pelo peneiramento úmido de acordo com a metodologia de Kemper e Chepil (1965), representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP).

Para determinação do teor de carbono total (C) e nitrogênio total (N) as amostras foram peneiradas a 2 mm, secas à 60 °C e moídas em gral de porcelana. O C e N foram determinados por combustão seca pelo analisador multi N/C 2100.

Se realizou o fracionamento químico da matéria orgânica do solo, obtendo a fração dos ácidos húmicos, fúlvicos e humina, conforme Benites et al. (2003). As amostras de solo foram tratadas com NaOH 0,1 mol L⁻¹, agitadas manualmente e deixadas em repouso por 24 h. Após esta etapa, as mesmas foram centrifugadas a 5.000 g por 30 minutos. Este procedimento foi repetido por mais duas vezes. O pH do extrato alcalino é ajustado para 1,0 pela adição de H₂SO₄ e deixado para decantar durante 18 h. O material acidificado foi filtrado e teve o volume aferido para 50 ml com água destilada (fração de ácidos fúlvicos). Sobre o precipitado se adicionou NaOH 0,1 mol L⁻¹ até a lavagem completa do filtro e, o volume aferido para 50 ml usando água destilada (fração ácidos húmicos). O material restante nos tubos de centrífuga é considerado como a fração humina. A determinação quantitativa de carbono nos extratos das frações ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina

foram feitas através da oxidação do C com dicromato de potássio e titulação do excesso, com sulfato ferroso amoniacal.

As amostras para as análises químicas foram secas em estufa a 60 °C e peneiradas em peneira com malha de 2 mm, sendo determinados: pH, SMP, teores de P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, CTC pH 7 e soma de bases, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A umidade do solo foi determinada com as amostras secas em estufa a 105 °C por 24 horas.

As variáveis foram analisadas de acordo com os serviços ecossistêmicos relacionados com a produção vegetal (fitomassa, P, P acumulado), ciclagem de nutrientes no solo (N, P), transformações do C (fluxo de CO₂, C microbiano, quociente microbiano, C orgânico, fracionamento da matéria orgânica do solo), atividade enzimática (β glucosidase, desidrogenase, fosfatase ácida, potencial de nitrificação), estrutura do solo (estabilidade de agregados) e simbiose micorrízica (colonização radicular, comprimento de hifas).

5.2.2 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância fatorial para o período de resistência e resiliência, com três regimes de chuvas e dois sistemas de uso do solo (3 x 2), após se aplicou o teste de médias (Tukey a 5 % de probabilidade) utilizando o programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada para obter uma representação gráfica das respostas nos diferentes tratamentos para os dados microbiológicos, para os dois períodos em estudo. Para gerar as coordenadas das amostras nos eixos e os gráficos de ACP utilizou-se o programa CANOCO 4.5 (ter BRAAK; SMILAUER, 2002).

Correlações de Pearson foram estabelecidas entre os atributos microbiológicos, químicos e físicos utilizando o programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Avaliação da resistência das comunidades bióticas

No período de resistência, de acordo com os resultados da Tabela 3.3, houve interação entre uso do solo e os regimes de chuva para a concentração e acumulação de fósforo na parte aérea da planta e a humina. Os atributos, comprimento de hifas, carbono e quociente

microbiano, desidrogenase, carbono total no solo, ácidos húmicos e fúlvicos, não apresentaram diferenças entre o uso do solo e os regimes de chuvas.

Tabela 3.3 - Resultado da análise de variância fatorial para o plantio direto e integração lavoura-pecuária em TMEs no final do período de resistência.

Fator de variação	MSPA	P	Pac	CT	CH	Esp	Cmic	qmic	RS
Uso	0,00**	0,01**	0,00**	0,00**	0,41 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,02*
Chuva	0,00**	0,02*	0,00**	0,69 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,00**	0,15 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,00**
Chuva x Uso	0,16 ^{ns}	0,01*	0,00**	0,15 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,32 ^{ns}
Fator de variação	β gluc.	Desid.	F. ácida	P. nitrif.	C	AH	AF	Humina	DMP
Uso	0,02*	0,17 ^{ns}	0,01**	0,01*	0,41 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,00**	0,90 ^{ns}
Chuva	0,85 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,00**
Chuva x Uso	0,61 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,01**	0,86 ^{ns}

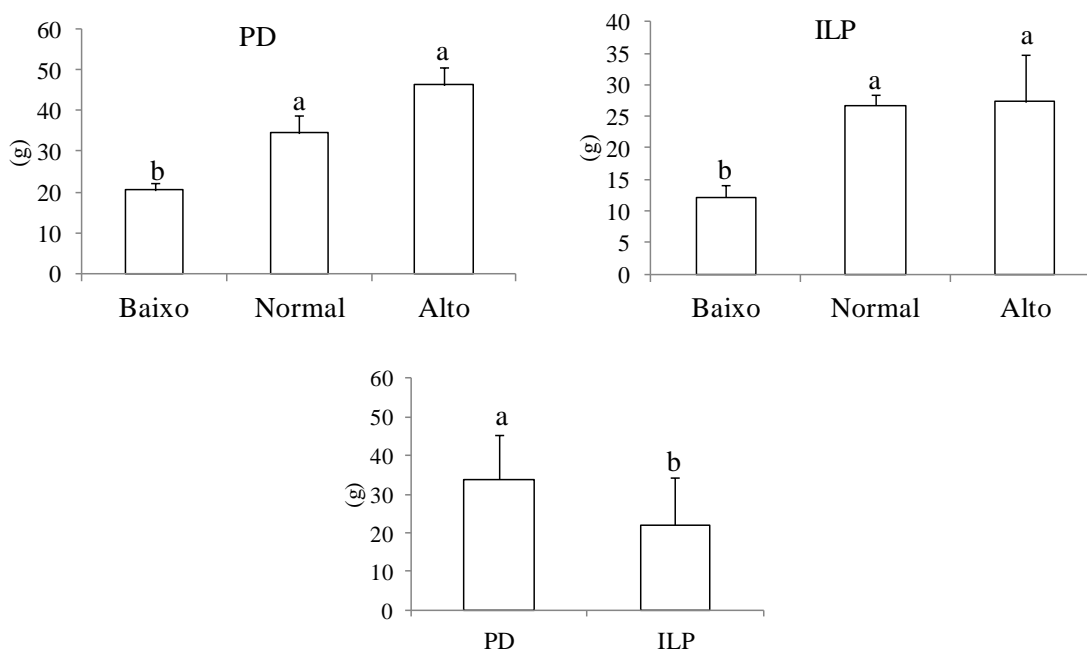
** significativo a 1 %. * significativo a 5 %. ns - não significativo. MSPA - massa seca de parte aérea. P - teor de fósforo da parte aérea. Pac - fósforo acumulado na parte aérea. CT - colonização micorrízica total. CH - comprimento de hifas. Esp - número de esporos. Cmic - carbono microbiano. qmic - quociente microbiano. RS - Respiração do solo. β gluc. - β glucosidase. Desid. - desidrogenase. F. ácida - fostatase ácida. P. nitrif. - potencial de nitrificação. C- carbono total no solo. AH - ácidos húmicos. AF- ácidos fúlvicos. DMP - diâmetro médio ponderado. n = 36.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A produção de fitomassa (MSPA) do milho variou com o sistema de uso e com o regime de chuvas de forma independente (Tabela 3.3). A MSPA do milho foi maior no plantio direto (PD), com 33,8 g em relação à integração lavoura-pecuária (ILP), com 22,1 g, conforme Figura 3.2. O regime de chuva baixo, considerado condição de seca, diminuiu a fitomassa do milho nos sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária.

Os regimes de chuva normal e alto não diferiram entre si na produção da fitomassa do milho, para os dois sistemas de uso, PD e ILP.

Figura 3.2 - Fitomassa do milho no plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resistência nos TMEs.



Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD – plantio direto. ILP – integração lavoura-pecuária. (⊥) Desvio padrão. n = 6. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Os teores de P da parte aérea e acumulado na parte aérea do milho variaram com o sistema de cultivo em função do regime de chuvas (Tabela 3.3). O sistema de plantio direto apresentou maior teor de fósforo e acumulado na parte aérea do milho em relação à integração lavoura-pecuária (Tabela 3.4). No PD, o maior teor de P e acumulado na parte aérea da planta, ocorreu no regime de chuva alto, com $1,25 \text{ g kg}^{-1}$ e $57,5 \text{ mg planta}^{-1}$, respectivamente, diferindo dos demais tratamentos.

Tabela 3.4 - Fósforo da parte aérea (P) e acumulado (Pac) no milho para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas no período de resistência.

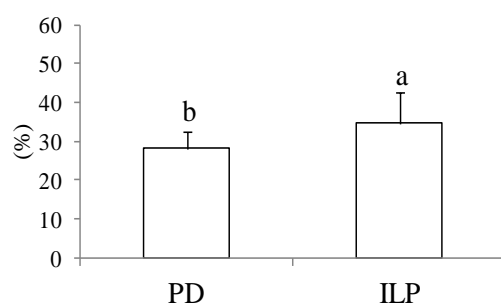
Regimes de Chuva	P (g kg^{-1})		Pac (mg planta^{-1})	
	PD	ILP	PD	ILP
Baixo	0,92 b A	0,79 a A	18,9 b A	9,7 b B
Normal	0,82 b A	0,87 a A	28,5 b A	22,9 a A
Alto	1,25 a A	0,83 a B	57,5 a A	28,0 a B
Médias ¹	1,02 A	0,82 B	35,0 A	19,8 B
C.V. (%)	25,2	21,5	41,0	35,5

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 6. ¹n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A simbiose micorrízica variou para a colonização radicular (CT) no milho entre os sistemas de uso do solo e a esporulação (Esp) com os regimes de chuvas (Tabela 3.3). O sistema ILP apresentou maior colonização micorrízica radicular no milho em relação ao PD (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Colonização micorrízica total para os sistemas de uso do solo no período de resiliência.



Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. (⊥) Desvio padrão. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

No sistema PD, os regimes de chuvas não diferiram significativamente o número de esporos, contudo, foi maior para a chuva baixa (36 em 50 g de solo), conforme a Tabela 3.5. No sistema ILP, o menor regime de chuvas (baixo) aumentou significativamente o número de esporos em relação aos tratamentos com chuva normal e alta.

Tabela 3.5 - Número de esporos para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas para o período de resistência.

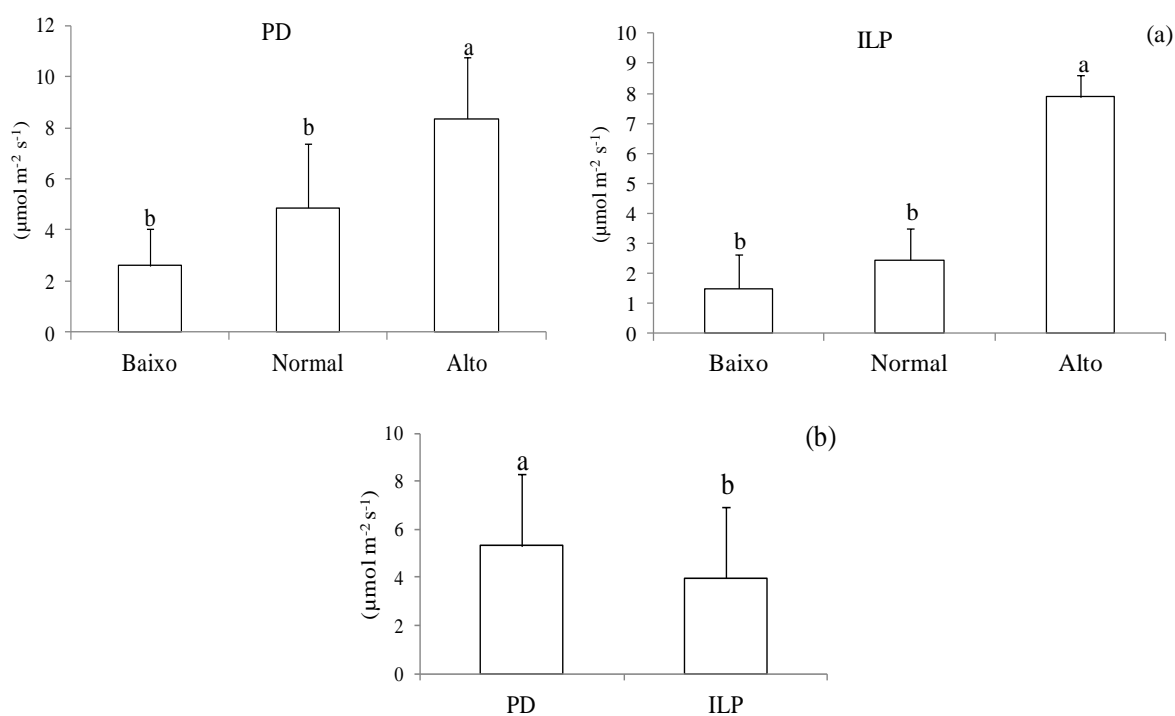
Regimes de Chuva	Número de esporos (50 g solo)	
	PD	ILP
Baixo	36 a	59 a
Normal	26 a	24 b
Alto	27 a	34 b
Médias ¹	29,7	39,0
C.V. (%)	38,8	45,2

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 6. ¹n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A respiração do solo (RS) variou com os regimes de chuvas e sistema de uso do solo de forma independente (Tabela 3.3). A maior liberação de CO₂ ocorreu no maior regime hídrico, chuva alta, para os sistemas PD e ILP, com 8,35 e 7,89 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente (Figura 3.4). A respiração do solo foi maior no sistema de plantio direto.

Figura 3.4 - Respiração do solo no plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resistência nos TMEs.



Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD – plantio direto. ILP – integração lavoura-pecuária. (T) Desvio padrão. a) n = 6. b) n = 18. Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A atividade enzimática da β glucosidase, fosfatase ácida e potencial de nitrificação diferenciaram entre os usos do solo, plantio direto e integração lavoura-pecuária (Tabela 3.3). No PD a β glucosidase e o potencial de nitrificação foram maiores (Tabela 3.6). O sistema ILP apresentou maior atividade da fosfatase ácida ($218 \mu\text{g } p\text{-nitrophenol g dm}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

Tabela 3.6 - Atividade enzimática para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas no período de resistência.

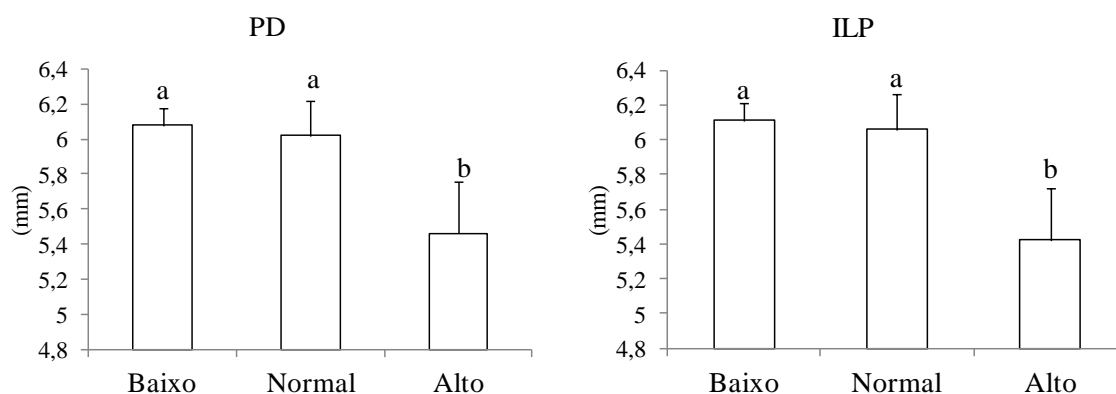
Regimes de Chuva	β glucosidase ($\mu\text{g } p\text{-nitrophenol g dm}^{-1} \text{ h}^{-1}$)		Fosfatase ácida ($\mu\text{g } p\text{-nitrophenol g dm}^{-1} \text{ h}^{-1}$)		Potencial de nitrificação ($\mu\text{g NO}_2 \text{ g dm}^{-1} \text{ 5h}^{-1}$)	
	PD	ILP	PD	ILP	PD	ILP
Médias	1551 a	1235 b	192 b	218 a	446 a	214 b
C.V. (%)	30,5	31,0	9,3	14,9	37,5	40,5

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A estabilidade de agregados, representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP) variou com os regimes de chuvas (Tabela 3.3). No PD e ILP, o regime de chuva alto diminuiu o DMP, diferenciando da chuva baixa e normal (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Diâmetro médio ponderado para plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resistência.



Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. (\top) Desvio padrão. n = 6.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

No fracionamento da matéria orgânica do solo, a fração húmica variou com os regimes de chuvas no sistema ILP (Tabela 3.7). No ILP foi maior no regime de chuva alto (25,2 mg C g⁻¹), diferindo do regime normal (14,5 mg C g⁻¹). A húmica foi maior no sistema ILP em relação ao PD, com 14,6 e 20,3 mg C g⁻¹, respectivamente.

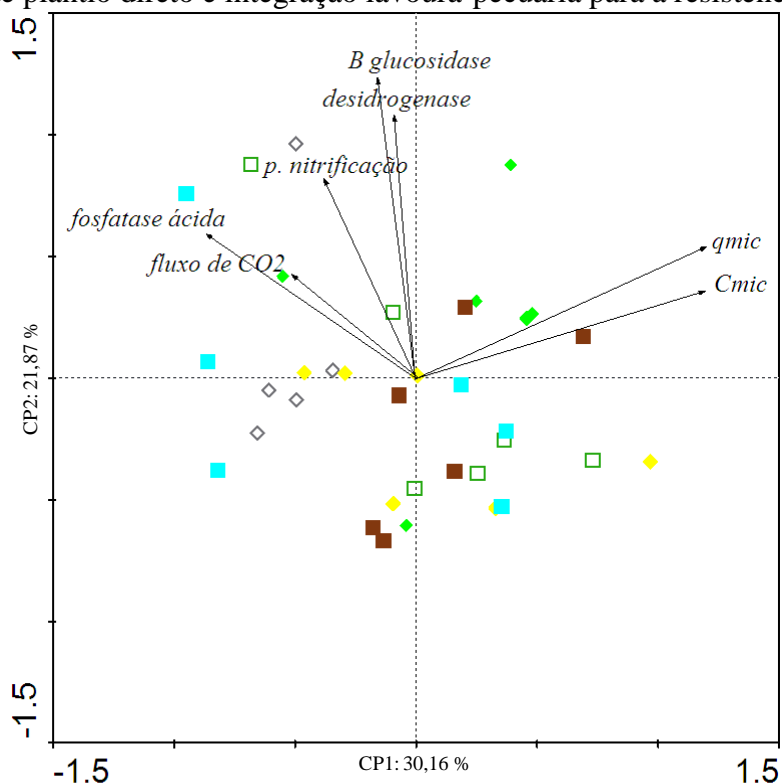
Tabela 3.7 - Fração humina para os sistemas de uso do solo submetidos a três regimes de chuvas no período de resistência.

Regimes de Chuva	Humina (mg C g ⁻¹)	
	PD	ILP
Baixo	15,7 a A	20,2 ab A
Normal	15,5 a A	14,5 b A
Alto	12,7 a B	25,2 a A
Médias ¹	14,6 B	20,3 A
C.V. (%)	31,2	24,9

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 6. ¹n = 18.
Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A análise de coordenadas principais (ACP) com base nos atributos microbiológicos mostra que não houve separação entre os sistemas de uso e os regimes de chuvas (Figura 3.6). O eixo 1 explicou 30,16 % e o eixo 2 21,87 %.

Figura 3.6 - Análise de componentes principais (ACP) com os atributos microbiológicos, para os sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária para a resistência.



Cmic - carbono microbiano. qmic - quociente microbiano. PD_B – plantio direto regime de chuva baixo. PD_N – plantio direto regime de chuva normal. PD_A – plantio direto regime de chuva alto. ILP_B – integração lavoura-pecuária regime de chuva baixo. ILP_N – integração lavoura-pecuária regime de chuva normal. ILP_A – integração lavoura-pecuária regime de chuva alto. n = 6.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

5.3.2 Avaliação da resiliência das comunidades bióticas

No período de resiliência, de acordo com os resultados da Tabela 3.8, houve interação entre o uso do solo e os regimes de chuvas para a produção de fitomassa (MSPA). A produção vegetal (MSPA, P e N da parte aérea) e a decomposição da serapilheira sofreram influência dos regimes de chuvas aplicados no período de resistência. Outros atributos variaram com o uso do solo, o comprimento de hifas, o número de esporos, a respiração do solo, a desidrogenase, a fosfatase ácida, o potencial de nitrificação, o C orgânico e a humina.

Tabela 3.8 - Resultado da análise de variância fatorial para o plantio direto e integração lavoura-pecuária em TMEs no período de resiliência.

Fator de variação	MSPA	P	Pac	CT	CH	Esp	Dec.	Cmic	qmic	RS
Uso	0,00**	0,00**	0,00**	0,44 ^{ns}	0,02*	0,00**	0,20 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,00**
Chuva	0,00**	0,01**	0,02*	0,34 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,01**	0,84 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,17 ^{ns}
Chuva x Uso	0,04**	0,40 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,89 ^{ns}
Fator de variação	β gluc.	Desid.	F. ácida	P. nitrif.	C	AH	AF	Humina	DMP	
Uso	0,41 ^{ns}	0,00**	0,00**	0,00**	0,02*	0,84 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,00**	0,98 ^{ns}	
Chuva	0,22 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,46 ^{ns}	
Chuva x Uso	0,64 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,07 ^{ns}	

** significativo a 1 %. * significativo a 5 %. ns - não significativo. MSPA - massa seca de parte aérea. P - teor de fósforo da parte aérea. Pac - fósforo acumulado na parte aérea. CT - colonização micorrízica total. CH - comprimento de hifas. Esp - número de esporos. Dec. - decomposição da serapilheira. Cmic- carbono microbiano. qmic - quociente microbiano. RS - Respiração do solo. β gluc.- β glucosidase. Desid.- desidrogenase. F. ácida - fosfatase ácida. P. nitrif. - potencial de nitrificação. C - carbono total no solo. AH - ácidos húmicos. AF - ácidos fúlvicos. DMP - diâmetro médio ponderado. n = 36.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A fitomassa (MSPA) do milho foi maior no PD, com 37,8 g em relação ao ILP com 27,6 g (Tabela 3.9). No PD, a MSPA foi menor na chuva baixa (27,6 g) e no ILP, maior no regime de chuva alto (34,9 g).

Tabela 3.9 - Fitomassa do milho para os sistemas de uso do solo submetidos ao regime normal de chuva no período de resiliência.

Regimes de Chuva	MSPA (g)	
	PD	ILP
Baixo	27,6 b A	22,4 b A
Normal	44,1 a A	25,5 b B
Alto	41,9 a A	34,9 a A
Médias ¹	37,8 A	27,6 B
C.V. (%)	26,8	28,1

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 6. ¹n = 18.
Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O PD apresentou maior concentração de P na parte aérea em relação ao ILP, com 1,20 e 0,83 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 3.10). No PD e ILP o fósforo da parte aérea foi menor no regime de chuva normal, com 0,97 e 0,64 g kg⁻¹, respectivamente.

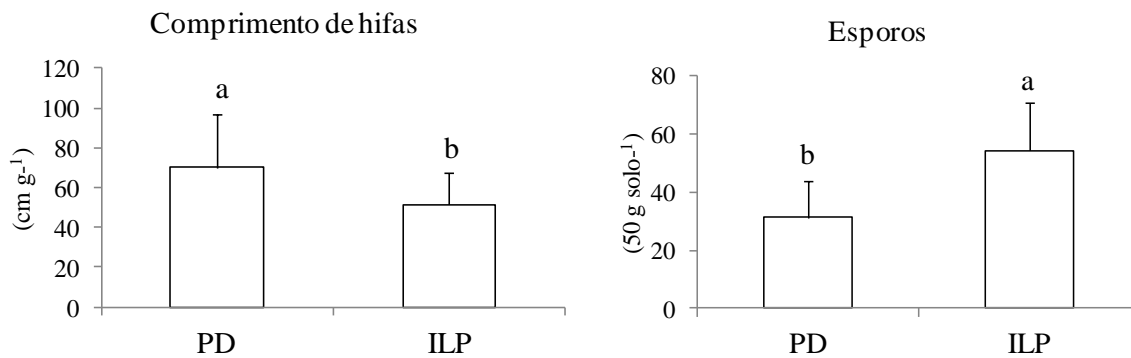
Tabela 3.10 - Fósforo da parte aérea (P) e acumulado (Pac) na parte aérea do milho para os sistemas de uso do solo submetidos ao regime de chuva normal no período de resiliência.

Regimes de Chuva	P (g kg ⁻¹)		Pac (mg planta ⁻¹)	
	PD	ILP	PD	ILP
Baixo	1,19 ab	0,97 a	33,0 b	21,0 b
Normal	0,97 b	0,64 b	42,7 ab	16,3 b
Alto	1,42 a	0,95 a	60,0 a	30,4 a
Médias ¹	1,20 A	0,83 B	45,2 A	22,6 B
C.V. (%)	31,4	26,2	38,8	31,1

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 6. ¹n = 18.
Fonte: produção do próprio autor, 2017.

Na simbiose micorrízica, o comprimento de hifas (CH) e a esporulação variaram entre os sistemas PD e ILP (Tabela 3.8). O CH foi maior no PD com 70,3 cm g⁻¹ e o número de esporos maior na ILP, com 54 esporos em 50 g de solo (Figura 3.7).

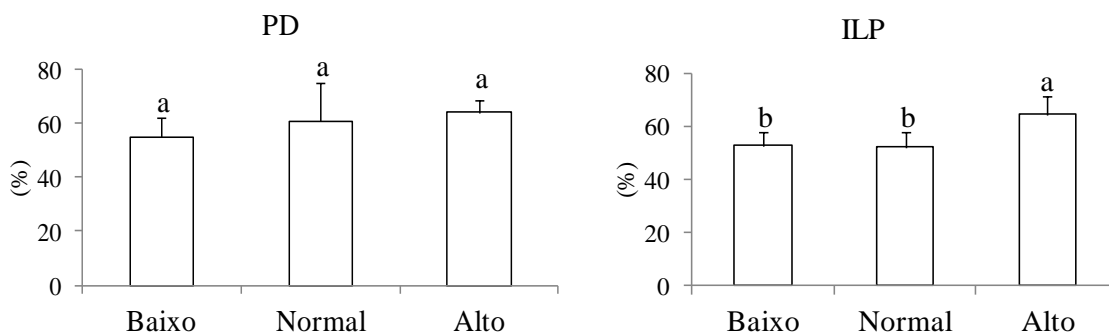
Figura 3.7 - Simbiose micorrízica para os sistemas de uso do solo no período de resiliência.



Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. (⌈) Desvio padrão. n = 18.
 Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A decomposição da serapilheira variou no ILP, foi menor para os regimes de chuva baixo e normal, com 53 e 52 %, respectivamente (Figura 3.8). No PD a decomposição variou em torno de 15 % entre os regimes de chuvas.

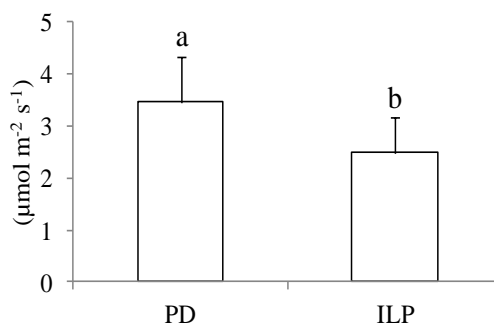
Figura 3.8 - Decomposição da serapilheira para os sistemas de uso do solo no período de resiliência.



Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. (⌈) Desvio padrão. n = 18.
 Fonte: produção do próprio autor, 2017.

No período de resiliência a respiração do solo variou entre os sistemas de uso do solo, com maior liberação de CO₂ no plantio direto (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Respiração do solo no plantio direto e integração lavoura-pecuária no período de resiliência nos TMEs.



Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. (⊥) Desvio padrão. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

O C orgânico do solo e a humina variaram conforme o uso do solo (Tabela 3.11). O sistema ILP apresentou maior C no solo, com 58,6 g kg⁻¹, e fração humina, com 23,1 mg C g⁻¹ solo.

Tabela 3.11 - Carbono e fração humina no solo para os sistemas de uso submetidos ao regime normal de chuva no período de resiliência.

	C g kg ⁻¹		Humina mg C g ⁻¹	
	PD	ILP	PD	ILP
Médias	50,0 b	58,6 a	14,9 b	23,1 a
C.V. (%)	17,1	8,8	5,1	11,6

Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 6. ¹n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A atividade enzimática da desidrogenase, fosfatase ácida e o potencial de nitrificação diferiram entre os sistemas de uso ILP e PD (Tabela 3.12). No ILP a desidrogenase e a fosfatase ácida foram maiores, com 4,97 μg TTF g dm⁻¹ h⁻¹ e 178,3 μg *p*-nitrophenol g dm⁻¹ h⁻¹, respectivamente. O plantio direto apresentou maior potencial de nitrificação (655,1 μg NO₂ g dm⁻¹ 5h⁻¹).

Tabela 3.12 - Atividade enzimática para os sistemas de uso do solo submetidos ao regime de chuva normal no período de resiliência.

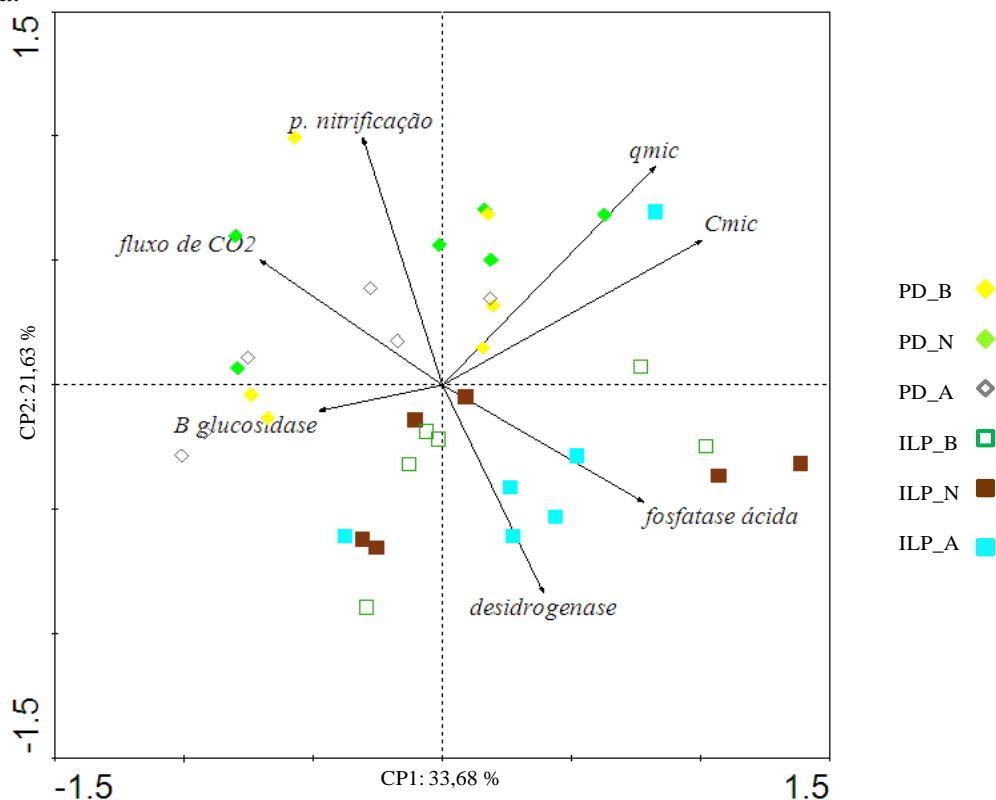
	Desidrogenase ($\mu\text{g TTF g dm}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Fosfatase ácida ($\mu\text{g p-nitrophenol g dm}^{-1} \text{h}^{-1}$)		Potencial de nitrificação ($\mu\text{g NO}_2 \text{ g dm}^{-1} 5\text{h}^{-1}$)	
	PD	ILP	PD	ILP	PD	ILP
Médias	3,03 b	4,97 a	154,3 b	178,3 a	655,1 a	363,2 b
C.V. (%)	33,5	40,2	8,7	13,8	38,8	46,2

Médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. TTF - trifetil tetrazólio formazan. PD - plantio direto. ILP - integração lavoura-pecuária. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

No período de resiliência, a análise de componentes principais explicou 33,68 % no eixo 1 e 21,63 % no eixo 2 (Figura 3.10). O eixo 2 mostrou maior separação dos sistemas de uso, plantio direto e integração lavoura-pecuária.

Figura 3.10 - Análise de componentes principais (ACP), com base nos parâmetros microbiológicos para os sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária para a resiliência.



Cmic - carbono microbiano. qmic - quociente microbiano. PD_B – plantio direto regime de chuva baixo. PD_N – plantio direto regime de chuva normal. PD_A – plantio direto regime de chuva alto. ILP_B – integração lavoura-pecuária regime de chuva baixo. ILP_N – integração lavoura-pecuária regime de chuva normal. ILP_A – integração lavoura-pecuária regime de chuva alto. n = 6.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

As enzimas β glucosidase, desidrogenase e fosfatase ácida apresentaram forte ligação com a ILP. O potencial de nitrificação e a respiração do solo com o PD.

5.3.3 Correlações de Pearson

Os atributos relacionados com a simbiose micorrízica (colonização total, comprimento de hifas, número de esporos), com os parâmetros microbianos (C e quociente microbiano) e enzimáticos (β glucosidase, desidrogenase, fosfatase ácida, potencial de nitrificação) apresentaram diferentes correlações com os atributos químicos e físicos do solo. São apresentados conforme o período estudado, resistência e resiliência, e o sistema de uso, PD (Tabelas 3.13 e 3.14) e ILP (Tabelas 3.15 e 3.16).

No PD, na resistência, ocorreu a maior correlação positiva para a β glucosidase com o potássio ($r = 0,66$), de acordo com a Tabela 3.13. A acidez potencial do solo (H+Al) se correlacionou positivamente com o C e o quociente microbianos, com $r = 0,54$ e $0,64$, respectivamente.

Tabela 3.13 - Coeficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de plantio direto na resistência.

	P tecido	C	P	K	Mg	H+Al	CTC 7
CT	ns	ns	ns	0,66**	ns	ns	ns
Cmic	-0,47*	ns	ns	ns	ns	0,54*	ns
qmic	ns	-0,53*	0,51*	ns	ns	0,64**	ns
β glucosidase	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,63**
Desidrogenase	ns	ns	ns	ns	0,49*	ns	ns

** e * significativo a 1 % e 5 %. ns – não significativo. CT - colonização micorrízica total. Cmic - carbono microbiano. qmic - quociente microbiano. P. nitrificação – potencial de nitrificação. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

No PD, para a resiliência ocorreu o maior número de correlações para a desidrogenase com a respiração do solo ($r = -0,64$) e o pH ($r = -0,63$), conforme a Tabela 3.14. O quociente microbiano manteve a correlação negativa com o C do solo ($r = -0,58$). O Na apresentou correlações com a β glucosidase ($r = -0,62$) e a fosfatase ácida ($r = -0,53$).

O potencial de nitrificação se relacionou positivamente com o teor de alumínio ($r = 0,51$) e negativamente com a chuva adicionada ($r = -0,48$) e a umidade ($r = -0,55$), na resiliência, no PD (Tabela 3.14).

Tabela 3.14 - Coeficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de plantio direto na resiliência.

	Chuva ad.	Umidade	RS	C	pH	Na	Al
<i>qmic</i>	ns	ns	ns	-0,58*	ns	ns	ns
β glucosidase	ns	ns	ns	ns	ns	-0,62**	ns
Desidrogenase	ns	ns	-0,64**	ns	-0,63**	ns	ns
Fosfatase ácida	ns	ns	ns	ns	ns	-0,53*	0,49*
P. nitrificação	-0,48*	-0,55*	ns	ns	ns	ns	0,51*

** e * significativo a 1 % e 5 %. ns – não significativo. *qmic* - quociente microbiano. P. nitrificação – potencial de nitrificação. Chuva ad. - chuva adicionada. RS – respiração do solo. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A ILP apresentou maior número de correlações entre os parâmetros biológicos, físicos e químicos, na resistência e resiliência (Tabelas 3.15 e 3.16). Na resistência, o cálcio teve o maior número de correlações a colonização total ($r = -0,58$), o carbono microbiano ($r = -0,59$), a β glucosidase ($r = 0,51$) e a desidrogenase ($r = 0,66$), de acordo com a Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Coeficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de integração lavoura-pecuária na resistência.

	Chuva ad.	P tecido	C	N	pH	P solo	K
CT	ns	ns	ns	ns	-0,60*	ns	ns
Esporos	-0,68**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cmic	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,58*
<i>qmic</i>	ns	ns	-0,55*	-0,55*	ns	ns	ns
β glucosidase	ns	-0,61**	ns	ns	ns	ns	0,63**
P. nitrificação	ns	ns	ns	ns	ns	0,50*	ns
	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC 7	Bases	
CT	-0,50*	-0,58*	ns	0,78**	ns	-0,73**	
Cmic	ns	-0,59*	ns	ns	ns	ns	
β glucosidase	ns	0,51*	ns	ns	ns	ns	
Desidrogenase	ns	0,66**	ns	ns	0,55*	ns	
P. nitrificação	ns	ns	0,60*	ns	0,55*	ns	

** e * significativo a 1 % e 5 %. ns – não significativo. CT - colonização micorrízica total. Cmic - carbono microbiano. *qmic* - quociente microbiano. P. nitrificação – potencial de nitrificação. Chuva ad. - chuva adicionada. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

A colonização micorrízica total apresentou um número alto de correlações com os atributos químicos do solo, na ILP (Tabelas 3.15 e 3.16). Correlações positivas ocorreram com o C ($r = 0,51$), N ($r = 0,62$) e o H+Al ($r = 0,78$) e negativas com o pH ($r = -0,60$), Na ($r = -0,50$), Ca ($r = -0,58$) e a soma de bases ($r = -0,73$).

Na ILP, para a resiliência, o nitrogênio, sódio e magnésio do solo apresentaram o maior número de correlações com os parâmetros biológicos (Tabela 3.16). O potencial de nitrificação se correlacionou positivamente com o pH ($r = 0,53$) e negativamente com a umidade ($r = -0,55$) e a decomposição da serapilheira ($r = -0,60$).

Tabela 3.16 - Coeficientes de correlação de Pearson entre atributos químicos, físicos e biológicos do solo para o sistema de integração lavoura-pecuária na resiliência.

	Umidade	Dec.	C	N	C/N	Ác. húm
CT	0,51*	ns	0,51*	0,62**	ns	ns
CH	ns	ns	ns	ns	ns	0,51*
Cmic	ns	ns	ns	0,55*	ns	ns
Desidrogenase	ns	ns	ns	-0,47*	0,53*	ns
P. nitrificação	-0,58*	-0,60**	ns	ns	ns	ns
	pH	P solo	Na	Mg	Al	
Esporos	ns	ns	0,57*	ns	ns	
Cmic	ns	ns	0,47*	-0,59*	0,58*	
β glucosidase	ns	0,56**	ns	0,48*	ns	
Fosfatase ácida	ns	-0,64**	ns	-0,59*	ns	
P. nitrificação	0,53*	ns	-0,58*	ns	ns	

** e * significativo a 1 % e 5 %. ns – não significativo. CT - colonização micorrízica total. CH - comprimento de hifas. Cmic - carbono microbiano. q_{mic} - quociente microbiano. P. nitrificação – potencial de nitrificação. Dec. - decomposição da serapilheira. Ác. húm. - ácidos húmicos. n = 18.

Fonte: produção do próprio autor, 2017.

5.4 DISCUSSÃO

5.4.1 Avaliação da resistência das comunidades bióticas

Os sistemas de uso solo PD e ILP apresentaram diferenças para algumas variáveis analisadas (Tabela 3.3). O estresse hídrico, ocasionado pela condição de seca ou inundação temporária influenciou alguns dos atributos do solo analisados no período de resistência.

A produção vegetal foi influenciada pelos regimes de chuvas e pelos sistemas de uso do solo. A variabilidade da precipitação pluviométrica é influente na produtividade das plantas, prejudicando o seu desenvolvimento e rendimento (SILVA, 2013). O regime com baixa precipitação diminuiu a fitomassa e acumulação de P na parte aérea do milho (Figura 3.2, Tabela 3.4).

Os FMAs nativos dos sistemas de uso do solo foram eficazes em colonizar as raízes das plantas, para a ILP esta colonização foi 19 % maior que no PD (Figura 3.3). A alteração

na ocorrência e distribuição de FMAs pode ser ocasionada pelo tipo de uso do solo, além de ser influenciada por fatores edáficos e abióticos (SILVA et al., 2015). O regime de chuva não alterou a colonização micorrízica na raiz do milho e a chuva baixa aumentou a número de esporos no PD e ILP (Tabela 3.5). O aumento da umidade pode resultar no aumento da CT e diminuição do número de esporos dos fungos micorrízicos (GUADARRAMA; ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, 1999). Essa alteração nas respostas das populações de FMAs pode modificar as respostas para a reciclagem de nutrientes e para a formação e a estabilidade de agregados no solo (RILLIG, 2004).

A estabilidade de agregados do solo (DMP) diminuiu com o regime de chuva alto, que ocasionou inundação temporária no TME (Figura 3.5). O DMP expressa a resistência à desagregação que os agregados apresentam quando submetidos a forças externas, como o impacto das gotas das chuvas e seu volume no solo. É resultante de interações entre processos biológicos, químicos e físicos que ocorrem no solo (REINERT; REICHERT, 2006). Assim, condições climáticas, os tipos organismos, as raízes de plantas, os resíduos vegetais e a adoção de diferentes sistemas de manejo, são fatores que influenciam a estabilidade dos agregados (LIMA et al., 2003).

A β glucosidase está associada ao ciclo do C e atua na etapa final do processo de decomposição da celulose, sendo detectada em animais, plantas e microrganismos (BALOTA et al., 2013; MATSUOKA et al., 2003). Esta enzima não foi sensível aos regimes de chuvas aplicados, variando entre os sistemas de uso solo, 20 % maior no PD (Tabela 3.6).

A absorção de P do ambiente e sua utilização eficiente são mediadas pelas enzimas fosfatases, ocorrendo a hidrólise de fosfatos orgânicos, normalmente pela atividade de fungos e bactérias (YADAV; TARAFDAR, 2003). A fosfatase ácida foi 11 % menor no sistema de plantio direto em relação à integração lavoura-pecuária (Tabela 3.6). Esta enzima pode variar com a época de amostragem, valores entre 88 e 303 $\mu\text{g } p\text{-nitrophenol g dm}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no PD foram encontrados por Lisboa et al. (2012).

A respiração do solo foi influenciada pela precipitação, o regime de chuva alto liberou mais CO_2 dos sistemas de uso do solo para atmosfera (Figura 3.4). O aumento da precipitação pode elevar a evolução de CO_2 do solo (VALENTINI et al., 2015).

A fração da matéria orgânica do solo humina apresentou interação dos regimes de chuvas e uso do solo (Tabela 3.3). A humina foi influenciada pelos regimes de chuvas no sistema ILP (Tabela 3.7). Esta fração apresenta baixa reatividade, mas é responsável por mecanismos de agregação de partículas e na maioria dos solos tropicais representa a maior parte do carbono humificado do solo (BENITES et al., 2003). Em outro estudo, Silva et al.

(2014) verificaram que a humina apresentou melhor correlação com a agregação do solo, e os fatores que podem alterar a agregação foram relacionados com as mudanças no uso do solo por afetarem a quantidade de argila e matéria orgânica do solo.

5.4.2 Avaliação da resiliência das comunidades bióticas

No período de resiliência, com o regime de chuva normal em todos os tratamentos, as variáveis relacionadas com a produção vegetal (fitomassa, P e N da parte aérea) e a decomposição da serapilheira mantiveram a variação relacionada com os regimes de chuvas aplicados no período de resistência (Tabela 3.7).

Comparando as tabelas de análise de variância (Tabelas 3.3 e 3.7), as variáveis que retornaram a um equilíbrio após o período de estresse hídrico foram o número de esporos, respiração do solo e o diâmetro médio ponderado. Após dois meses de estresse ocasionado pelas chuvas essas variáveis foram alteradas e com o término do período de estresse e retorno da chuva normal (três meses), não sofreram mais influência dos regimes de chuvas aplicados na resistência. Os atributos biológicos podem apresentar rápida velocidade de resposta em retornar ao estado de equilíbrio após períodos de estresse.

A respiração do solo, no período de resistência foi diferenciada pelo uso do solo e regimes de chuvas, no período de resiliência essa diferença ocorreu somente para os sistemas de uso, PD e ILP (Figura 3.9). Este resultado demonstra que o estresse ocasionado pelos regimes hídricos não persistiu quando as condições normais retornaram. A respiração do solo pode ser definida como a produção de CO₂, resultante de processos metabólicos de organismos vivos do solo, e da oxidação química do C (PARKIN et al., 1996). É influenciada pela temperatura, umidade do solo e precipitação, e o aumento da precipitação pode elevar a evolução de CO₂ do solo (VALENTINI et al., 2015), como verificado neste estudo.

A decomposição da serapilheira variou com a umidade do solo, ficando em torno de 64 % no regime de chuva alto, para os dois sistemas de uso do solo, PD e ILP (Figura 3.8). A decomposição da serapilheira resulta no acúmulo da matéria orgânica do solo, na liberação de seus nutrientes e na dissipação de parte do dióxido de carbono, pode variar com a temperatura, umidade e fatores pedológicos (SCHEER, 2008).

O carbono orgânico total e a fração humina variaram entre os sistemas de uso do solo, PD e ILP (Tabela 3.11). Isto pode estar relacionado com diferenças no manejo dos sistemas e matéria orgânica do solo. A presença dos FMAs pode diminuir perdas de até 20 % do C, representam um dreno importante de C da planta (BERBARA et al., 2006). Os ácidos

húmicos são formados principalmente por meio da transformação de resíduos animais e vegetais por microrganismos, da ciclagem do C, H, N e O da matéria orgânica do solo, pela biomassa microbiana (PIMENTA et al., 2009).

Os FMAs não foram influenciados pelos regimes de chuvas do período da resistência, e, continuaram presentes no solo (esporos e hifas) colonizando as raízes do milho (Figura 3.7). Sua presença nos solos é importante, pois estão entre os microrganismos do solo que afetam a nutrição e o crescimento das plantas em condições de campo, pela associação micorrízica arbuscular estabelecidas com seus hospedeiros (GOETTEN et al., 2016). O comprimento de hifas foi 27 % maior no PD, e o número de esporos 73 % maior no ILP. Estes resultados comprovam que os sistemas de uso podem influenciar a dinâmica das estruturas (esporos e hifas) dos FMAs no solo (SILVA et al., 2016).

Em um estudo no estado do Paraná, Schneider et al. (2011) encontraram valores para o comprimento de hifas no solo de plantio direto em torno de de 27,5 e 24,2 cm g⁻¹ no solo sem calagem e, 12,3 e 10,3 cm g⁻¹ com aplicação de calcário. Resultados maiores foram encontrados neste estudo para o PD (70,3 cm g⁻¹) e o ILP (51,3 cm g⁻¹).

A manutenção de palhada na superfície do solo estimula a atividade enzimática, com a decomposição dos resíduos orgânicos e a manutenção de temperatura e umidade mais adequada para a comunidade microbiana (BALOTA et al., 2013). A desidrogenase tem importante papel na oxidação da matéria orgânica, participam da cadeia respiratória dos microrganismos e estão relacionadas com o tipo de solo e às condições de aeração e umidade (BALOTA et al., 2013). Borges (2010) encontrou valores para a enzima desidrogenase de 45,5 µg TTF g⁻¹ de solo 24 h⁻¹ em solo de plantio direto com rotação de cultivo de milho e soja. Neste trabalho, esta enzima variou de 3,03 e 4,97 µg TTF g dm⁻¹ h⁻¹, para o PD e ILP, respectivamente, influenciada pelo tipo de manejo.

A fosfatase ácida variou entre 154 e 178 µg *p*-nitrophenol g dm⁻¹ h⁻¹ para o sistema PD e ILP, respectivamente. Valores superiores foram encontrados por Conte et al. (2002) para o sistema de plantio direto, ficando em torno de 600 µg *p*-nitrophenol h⁻¹g⁻¹ solo, não variando significativamente com aplicações de fósforo no solo.

Em um curto período de tempo, os regimes de chuvas aplicados modificaram as variáveis relacionadas com a produtividade vegetal (fitomassa, P e N da parte aérea) e com a decomposição da serapilheira. As mudanças nas chuvas provavelmente afetarão processos ecossistêmicos, em longo prazo, modificando principalmente a produção primária e liberação de nutrientes e o processo de decomposição causada por efeitos diretos das chuvas (LENSING, WISE, 2006).

Griffiths e Philippot (2013) sugerem que a resistência e a resiliência são regidas por atributos físicos e químicos do solo, estas por sua vez influenciam as comunidades microbianas do solo. E que, essa capacidade de estabilidade dos solos quando submetidos a fatores bióticos ou abióticos, está relacionada não só com as comunidades microbianas, mas também com diversidade vegetal. Logo, a capacidade de resistência e resiliência dos sistemas de uso do solo está relacionada com a qualidade do solo, com sua diversidade biológica, fertilidade e estrutura.

5.4.3 Correlações de Pearson

Na ILP correlações negativas ocorreram para o Ca e o pH na colonização micorrízica. O pH do solo afeta as espécies de FMAs, esse efeito pode variar conforme a espécie, algumas ocorrem em pH mais ácido (pH 4 - 5) e outras em pH mais alto (pH > 6) (SILVA et al., 2015), mas a faixa mais propícia para seu desenvolvimento é entre pH 6 e 7 (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). A presença de sais, como o Ca pode inibir a germinação dos FMAs (CARDOSO et al., 2002) e com isso a colonização nas raízes.

Lourente et al., (2011) encontraram correlações do carbono microbiano com o diâmetro médio ponderado ($r = 0,42$) e com o potássio ($r = -0,37$). Neste estudo para o sistema ILP na resistência, o Cmic também apresentou correlação negativa com o K, $r = -0,58$ (Tabela 3.13).

A desidrogenase se correlacionou com a relação C/N, $r = 0,53$ (Tabela 3.14), a alta relação C/N resulta em imobilização (pelos microrganismos), ao passo que a mineralização ocorrerá quando os resíduos adicionados ao solo tiverem baixa relação C/N (LÓPEZ et al., 1998). Esta enzima também apresentou correlação positiva com o Ca (Tabela 3.13), $r = 0,66$, e o Mg (Tabela 3.11) $r = 0,49$. Resultado também encontrado por Vicente (2010), onde a desidrogenase se correlacionou com Ca ($r = 0,51$) e o Mg ($r = 0,62$).

A fosfatase ácida, na resiliência, para o ILP, se correlacionou negativamente com o teor de fósforo no solo ($r = -0,64$), a atividade desta enzima pode ser inibida pela aplicação de fertilizantes fosfatados (BALOTA et al., 2013).

O potencial de nitrificação apresentou correlações positivas com Al, P, Mg, CTC 7 e pH e negativas com a chuva adicionada, a umidade, a decomposição e o Na. O processo de nitrificação consiste na oxidação do amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-), por intermédio de microrganismos, é um processo acidificante (formação de H^+). A umidade influencia as atividades microbiológicas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006) e o processo de nitrificação como

um indicador da atividade biológica e fertilidade do solo é sensível às alterações do ambiente (LÓPEZ et al., 1998).

5.4 CONCLUSÕES

No período de resistência as variáveis biológicas, respiração do solo e número de esporos foram alterados pelos diferentes regimes de chuvas. Na resiliência estes atributos variaram somente com o uso do solo.

As variáveis relacionadas com a produção vegetal (fitomassa, concentração e acumulação de fósforo na parte aérea) e a decomposição da serapilheira, foram influenciadas pelo estresse hídrico provocado no período de resistência, se mantendo na resiliência.

A fitomassa do milho diminui com o regime de chuva baixo, na resistência e resiliência. O fósforo acumulado na parte aérea do milho diminui com o regime de chuva baixo, nos sistemas PD e ILP, na resistência.

Na resistência, a respiração do solo aumentou e a estabilidade de agregados diminuiu com o regime de chuva alto, no plantio direto e integração lavoura-pecuária.

O número de esporos aumentou com a chuva baixa, no sistema de integração lavoura-pecuária.

Os atributos químicos e físicos apresentaram diferentes relações com os atributos microbiológicos estudados, para os sistemas de uso, plantio direto e integração lavoura-pecuária. As correlações diferenciaram entre os períodos de resistência e de resiliência. O ILP apresentou maior número de correlações entre atributos químicos, físicos e biológicos.

REFERÊNCIAS

- ALGUACIL, M. M.; LUMINI, E.; ROLDÁN, A.; SALINAS-GARCIA, R.; BONFANTE, P.; BIANCIOTTO, V. The impact of tillage practices on arbuscular micorrhizal fungal diversity in subtropical crops. **Ecological Applications**, s.l., v. 18 , p. 527–536, 2008.
- ALLISON, S. D.; MARTINY, J. B. H. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, v. 105, p. 11512-11519, 2008.
- ANDERSON, T. H. Physiological analysis of microbial communities in soil: applications and limitations. In: RITZ, K. D.; GILLER, K. E. (Eds.). **Beyond the biomass**. London: British Society of Soil Science, p. 67-76, 1994.
- ARAÚJO, A. S. F.; MELO, W. J. **Biomassa microbiana do solo**. Teresina: Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí, 2012. 150 p.
- AUGÉ, R. M., STODOLA, A. J. W., TIMS, J. E.; SAXTON, A. M. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. **Plant and Soil**, s.l., v. 230, p. 87-97, 2001.
- BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. Enzimas e seu Papel na Qualidade do Solo. **Tópicos Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 221-278, 2013.
- BASTOS, R. S., MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 21-31, 2005.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, ISSN 1517-5685, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 7 p.
- BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, M. S. (Ed). **Nutrição Mineral de Plantas**. SBCS, Viçosa, 2006. 432 p.

BERG, P.; ROSSWALL, T. Ammonium oxidizer numbers, potential and actual oxidation rates in two Swedish arable soils. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, s.l., v.1, p. 131-140, 1985.

BORGES, C. D. Alterações microbianas do solo sob semeadura direta e rotação de culturas. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Universidade Estadual Paulista, Joticabal, 2010. 99 p.

CARDOSO, E. J. B. N.; NAVARRO, R. B.; NOGUEIRA, M. A. Manganês e germinação de esporos de fungos micorrízicos arbusculares in vitro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 795-799, 2002.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 925-930, 2002.

FISCHER, J.; LINDENMAYER, D. B.; MANNING, A. D. Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes. **Frontiers in Ecology and the Environment**, s.l., v. 4, p. 80-86, 2006.

FOLLI-PEREIRA, M. S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1663-1679, 2012.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 46, p. 235-244, 1963.

GOETTEN, L. C.; MORETTO, G.; STÜRMER, S. L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum produced on-farm and phosphorus on growth and nutrition of native woody plant species from Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, p. 9-16, 2016.

GUADARRAMA, P.; ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, F. J. Abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores in different environments in a tropical rain Forest, Veracruz, Mexico. **Mycorrhiza**, Berlin, v. 8, p. 267-270, 1999.

GRIFFITHS, B. S.; PHILIPPOT, L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. **Federation of European Microbiological Societies**, s.l., v. 37, p. 112-129, 2013.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, p. 499-510, 1965.

KOSKE, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycology Research**, Amsterdam, v. 92, p. 486-505, 1989.

KHURSHEED, S. Soil Biodiversity and Climate Change. **Advances in Plants & Agriculture Research**, s.l., v. 3, p. 1-3, 2016.

LENSING, J. R.; WISE, D. H. Predicted climate change alters the indirect effect of predators on an ecosystem process. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 103, p. 15502-15505, 2006.

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; SILVA, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 199-205, 2003.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores Microbianos de Qualidade do Solo em Diferentes Sistemas de Manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 45-55, 2012.

LÓPEZ, A.; JESUS, H. S.; ROCHA, M. M.; FRIES, M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R. **Diagnóstico do potencial de nitrificação e desnitrificação em solo sob pastagens de *Bracharia sp.* e solo sob plantio direto e convencional**. Embrapa Agrobiologia, Seropédica, 1998. 24 p.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; GOMES, C. F.; GASPARINI, A. S.; ALOVISI, A. M. T.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, p. 20-28, 2011.

MARGESIN, R. Acid and alkaline phosphomonoesterase activity with the substrate p-nitrophenyl phosphate. In: SCHINNER, F.; ÖHLINGER, R.; KANDELER, E.; MARGESIN, R. (Eds.) **Methods of Soil Biology**. Berlin: Springer, p. 213-217, 1996.

MARTÍNEZ-GARCÍA, L. B., MIRANDA, J. D.; PUGNAIRE, F. I. Impacts of changing rainfall patterns on mycorrhizal status of a shrub from arid environments. **European Journal of Soil Biology**, s.l., v. 50, p. 64-67, 2012.

MATSUOKA M., MENDES I.C.; LOUREIRO M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de

primavera do leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 425-433, 2003.

McGONIGLE, T. P. MILLER, M. H.; EVANS, D. G.; FAIRCHILD, G. L.; SWAN, J. A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Saint Paul, v. 115 p. 495-501, 1990.

MELLONI, R. **Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas**. 1996. 83 f. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1996.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006. 729 p.

MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chemical Acta**, Oxford, v 27, p. 31-36, 1962.

ÖHLINGER, R. Dehydrogenase activity with the substrate TTC. In: SCHINNER, F.; ÖHLINGER, R.; KANDLER, E.; MARGESIN, R. (Eds.). **Methods in Soil Biology**. Berlin: Springer-Verlag, p. 241-243, 1996.

PARKIN, T. B.; DORAN, J. W.; FRANCO-VIZCAÍNO, E. Field and Laboratory Tests of Soil Respiration. In: DORAN, J. W. et al. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, p.231-245, 1996.

PIMENTA, A. S.; SANTANA, J. A. S.; ANJOS, R. M.; BENITES, V. M.; ARAÚJO, S. O. Caracterização de ácidos húmicos produzidos a partir de carvão vegetal de duas espécies florestais do semi-árido: jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*). **Revista Verde**, Mossoró, v. 4, p. 01-11, 2009.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. 18 p.

RILLIG, M.C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, s.l., v. 28, p. 355-363, 2004.

SCHEER, M. B. Decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em um trecho de floresta ombrófila densa aluvial em regeneração, Guaraqueçaba (PR). **Floresta**, Curitiba, v. 38, p. 253-266, 2008.

SCHNEIDER, J.; KLAUBERG-FILHO, O.; FONTOURA, S. M. V.; ALVES, M. V. Influência de diferentes sistemas de manejo e calagem em experimento de longa duração sobre fungos micorrízicos arbusculares. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, p. 701-709, 2011.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. **Soil Science**, s.l., v. 164, p. 224-234, 1999.

SILVA, A. S.; SILVA, I. F.; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. O.; SILVA-NETO, L. F. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, p. 1783-1789, 2014.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, V. L. S.; MIGUEL, D. L.; SILVA, E. M. R. Fungos micorrízicos arbusculares: composição, comprimento de micélio extrarradicular e glomalina em áreas de mata atlântica, Rio de Janeiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, p. 419-433, 2016.

SILVA, R. F.; MARCO, R.; BERTOLLO, G. M.; MATSOUKA, M.; MENEGOL, D. R. Influência do uso do solo na ocorrência e diversidade de FMAs em Latossolo no Sul do Brasil. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, p. 1851-1862, 2015.

SILVA, R. R. **Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja no município de Ibirubá-RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SPARLING, G.P.; WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial - C - calibration in situ using microbial respiration an ¹⁴C- labeled cells. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 20, p. 337-343, 1988.

STATSOFT. **STATISTICA 7.0 (data analysis software system)**. [s.l]. 2004. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>> Acesso em: 10 mar. 2017.

STEWART, R. I. A.; DOSSENA, M.; BOHAN, D. A.; JEPPESEN, E.; KORDAS, R. L.; LEDGER, M. E.; MEERHOFF, M.; MOSS, B.; MULDER, C; SHURIN, J. B.; SUTTLE, B.; THOMPSON, R.; TRIMMER, M.; WOODWARD, G. Mesocosm Experiments as a Tool for Ecological Climate-Change Research. **Advances in Ecological Research**, s.l., v. 48, p. 71-181, 2013.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGEL, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*, **Soil Science Society of America**, Madison, p. 778-826, 1994.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

ter BRAAK, C. J. F.; SMILAUER, P. **CANOCO**. Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination, version 4.5. Microcomputer Power, Ithaca, 2002.

VALENTINI, C. M. A.; ABREU, J. G.; FARIA, R. A. P. G. Respiração do solo como bioindicador em áreas degradadas. **Revista Internacional de Ciências**, s. l., v. 5, p. 127-143, 2015.

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

VELTHORST, E. J. **Manual for Chemical Water Analysis**. Wageningen: Agricultural University. 1993.

VICENTE, G. C. M. P. Atributos microbiológicos, físicos e químicos de solos na região do oeste paulista. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2010. 39 p.

YADAV, S. R., TARAFDAR, C. J. Phytase and phosphatase producing fungi in arid and semi-arid soils and their efficiency in hydrolyzing different organic P compounds. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, p. 1-7, 2003.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os fungos micorrízicos arbusculares apresentam diferenças quanto à eficiência na produtividade vegetal e melhoria nos atributos do solo, entretanto, existem lacunas para compreender as características das espécies que determinam seus benefícios. Os estudos ecossistêmicos podem prever ações e reações do ambiente relevantes para o melhor conhecimento das interações que ocorrem no sistema solo-planta-organismos.

Recomenda-se a continuidade das pesquisas com os FMAs que promoveram benefícios na fitomassa e nutrição do milho, sendo estes a *Acaulospora colombiana* SCT115A, *Acaulospora morrowiae* SCT056A, *Gigaspora albida* SCT200A e *Rhizophagus clarus* RJN102A.

A inoculação dos FMAs *Acaulospora colombiana* SCT115A, *Acaulospora koskei* SCT048A, *Acaulospora morrowiae* SCT400B, *Claroideoglossum etunicatum* SCT101A, *Gigaspora albida* SCT200A e *Rhizophagus clarus* RJN102A proporcionaram respostas diferentes e positivas para determinados serviços ecossistêmicos avaliados. A inoculação da *Gigaspora albida* no solo de PD influenciou positivamente a produção vegetal e simbiose micorrízica. A interação de minhocas e conjunto de FMAs aumentou o C microbiano no solo. A inoculação de minhocas epígeas e endógeas diminuiu a colonização micorrízica, que pode ter ocorrido pelo número de indivíduos adicionados no sistema.

A seca interferiu na produção do milho no solo contendo as comunidades naturais dos sistemas PD e ILP. Estudos com inoculações de FMAs podem ser realizados em diferentes sistemas de manejo e precipitações, para avaliar se a produtividade irá se alterar no período de seca.

Os resultados destacam o procedimento de pesquisas futuras, sobretudo com FMAs, avaliando o comportamento destes isolados em outras situações ambientais, devido à importância na produtividade das plantas e benefícios nos processos do solo. Destaca-se ainda a importância de estudos que avaliem maior número de características estruturais dos FMAs, para determinar futuramente como os fatores ambientais alteram a funcionalidade das espécies.