



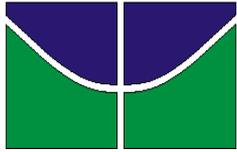
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**COMUNIDADE DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E
GENÓTIPOS DE TRIGO SUBMETIDOS A ESTRESSE HÍDRICO**

DANIEL FERNANDO SALAS MÉNDEZ

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

Brasília, DF
Outubro/2021



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**COMUNIDADE DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E
GENÓTIPOS DE TRIGO SUBMETIDOS A ESTRESSE HÍDRICO**

DANIEL FERNANDO SALAS MÉNDEZ

**ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. ALESSANDRA MONTEIRO DE
PAULA**

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

Brasília, DF
Outubro/2021



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**COMUNIDADE DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E
GENÓTIPOS DE TRIGO SUBMETIDOS A ESTRESSE HÍDRICO**

DANIEL FERNANDO SALAS MÉNDEZ

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDO AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.**

APROVADO POR:

Profª. Dra. Alessandra Monteiro de Paula, FAV – Universidade de Brasília
Orientadora – e-mail: alessandramp@unb.br

Profª. Dra. Maria Lucrecia Gerosa Ramos, FAV – Universidade de Brasília
Examinador Interno – e-mail: lucrecia@unb.br

Dr. Walter Quadros Ribeiro Júnior – Embrapa Cerrados.
Examinador Externo – e-mail: walter.quadros@embrapa.br

Prof. Dr. Thomas Christopher Rhys Williams, BOT – Universidade de Brasília
Examinador Externo – e-mail: tcwilliams@unb.br

Prof. Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, Universidade Federal de Uberlândia
Examinador Externo – e-mail: lucasazevedo@ufu.br

Brasília, DF, 05 de novembro de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Méndez, Daniel Fernando Salas

Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e genótipos de trigo submetidos a estresse hídrico. / Daniel Fernando Salas Méndez; orientação de Alessandra Monteiro de Paula - Brasília, 2021.

120 p.: il.

Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília/ Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2016.

1. *Triticum aestivum* L. 2. Cerrado. 3. Plantio direto. 4. simbiose micorrízica. 5. déficit hídrico. 6. atributos do solo. 7. adubação fosfatada.

I. Paula, Alessandra Monteiro, Orientadora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MÉNDEZ, D. F. S. **Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e genótipos de trigo submetidos a estresse hídrico.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2016, 120 p. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Fernando Salas Méndez

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Relações entre a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e genótipos de trigo submetidos a estresse hídrico.

GRAU: Doutor ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Daniel Fernando Salas Méndez

CPF: 06966677116

E-mail: salas.daf.agro@gmail.com

*Dedico à minha família,
especialmente aos meus pais, Maria Guadalupe e José Alberto*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora de Guadalupe, por guiar meus passos e me dar força e sabedoria para concluir este trabalho.

À minha esposa, Stefany Braz, pelo grande amor, cuidado e companheirismo em todo momento.

À toda minha família pelo incentivo e apoio incondicional em toda minha vida.

Ao CONACyT, pelo auxílio financeiro oferecido durante o curso.

À Universidade de Brasília, por toda a estrutura, áreas experimentais e laboratórios, e pela oportunidade.

À professora Alessandra Monteiro de Paula pelos ensinamentos, apoio e confiança durante esta longa trajetória acadêmica.

À Embrapa Cerrados por disponibilizar estrutura e material para a realização de parte deste trabalho. A Embrapa Hortaliças pela disponibilidade do laboratório de Solos e Nutrição de Plantas.

À coordenação do programa da FAV, e ao Guilherme, assistente da secretaria, pelo suporte em todos os tramites acadêmicos.

À banca examinadora da defesa, Dra. Maria Lucrecia Gerosa Ramos, Dr Walter Quadros Ribeiro Júnior, Dr. Thomas Christopher Rhys Williams, Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo e ao Dr Jader Galba Busato, pela valiosa contribuição neste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, Christina Vinson, Humberto Nasser, Cristiane Andrea, Guilherme Filgueiras e Felipe Filipin que fizeram parte importante na condução dos experimentos deste trabalho.

RESUMO GERAL

O trigo é uma das principais culturas de cereais de grande importância econômica no mundo. No Cerrado brasileiro, seu cultivo é relativamente recente e vem ganhando espaço no cultivo de sequeiro, após a safra de verão. Contudo, fatores climáticos, como períodos de seca, são potenciais ameaças para o declínio da produção. Em contrapartida, diversos estudos vêm demonstrando inúmeros benefícios da simbiose micorrízica na tolerância das plantas a diversos estresses, como o déficit hídrico. No capítulo I foram avaliadas a influência do déficit hídrico na associação micorrízica arbuscular em genótipos de trigo na região do Cerrado. O experimento foi conduzido em sistema plantio direto, utilizando 4 genótipos de trigo e 3 lâminas de irrigação dispostos em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas com 3 repetições. Foram avaliadas a taxa de colonização micorrízica, o carbono da biomassa microbiana do solo; carbono orgânico total do solo; proteína do solo relacionada a glomalina; número de esporos e a caracterização de espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). A colonização micorrízica não foi influenciada pelos genótipos de trigo, mas foi favorecida pela maior disponibilidade hídrica, sendo 44,8% maior comparado à menor lâmina de irrigação. A umidade do solo correlacionou-se positivamente com os atributos microbiológicos do solo exceto o número de esporos. A comunidade de FMA associada aos genótipos de trigo foi similar, abrangendo 12 espécies, predominando *Claroideoglossum etunicatum* e *Glomus macrocarpum*. A baixa variação entre os genótipos de trigo para a estrutura da comunidade de esporos de FMA sugere ausência de influência seletiva das plantas na comunidade de FMA na área do estudo. A disponibilidade hídrica mostrou-se como fator dominante na associação micorrízica. No capítulo II, foi avaliado o efeito da simbiose micorrízica sobre a resposta da cultivar de trigo BRS404 tolerante a seca, submetido a estresse hídrico e níveis de adubação fosfatada. O experimento foi conduzido sob condições controladas em casa-de-vegetação com delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2 x 2 x 4 com 3 repetições, sendo duas condições de irrigação, presença e ausência de FMA e quatro doses de adubação fosfatada. Foram realizadas avaliações em parâmetros biométricos, parâmetros fisiológicos (trocas gasosas), avaliações micorrízicas e teores de nutrientes no tecido vegetal. Plantas micorrizadas apresentaram uma redução de 42% a massa seca da raiz, maiores taxas fotossintéticas e maior eficiência instantânea do uso da água, tanto em tratamentos sem déficit hídrico como nos tratamentos submetidos a estresse hídrico. Do mesmo modo, plantas micorrizadas mantiveram maiores concentrações internas de CO₂ nas condições hídricas avaliadas. Durante o estresse hídrico, a condutância estomática e a transpiração foram maiores em plantas micorrizadas. Essas plantas micorrizadas apresentaram uma redução de 25% no extravasamento de eletrólitos. Nos teores de nutrientes no tecido vegetal, foi observado que plantas não inoculadas apresentaram maiores teores de nutrientes, exceto o fósforo (P). O acúmulo de P em plantas micorrizadas foi, em média, 89% maior que nas plantas não inoculadas. Conclui-se que plantas micorrizadas pela comunidade nativa de FMA são mais tolerantes ao estresse hídrico. Por outro lado, a diversidade de espécies nativas de FMA em área com histórico de cultivo com trigo, pode limitar a absorção e acúmulo de nutrientes no tecido vegetal.

Palavras chave: *Triticum aestivum* L.; Cerrado; Plantio direto; simbiose micorrízica; déficit hídrico; atributos do solo, adubação fosfatada.

ABSTRACT

Wheat is one of the main cereal crops of great economic importance in the world. In the Brazilian Cerrado, its cultivation is relatively recent and has been gaining ground in upland farming, after the summer crop. However, climatic factors, such as periods of drought, are potential threats for a decline in production. On the other hand, several studies have shown numerous benefits of mycorrhizal symbiosis in plant tolerance to various stresses, such as water deficit. In chapter I, the influence of water deficit on arbuscular mycorrhizal association in wheat genotypes in the Cerrado region was evaluated. The experiment was carried out in a no-tillage system, using 4 wheat genotypes and 3 irrigation depths arranged in randomized blocks in a split-plot scheme with 3 replications. The rate of mycorrhizal colonization, soil microbial biomass carbon; total soil organic carbon; glomalin-related soil protein; number of spores and the characterization of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species. Mycorrhizal colonization was not influenced by the wheat genotypes, but it was favored by the greater water availability, being 44.8% higher compared to the lower irrigation depth. Soil moisture was positively correlated with soil microbiological attributes except for the number of spores. The AMF community associated with wheat genotypes was similar, comprising 12 species, predominantly *Claroideoglossum etunicatum* and *Glomus macrocarpum*. The low variation among wheat genotypes for the structure of the AMF spore community suggests the absence of selective plant influence on the AMF community in the study area. Water availability proved to be the dominant factor in the mycorrhizal association. In chapter II, the effect of mycorrhizal symbiosis on the response of drought-tolerant wheat cultivar BRS404, subjected to water stress and phosphate fertilization levels, was evaluated. The experiment was carried out under controlled conditions in a greenhouse with a completely randomized design in a 2 x 2 x 4 factorial arrangement with 3 replications, with two irrigation conditions, presence and absence of AMF and four doses of phosphate fertilization. Evaluations were carried out in biometric parameters, physiological parameters (gas exchange), mycorrhizal evaluations and nutrient content in plant tissue. Mycorrhizal plants showed a 42% reduction in root dry mass, higher photosynthetic rates and greater instantaneous water use efficiency, both in treatments without water deficit and in treatments subjected to water stress. Likewise, mycorrhizal plants maintained higher internal concentrations of CO₂ in the water conditions evaluated. During water stress, stomatal conductance and transpiration were higher in mycorrhizal plants. These mycorrhizal plants showed a 25% reduction in electrolyte leakage. In terms of nutrient content in plant tissue, it was observed that non-inoculated plants had higher nutrient content, except for phosphorus (P). The accumulation of P in mycorrhizal plants was, on average, 89% higher than in non-inoculated plants. It is concluded that plants mycorrhizal by the native AMF community are more tolerant to water stress. On the other hand, the diversity of native AMF species in an area with a history of wheat cultivation may limit the absorption and accumulation of nutrients in plant tissue.

Keywords: *Triticum aestivum*; Cerrado; no-till; mycorrhizal symbiosis; water deficit; soil attributes, phosphate fertilization.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	Impactos da seca na agricultura	18
2.2.	A cultura do trigo no Brasil e no Cerrado	21
2.3.	Estresse hídrico nas culturas	24
2.4.	Fungos Micorrízicos Arbusculares e o estresse hídrico	28
3.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
	RESUMO	50
	ABSTRACT	51
1.	INTRODUÇÃO	52
2.	MATERIAL E MÉTODOS	54
2.1.	Caracterização e histórico da área experimental	54
2.2.	Delineamento experimental e condução do experimento	55
2.3.	Coleta e variáveis analisadas	58
2.4.	Análises estatísticas	59
3.	RESULTADOS	60
3.1.	Atributos microbiológicos do solo e simbiose micorrízica	60
3.2.	Ocorrência e distribuição de espécies de fungos micorrízicos arbusculares	61
4.	DISCUSSÃO	65
4.1.	Atributos microbiológicos do solo e simbiose micorrízica	65
4.2.	Ocorrência e distribuição de espécies de fungos micorrízicos arbusculares	66
5.	CONCLUSÕES	68
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	CAPÍTULO II – CONTRIBUIÇÃO DOS FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NA TOLERÂNCIA DO TRIGO AO ESTRESSE HÍDRICO	76
	RESUMO	76
	ABSTRACT	77
1.	INTRODUÇÃO	78
2.	MATERIAL E MÉTODOS	80
2.1.	Instalação e condução do experimento	80

2.2.	Avaliações fisiológicas, biométricas e micorrízicas	83
2.3.	Análises estatísticas	84
3.	RESULTADOS	85
3.1.	Avaliações de parâmetros biométricos.....	85
3.2.	Avaliações de parâmetros fisiológicos.....	88
3.3.	Avaliações micorrízicas	94
3.4.	Teores de macro e micronutrientes do tecido vegetal	95
4.	DISCUSSÃO	99
5.	CONCLUSÕES	102
6.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	103

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1. Carbono da biomassa microbiana (CBM); Carbono orgânico total (COT); Proteína do solo relacionado a glomalina (PSRG-FE); Taxa de colonização micorrízica (CM) e número de esporos em um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm. 60

Tabela 2. Correlação de Pearson nos atributos de um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm. 61

Tabela 3. Diversidade de espécies de FMA identificados morfológicamente de um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm. 63

Capítulo II

Tabela 5. Análise química de um Latossolo vermelho após a calagem e adubação corretiva e previa à adubação da cultura de trigo de sequeiro para o Cerrado..... 81

Tabela 6. Médias dos parâmetros biométricos avaliados no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo. 86

Tabela 7. Desdobramento da interação dos fatores inoculação x doses de fósforo e condição hídrica na avaliação de parâmetros biométricos no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo. 87

Tabela 8. Médias dos parâmetros fisiológicos avaliados no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo para cada condição hídrica. 92

Tabela 9. Desdobramento da interação dos fatores micorriza x doses de fósforo em cada condição hídrica na avaliação de parâmetros fisiológicos no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo. 93

Tabela 10. Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob efeito de doses de fósforo e níveis de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares.	96
Tabela 11. Desdobramento da interação dos fatores micorriza x doses de fósforo x níveis de irrigação nos teores de micronutrientes (mg kg^{-1} MS) no tecido vegetal de trigo cultivar BRS404 submetido a estresse hídrico sob o efeito de micorrização e níveis de adubação fosfatada.	97
Tabela 12. Desdobramento da interação dos fatores micorriza x doses de fósforo x níveis de irrigação nos teores de macronutrientes (mg kg^{-1} MS) no tecido vegetal de trigo cultivar BRS404 submetido a estresse hídrico sob o efeito de micorrização e níveis de adubação fosfatada.	98

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

- Figura 1. Dados climatológicos de temperatura média e precipitação acumulada mensal da região do Distrito Federal (Normal climatológica 1961 – 1990). Fonte: Inmet (2019).
..... 54
- Figura 2. Lâminas de irrigação aplicadas, no período de 35 a 71 dias após o plantio, a partir da reposição da evapotranspiração da cultura (Rep ETc) em diferentes regimes hídricos e diferentes genótipos de trigo em um Latossolo vermelho no Cerrado. 57
- Figura 3. Esquema representando as lâminas médias aplicadas e lâmina total acumulada no ciclo de diferentes genótipos de trigo em um Latossolo vermelho no Cerrado. 57
- Figura 4. Análise de correspondência canônica da frequência de esporos de espécies de fungos micorrízicos arbusculares e atributos do solo em um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm. Am=*Acaulospora mellea*; Ar=*Acaulospora rehmi*; As=*Acaulospora scrobiculata*; Aml=*Ambispora leptoticha*; Ce=*Claroideoglossum etunicatum*; Gc=*Glomus clavisporum*; Gma=*Glomus macrocarpum*; Gmi=*Glomus microagregatum*; Gsp=*Glomus sp.*; Sg=*Scutellospora gregária*; Sc=*Scutellospora cerradencis*; Ggsp=*Gigaspora sp.* TOC=carbono orgânico total; Cmic=carbono da biomassa microbiana; EEG=proteína do solo relacionado à glomalina – facilmente extraível; Genotypes=Brilhante, PF020037, BRS404, PF080492. 64

Capítulo II

- Figura 1. Medias da temperatura (°C) e Umidade relativa do ar (UR) durante a condução do experimento de trigo sob adubação fosfatada variável e estresse hídrico em casa de vegetação. 83
- Figura 2. Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), concentração de carbono interno (Ci), transpiração foliar (E), condutância estomática (gs), extravasamento de eletrólitos (EE), eficiência instantânea do uso da água (EUA), índice de clorofila total e teor relativo de

água na folha (TRA) no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo..... 91

Figura 3. Número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) recuperados em 50 ml de solo sob cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo. 94

1. INTRODUÇÃO GERAL

O constante crescimento populacional representa um desafio para a agricultura na produção de alimentos nas próximas décadas. Estima-se que para o ano 2050, a média populacional alcance 9,7 bilhões de pessoas (ONU, 2021), aproximadamente 22,7% maior do que no presente ano (2021). Dessa forma, será necessária uma agricultura mais eficiente na produção global de alimentos.

Entretanto, os efeitos das mudanças climáticas na agricultura são cada vez mais preocupantes, uma vez que já são observadas irregularidades dos padrões sazonais e temporais da precipitação pluviométrica, cada vez mais frequentes (Batista De Jesus et al., 2021), confirmando projeções passadas de Adam et al. (2009) e Seneviratne et al. (2010). Dessa forma, a disponibilidade de água para as culturas é afetada de forma direta ou indireta, em culturas anuais de sequeiro, as quais são dependentes da distribuição chuvas (Elliott et al., 2014; Mihailescu & Soares, 2020; Worku et al., 2019).

O Brasil, um dos maiores produtores de grãos no mundo e com grande potencial de expansão, é considerado, para o futuro, como um dos maiores contribuidores de alimentos no mundo e, conseqüentemente, contribuir para a segurança alimentar (Saath & Fachinello, 2018). No entanto, dentre de vários outros obstáculos, os efeitos das mudanças climáticas podem limitar o aumento da produção agrícola (Abramovay, 2010; DePaula, 2020; Zilli et al., 2020).

No Brasil, espera-se, que nas próximas décadas, os efeitos das mudanças climáticas propiciem períodos de dias secos mais frequentes e prolongados na região nordeste e leste da Amazônia, aumentos da temperatura e extremos de precipitação no Sul e Sudeste e aumento da temperatura no Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Marengo, 2014). Para o Centro-Oeste, também se prevê tanto anos mais chuvosos quanto outros mais secos (Bombardi & Véspoli De Carvalho, 2008).

Os períodos de seca nas culturas, ocasionando déficit hídrico para as plantas, são um dos principais fatores que comprometem a produção de alimentos no mundo, sendo responsável pelo sucesso ou fracasso da produção agrícola (Abdelkader & Elshorbagy, 2021; Allahverdiyev et al., 2015; Giroto et al., 2012).

Em decorrência disso, é de grande importância buscar estratégias que consigam minimizar ou enfrentar os impactos causados por esse tipo de fenômenos, e garantir a

produção de alimentos que tem o desafio pela crescente demanda. No contexto de uma agricultura conservacionista, isso só pode ser alcançado pelo uso eficiente dos recursos disponíveis e adaptação de estratégias e tecnologias mais sustentáveis, dentre eles, uso e manejo eficiente da irrigação, desenvolvimento de cultivares tolerantes ao estresse hídrico e manejo do solo (FAO, 2011).

No Cerrado brasileiro, novas cultivares com maior eficiência do uso da água vêm sendo mais frequentes, como tecnologia para o maior aproveitamento dos recursos hídricos e da irregularidade da estação chuvosa da região. Um exemplo disso é o trigo tolerante ao calor e seca cultivados no sequeiro, após a safra de verão, no final da estação das chuvas.

Apesar de a maior produção do grão de trigo se concentre na região sul do país (CONAB, 2021), a região do Cerrado, principalmente o centro-oeste do país, possui um grande potencial para a expansão desta cultura e aumentar a produção nacional, pois apesar do Brasil ser um dos principais produtores de grãos do mundo, a produção do trigo não é o suficiente para suprir a demanda nacional. Na safra de 2021, o cultivo de trigo na região Centro-Oeste cresceu 84,7% (106,6 mil hectares) em relação à safra anterior que era cerca de 57,7 mil hectares (CONAB, 2021). No período 2020/2021, o Brasil importou aproximadamente 6.500 milhões de toneladas deste cereal, posicionando-se no terceiro país maior importador de trigo (USDA, 2021).

O cultivo de trigo no Cerrado, também é uma alternativa de cultivo para rotação de culturas e diversificação de espécies vegetais no sistema de produção com foco no sistema plantio direto (Cazetta et al., 2007; Condé et al., 2009). Este sistema de manejo que visa aumentar os teores de matéria orgânica do solo (MOS) e contribui para a conservação do solo e melhora da estrutura que será refletido numa maior disponibilidade hídrica para as plantas (Costa et al., 2006; Lal, 2004; Loss et al., 2011). Isso é importante para diminuir o estresse causado pelo déficit hídrico em comparação com sistemas convencionais de manejo do solo.

A MOS e a disponibilidade de água afetam a abundância e diversidade de microrganismos do solo (Muhammad et al., 2021; Woolet & Whitman, 2020). Os microrganismos do solo são de grande importância nos processos físicos e químicos do solo e podem contribuir para uma intensificação e aumento dos alimentos de uma forma mais sustentável pelo uso eficiente dos recursos e nutrientes do solo promovendo o

crescimento e produção das plantas (Bennett et al., 2013; Garland et al., 2021). Estes microrganismos são responsáveis pelo equilíbrio dos agroecossistemas, pois participam na ciclagem de nutrientes (Hoffmann et al., 2018; M. Zhang et al., 2021) e na participação como promotores de crescimento de plantas como rizobactérias e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (Bender & van der Heijden, 2015; Oleńska et al., 2020; Truber & Fernandes, 2014).

Os FMA são fungos biotróficos obrigatórios que colonizam raízes de plantas formando simbiose com mais de 80% das espécies de plantas vasculares (Chen et al., 2018). A simbiose micorrízica melhora a nutrição, principalmente em fósforo (P), resultando em aumento no desenvolvimento da planta e na tolerância das plantas hospedeiras a estresses bióticos e ambientais). Os FMA podem contribuir para diminuir a aplicação de fertilizantes fosfatados e micronutrientes nas culturas (Bennett et al., 2013), bem como diminuir os efeitos de estresses causados por déficit hídrico (Gholinezhad et al., 2020; J. M. Ruiz-Lozano & Aroca, 2017). Entretanto, diversos estudos afirmam que eficiência da simbiose depende de fatores como os teores de P no solo.

De forma indireta, os FMA também podem aumentar a tolerância ao estresse hídrico das plantas devido a melhoria e estabilidade da estrutura do solo (Rapparini & Peñuelas, 2013; Wu & Zou, 2017). Isto pela produção e deposição de glomalina, exsudado pelas hifas extra-radiculares, atuando como um cimentante de partículas do solo e pela ação mecânica do micélio externo e raízes infectadas em partículas dispersas do solo, formando assim, micro e macroagregados mais estáveis.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de genótipos de trigo de sequeiro submetidos a estresse hídrico sobre a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e a contribuição da simbiose micorrízica na tolerância das plantas ao estresse hídrico sob níveis de adubação fosfatada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Impactos da seca na agricultura

Segundo a ONU (2021), a média da população mundial alcançará 9,7 bilhões de pessoas para o ano 2050. Com isto, a produção mundial de alimentos, nas próximas décadas, deve aumentar drasticamente em decorrência da demanda pelo constante crescimento populacional (FAO, 2011). Isso não seria uma grande preocupação se o nosso planeta não apresentasse variabilidade climática e fenômenos extremos ambientais como as secas prolongadas ou chuvas intensas.

Espera-se que as mudanças climáticas, em consequência do aumento da temperatura média do ar e dos oceanos, modifiquem os ciclos de água e energia e da mesma forma altere os padrões sazonais e temporais da precipitação (Adam et al., 2009; Seneviratne et al., 2010). Com isto, é provável um grande impacto pela demanda de água das lavouras, disponibilidade de água para a irrigação e, conseqüentemente, declínio da produtividade (Elliott et al., 2014; Wada et al., 2013).

No Brasil, os efeitos das mudanças climáticas já são observados com maior frequência, como as intensas secas no Nordeste e Sudeste do país, gerando grande impacto nas cadeias de produção energética, hídrica e alimentar. As projeções para as próximas décadas, indicam um aumento da temperatura e extremos de calor, principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, assim como o aumento de dias secos consecutivos no leste da Amazônia e no Nordeste e aumento de extremos de precipitação no Sul e Sudeste do país (Marengo, 2014).

Na região Centro-Oeste, prevê-se a ocorrência de eventos extremos, tanto anos mais chuvosos como anos mais secos (Bombardi & Véspoli De Carvalho, 2008) e, devido a sua contínua expansão agrícola e as ameaças desses eventos, a economia nacional apresentaria perdas significativas, chegando a 4,5% do produto interno bruto (PIB) em 2050 (Marengo, 2014).

O bioma Cerrado é predominante nesta região, onde também ocorrem naturalmente os chamados “veranicos” que comprometem a produção das safras. Os veranicos são períodos de estiagem durante a época da chuva com duração de uma a três semanas (Lopes et al., 2012) e extremos superiores a 30 dias (Menezes et al., 2010),

porém, nas últimas décadas vêm ocorrendo de forma mais frequente e pronunciada devido às mudanças climáticas (Gava et al., 2018).

Este fenômeno compromete as safras e safrinhas de grãos da região, pois geralmente atingem a cultura na fase da floração, maturação e enchimento de grãos, fase em que o requerimento da disponibilidade hídrica torna-se maior (Assad et al., 1993; Menezes et al., 2010) e, na ausência desta, a produção é fortemente comprometida. Assim os veranicos são considerados como um fator limitante para a produção agrícola na região do Cerrado (Hernandez et al., 2003).

O déficit hídrico causado pelos veranicos é variável e depende da interação de fatores de duração, intensidade e frequência; fase fenológica da cultura; condições ambientais tais como a temperatura e a umidade relativa do ar; características físicas do solo e pelas práticas de manejo adotados (F. A. Silva et al., 2015). Entretanto, este fenômeno correlaciona-se a altas taxas de evapotranspiração das culturas (ET) (Lopes et al., 2012).

Dessa forma, o déficit hídrico como consequência dos efeitos adversos da precipitação implicam na perda parcial ou total de safras a curto prazo e da redução da produção a longo prazo, e da mesma forma, compromete o mercado, o emprego e a segurança alimentar (Ely et al., 2003; Nelson et al., 2009). Este é um grande desafio para a nossa agricultura na produção de alimentos de acordo com a crescente e constante demanda.

No entanto, a comunidade científica está na procura de novos enfoques e soluções para a adaptação a esses fenômenos climáticos extremos, com o desenvolvimento de ciência e tecnologias com o objetivo de assegurar o fornecimento de energia, água e garantir a segurança alimentar (Rasul & Sharma, 2015).

Segundo a FAO (2011), o declínio da produção agrícola, tanto local como mundialmente, devido às mudanças climáticas, pode ser evitado com a irrigação e manejo adequado de bacias hidrográficas, variedades de cultivo e forragens adaptadas às condições de mudança do clima, assim como o uso eficiente no cultivo da terra no contexto agrícola e pecuário.

Globalmente, a irrigação é uma das principais tecnologias que proporciona o equilíbrio da produção, evitando possíveis interferências ocasionadas pela falta de água.

Sabe-se que o setor agrícola é o maior consumidor de água no mundo e ainda está em constante expansão, sendo no momento atual responsável pelo consumo de cerca de 70% do total de água doce extraída (ANA, 2017). Apesar da pressão exercida sobre os recursos hídricos, o uso desta tecnologia garante o aumento de produção de alimentos e evita perdas pela falta da precipitação durante a safra. A irrigação pode incrementar a produtividade em 2,7 em relação ao cultivo em sequeiro que depende de irregularidades das chuvas (Christofidis, 2013), e fornece aproximadamente 40% dos alimentos do mundo (FAO, 2011). Sem irrigação, produção global de cereais diminuiria aproximadamente em 20%, de modo que seria necessário mais áreas para produzir a mesma quantidade de alimento (Foley et al., 2011).

No Brasil, a área irrigada entre 1960 e 2015 aumentou significativamente de 462 mil hectares a 6,95 milhões de hectares e está em constante expansão, podendo ser ampliado a mais de 45% até o ano 2030 (ANA, 2017). Entretanto, o uso desta tecnologia não está ao alcance de todo sistema agrícola, principalmente para pequenos produtores rurais e áreas restringidas ao uso da água para a agricultura. Por outro lado, na ocorrência de questionamentos por parte da sociedade civil, em situações de escassez, ressalta-se que o uso prioritário deste recurso é para o consumo humano (Brasil, 1997).

Outra tecnologia que vem ganhando espaço na agricultura sustentável e promete diminuir os impactos negativos de períodos de estiagem imprevistos é o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a seca ou uso eficiente da água.

Dessa forma, o melhoramento genético de plantas tem contribuído significativamente para o aumento de alimentos, fibras e energia durante várias décadas. O melhoramento genético busca o desenvolvimento de cultivares com alta produtividade, estabilidade de produção, assim como a qualidade do produto voltada numa produção mais sustentável e garantido as exigências tanto pelos produtores como pelos consumidores. Assim, cabe aos órgãos de pesquisa em melhoramento genético, maiores investimentos e esforços para garantir a produção de alimentos em situações de incertezas oriundas dos estresses ambientais causados pelas alterações climáticas em diferentes ambientes de nosso planeta (Ferrão et al., 2018).

2.2. A cultura do trigo no Brasil e no Cerrado

O trigo (*Triticum aestivum* L.), pertence à família das Poaceas, é um cereal de grande importância na alimentação humana desde a antiguidade. O trigo representa, aproximadamente, 30% da produção mundial de grãos (Mori & Ignaczak, 2011), e com isso torna-se de grande importância na economia mundial atual, juntamente com o milho e arroz (Takeiti, 2015; Wang et al., 2012).

O trigo foi introduzido na América no final do século XV pelos espanhóis, na descoberta do novo mundo, e no começo do século XVI foi introduzido no Brasil pelos portugueses. Provavelmente foi uma das primeiras culturas plantadas no país durante a colonização e só adquiriu importância econômica a meados do século XVIII, no Brasil colonial (Rossi & Neves, 2004).

A produção de trigo no Brasil é de 7,9 milhões de toneladas, posicionando-se no décimo sexto lugar no ranking mundial dos países produtores desse cereal (USDA, 2021). As regiões Sul, Sudeste e Centro-sul são as principais produtoras de trigo de inverno no país, embora a região Sul concentre a maior produção nacional. No último ano a região Centro-Oeste alcançou 5% da produção nacional, com destaque para o Goiás (CONAB, 2021).

Na região Centro-Oeste, no Cerrado brasileiro, destacam-se os estados de Mato Grosso do Sul e Goiás e o Distrito Federal, como os responsáveis pela maior produção de trigo na região e no bioma. Em 2021, a produtividade média do Centro-Oeste foi de 3,025 kg ha⁻¹, média superior à média nacional (2.693 kg ha⁻¹) (CONAB, 2021). Isto é resultado do manejo e da tecnologia utilizada para a produção desta cultura, principalmente da irrigação, podendo alcançar produtividades de até 6 t ha⁻¹.

A área plantada no Centro-Oeste em 2021 foi de 106,6 mil ha, 84,7% maior que no ano anterior (57,7 mil ha) (CONAB, 2021). A tendência para a cultura do trigo nesta região e no Cerrado em geral é de aumentar nos próximos anos. Isto, em razão das altas produtividades e da qualidade do grão cultivado no Cerrado, como consequência das condições ótimas de clima e solo para a sua produção proporcionando características superiores de qualidade industrial para panificação, além de uma posição estratégica de mercado e industrialização (Galindo et al., 2015).

O DF, muito provável pela dimensão territorial, apenas representou o 2,4% da área plantada em 2021 na região Centro-Oeste. É possível encontrar produtividades altas, principalmente para o trigo irrigado, podendo superar as médias de 6 t ha⁻¹. A produtividade média estimada do trigo em sequeiro foi de 2.400 kg ha⁻¹ enquanto o trigo irrigado a média resultou em 6000 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021).

O cultivo de trigo no Cerrado brasileiro, especificamente no Centro-Oeste, contribui para a diversificação do sistema agrícola dentro do contexto de rotação de culturas. Nesta região, por apresentar duas estações climáticas bem definidas, é possível programar a colheita em épocas de baixa pluviosidade e obter grãos de boa qualidade (Condé et al., 2009).

No Cerrado, o trigo é cultivado em duas modalidades, dependendo da época de semeadura: cultivo sob sistema de irrigação (trigo irrigado) e cultivo de sequeiro (trigo de sequeiro). O cultivo de trigo irrigado possui um alto potencial de rendimento de grãos. A maior demanda em tecnologia e investimento da lavoura irrigada é compensada na produção e qualidade do grão, sinônimo de maior lucratividade.

O trigo irrigado ocorre entre o final e o começo da próxima temporada de chuvas. É plantado entre a metade do mês de abril a na última semana de maio. Nesse período, especialmente se semado na primeira quinzena de maio, a qualidade dos grãos é ainda maior, pois evita-se maior incidência de brusone causado pelo fungo *Magnaporthe grisea* que é de difícil controle e, por outro lado, diminui-se o risco da colheita coincidir com o início da chuva da próxima temporada (PIRES et al., 2011; Ribeiro Júnior et al., 2007). Com o trigo irrigado, a produtividade média pode aumentar em até três vezes em comparação com o trigo de sequeiro (Ribeiro Júnior et al., 2007).

Existem diversas cultivares de trigo irrigado daptadas na região, as cultivares BRS 254 e BRS 264 são as mais plantadas, representando aproximadamente 80% da área plantada, tendo sido introduzidas em 2005. Estas cultivares contribuem de forma importante para a diversificação dos sistemas de produção (Embrapa, 2018).

O trigo de sequeiro, é plantado no final do verão, após a safra principal quando ainda há precipitações pluviais, reduzindo o custo de produção da lavoura (Cargnin et al., 2006). A produtividade média varia de 1,5 a 3,0 t ha⁻¹, dependendo da disponibilidade distribuição das chuvas. O trigo de sequeiro vem ocupando maior área plantada nos

últimos anos no Centro-Oeste brasileiro (CONAB, 2021) podendo alcançar quatro milhões de hectares na região do Cerrado (Ribeiro et al., 2012).

O incremento do cultivo de trigo de sequeiro se deve ao interesse de incrementar a produção nacional, e é uma alternativa de rotação de culturas como prática para diversificação de espécies no sistema plantio direto (Cazetta et al., 2007; Condé et al., 2009), isto é possível pela introdução de novas variedades menos susceptíveis ao déficit hídrico, bem como tolerantes a temperaturas elevadas e a doenças.

Ao ser plantado na sucessão da safra e proporcionar cobertura do solo pela palhada, o trigo cultivado em sequeiro melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, diminui a incidência de ataque de pragas e doenças e controle de plantas espontâneas. Do mesmo modo, o cultivo do trigo se beneficia da adubação residual da cultura anterior, o que torna mais eficiente o sistema de produção (Embrapa, 2017). Nos últimos anos, o cultivo de trigo de sequeiro vem ganhando espaço nas áreas de produção (Pasinato et al., 2018), estima-se que na última safra dessa cultura 60% da área plantada foi destinada para as lavouras sem manejo de irrigação (CONAB, 2021).

No entanto, nas áreas de Cerrado o trigo de sequeiro está exposto a ocorrências de doenças como a brusone (PIRES et al., 2011) e a riscos ambientais como ao calor e distribuição hídrica irregular, em decorrência de veranicos prolongados mais frequentes (Gava et al., 2018; E. R. Silva et al., 2018; Souza & Ramalho, 2001).

Em função do alto risco que o cultivo de sequeiro representa ao produtor, o plantio do trigo nessas condições não requer altos investimentos. Em contrapartida, as instituições brasileiras de pesquisa vêm desenvolvendo cultivares mais rústicas, tolerantes a estresses tanto bióticos como ambientais, como é o caso do estresse hídrico e à melhoria das características agrônômicas e de qualidade tecnológica, e dessa forma, aumentando o potencial de produção (C. N. A. de Sousa & Caierão, 2014).

2.3. Estresse hídrico nas culturas

De modo geral, o déficit hídrico é um dos principais fatores limitantes da produção agrícola ocorrendo em grandes extensões de áreas cultiváveis no mundo (Allahverdiyev et al., 2015; Girotto et al., 2012). A deficiência hídrica está altamente relacionada com altas taxas da evapotranspiração (ET), regulado pela disponibilidade de energia, demanda atmosférica e umidade do solo (Novák, 2012).

Na cultura do trigo, a disponibilidade hídrica está intimamente relacionada com a produção e qualidade de grãos. A produtividade desta cultura, depende da quantidade disponível de água no solo, e na sua deficiência, o rendimento da cultura pode ser reduzido significativamente (Abdelkader & Elshorbagy, 2021; Girotto et al., 2012). A resposta dessa cultura, a períodos de déficit hídrico, depende da duração e intensidade do estresse, estágio de desenvolvimento da cultura e a resistência ou tolerância do cultivar (Beltrano & Ronco, 2008; Taiz et al., 2017).

Na maioria das plantas, a água representa 95% da biomassa verde e é responsável pela integridade funcional das células, tecidos e órgãos. A água participa em inúmeras funções fisiológicas, estruturais e moleculares que garantem a sobrevivência das plantas. Aproximadamente, 97% da água absorvida pelas plantas é transpirada (produto do metabolismo da planta) e retorna para a atmosfera como resultado da evapotranspiração (ET) (Taiz & Zeiger, 2013).

Do mesmo modo, também participa no movimento e absorção de nutrientes essenciais conhecido como fluxo de massa, e a sua disponibilidade garante ou compromete o crescimento das plantas, tanto pelo excesso como pela deficiência (Chavarria & Santos, 2012; Taiz et al., 2017).

Em situações de déficit hídrico na planta, ocorre uma redução do conteúdo de água na sua estrutura, desse modo, ocorre perda de turgescência, fechamento dos estômatos e conseqüentemente ocorrerá menor eficiência fotossintética (Amaral et al., 2006; Hernandez et al., 2003).

Em decorrência desse estresse, a planta desenvolve mecanismos morfofisiológicos com a finalidade de economizar água para seu posterior uso e assim garantir seu ciclo, produzir sementes (R. F. Santos & Carlesso, 1998; Taiz et al., 2017),

de forma simplificada, é a adaptação da planta a esse ambiente aumentando a eficiência do uso da disponibilidade da água (Taiz & Zeiger, 2013).

Entre as estratégias ou mecanismos que contribuem para minimizar os impactos ao déficit hídrico temos: a) o escape à seca, é a capacidade da cultura de completar o seu ciclo antes de que o déficit hídrico comprometa seu desenvolvimento, basicamente antes do término da estação chuvosa, como exemplo, temos as culturas anuais; b) o retardo, corresponde à capacidade da planta em se manter hidratada em períodos de deficiência hídrica através da diminuição de perda de água pela transpiração através do fechamento estomático e redução da área foliar, do mesmo modo, pelo aumento de absorção de água através do investimento na produção e aprofundamento das raízes; c) tolerância à seca, é a capacidade das plantas em manter seu metabolismo sob baixos níveis de potencial hídrico nos tecidos por meio de processos fisiológicos específicos como o ajuste osmótico. Isto é alcançado pelo acúmulo de solutos osmólitos, como os açúcares, hexoses, aminoácidos (prolina e outros), que permitem a manutenção da pressão de turgescência em troca da diminuição do potencial osmótico (Yujie Fang & Xiong, 2015; Manavalan et al., 2009; Verslues et al., 2006). Por outro lado, também existe o mecanismo após o déficit hídrico, recuperação à seca, considerada como a capacidade da planta a continuar seu desenvolvimento e completar seu ciclo após ser exposta a um período de estresse hídrico (Yujie Fang & Xiong, 2015).

Sob déficit hídrico, as formas de adaptação das plantas são resultantes de interações morfológicas, fisiológicas e moleculares. Por exemplo, o murchamento das folhas reduz a perda de água e exposição à luz incidente diminuindo o estresse ao calor. Outra estratégia é a diminuição da área foliar e o aumento do sistema radicular. No entanto, esta estratégia acaba sendo limitante para o desenvolvimento da planta, pois a taxa fotossintética diminui em decorrência da menor área (Araújo et al., 2010; D. dos Santos et al., 2012).

Segundo Taiz et al. (2017), os efeitos fisiológicos e bioquímicos como consequência de estresse hídrico podem ser classificados em efeitos primários e secundários. Os efeitos primários são a redução do potencial hídrico; desidratação celular e resistência hidráulica. Os efeitos secundários são a redução da expansão celular/foliar; redução das atividades celulares e metabólicas; fechamento estomático; inibição fotossintética; abscisão foliar; alteração da partição do carbono; citorrise; cavitação;

desestabilização de membranas e proteínas; produção de espécies reativas de oxigênio; citotoxicidade iônica e morte celular.

Um dos efeitos mais comuns da planta é o comportamento da abertura e fechamento dos estômatos, o qual regula a perda de água da planta na forma de vapor. Os estômatos são os responsáveis pela troca gasosa entre as folhas e o meio externo. A abertura e fechamento dos estômatos está intimamente relacionada com a disponibilidade de água no solo, mediada pela resistência estomática (Castro Neto, 2003). Em condições de déficit hídrico, o fechamento dos estômatos é uma estratégia que diminui a taxa de transpiração da planta, mantendo-a túrgida. Entretanto, a atividade fotossintética é afetada devido à diminuição da entrada de CO₂, resultando numa fotossíntese líquida reduzida e, conseqüentemente o crescimento e o desenvolvimento da planta é comprometido (Amaral et al., 2006; Larcher, 2000).

Entender a capacidades das plantas a se adaptar e recuperar a períodos de estresse hídrico é de grande importância para nossa agricultura devido às elevadas perdas da produção como resultado aos efeitos da seca pelas mudanças climáticas (Abid, Tian, Ata-Ul-Karim, Wang, et al., 2016).

Genótipos de plantas denominadas tolerantes a estresse hídrico ou a seca, são aquelas que conseguem manter as suas funções fisiológicas em situações de deficiência hídrica, e ainda serem capazes de se reproduzir (Bassett, 2013).

As cultivares de trigo consideradas como tolerantes à seca, após um período de estresse hídrico severo e recuperação hídrica, nem sempre apresentam recuperação completa, desse modo, a produção de massa seca e produção de grãos são afetados, e a dimensão do prejuízo é dependente da intensidade da seca, adaptabilidade e recuperação das cultivares e fases fenológicos de crescimentos na ocorrência do estresse (Abid, Tian, Ata-Ul-Karim, Wang, et al., 2016).

Entretanto, é necessário entender a relação entre a os fatores associados para maior resposta das plantas (Lizana et al., 2006). Desse modo, diversos trabalhos vêm buscando estratégias ou manejos que, de forma direta ou não, podem aumentar a eficiência do potencial de genótipos tolerantes a seca.

Em cultivares de trigo tolerantes à seca, é possível encontrar alterações morfológicas e fisiológicas, ainda, após um período severo ou moderado de estresse

hídrico durante o ciclo da cultura (Abid, Tian, Ata-Ul-Karim, Wang, et al., 2016). Estes autores estudaram o comportamento de cultivares de trigo tolerantes a seca em situações de estresse hídrico e observaram alterações nas características foliares, crescimento e atividades fisiológicas durante o estresse hídrico e períodos de reidratação. Dessa forma, conseguiram determinar materiais mais tolerantes a estresse hídrico. Nesse mesmo sentido, Ali; El-Sadek, (2016) utilizaram índices e parâmetros que contribuíram para a seleção de diversas cultivares de trigo em diferentes cenários de deficiência hídrica no solo. Estes autores observaram correlação positiva de redução da área folhar, maior espessura foliar, clorofila, matéria seca e manutenção do potencial hídrico foliar em plantas que se adaptaram ao estresse hídrico.

A nutrição das plantas é outro objeto de estudo de grande importância para reduzir os efeitos do estresse hídrico nas plantas, haja vista que as plantas bem nutridas através da adubação, respondem melhor às condições adversas causadas pelo estresse hídrico (Abid, Tian, Ata-Ul-Karim, Cui, et al., 2016; Gevrek & Atasoy, 2012; Waraich et al., 2011). Embora, o manejo da adubação na cultura de trigo seja feito pela adubação no solo, Shabbir et al. (2016) demonstraram, que a complementação da nutrição na cultura, através de fertilizantes foliares (N-P-K), contribui de forma considerável à tolerância do estresse hídrico nas plantas. Os autores mostraram que a aplicação do fertilizante foliar reforçou o acúmulo de osmoprotectores e aumento da atividade antioxidante da planta para melhorar o crescimento e produção de grão sob condições de estresse hídrico.

Do mesmo modo, a aplicação de produtos reguladores vegetais ou bioreguladores, sintéticos ou não, são usados para aumentar a produção, dependendo da sua composição e concentração podem promover melhor desenvolvimento da planta aumentando a absorção de água e nutrientes, diminuindo dessa forma os efeitos de baixa fertilidade do solo e baixa disponibilidade hídrica no solo (Fernandes et al., 2018; Ferrini & Nicese, 2002).

A perda de água das plantas ocorre com a transpiração e deve ser repostada em quantidade equivalente à transpirada. A absorção de água pelas raízes depende da área da rizosfera, área de contato entre a superfície das raízes com o solo e da sua distribuição no perfil do solo. Desse modo, plantas mais jovens, ou com sistema radicular pouco desenvolvido, estão propensas à menor absorção de água, haja vista que apresentam menor superfície de contato com o solo (Chavarria & Santos, 2012).

Nesse contexto, diversos estudos mostram o papel de microrganismos promotores do crescimento na tolerância de estresse hídrico em plantas como as rizobactérias dos gêneros *Enterobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Moraxella* (Raheem et al., 2018). Estes microrganismos geralmente provocam um aumento do sistema radicular das plantas e desse modo maior absorção de nutrientes e água tanto em ambientes com estresse hídrico como em condições ótimas de disponibilidade hídrica (B. Ali, 2015; Forni et al., 2017; Vílchez et al., 2016).

Este efeito é provável ser devido à produção de auxinas, hormônios de crescimento vegetal, produzidas pelas rizobactérias principalmente o ácido indol-acético. As auxinas promovem a divisão celular da planta, principalmente nas raízes laterais e adventícias, e dessa forma, permite uma maior exploração do solo (B. Ali, 2015; Verma et al., 2010). A pesquisa está avançando na busca e seleção de rizobactérias que aumentem a tolerância do estresse hídrico nas plantas voltado como biofertilizantes em culturas agrônomicas com frequência de baixas disponibilidade de água no solo (Raheem et al., 2018).

Além disso associações mutualísticas, como a simbiose com os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), deve ser um objeto de estudo mais profundo, visto que a simbiose micorrízica proporciona mecanismos que ajudam a tolerar o estresse causado pelo déficit hídrico (Al-Karaki et al., 2004; Khalvati et al., 2005; Rapparini & Peñuelas, 2013; J. Ruiz-Lozano et al., 2012).

2.4. Fungos Micorrízicos Arbusculares e o estresse hídrico

Os FMA são fungos biotróficos obrigatórios que colonizam raízes de plantas formando simbiose com mais de 80% das espécies de plantas vasculares (Smith & Read, 2008). A planta fornece até 20% de fotossintatos para o fungo (Thirkell et al., 2020), enquanto este, melhora a nutrição da planta promovendo o desenvolvimento e crescimento e aumento da resistência a estresses bióticos e abióticos (Chen et al., 2018; Genre et al., 2020; Smith & Read, 2008).

A importância da simbiose planta-fungo está relacionada à maior exploração do solo, graças à rede de hifas que colonizam as raízes das plantas hospedeiras, atuando como uma extensão radicular, melhorando a capacidade de absorção de água e nutrientes, principalmente o fósforo (Berbara et al., 2006; MacLean et al., 2017).

Dentre os estresses abióticos, como o estresse hídrico, diversos trabalhos mostram que a simbiose micorrízica ativa mecanismos planta-fungo para aumentar a tolerância ao estresse, uma vez que há uma maior condutância hidráulica da raiz, osmótica e hidrostática sob condições de estresse hídrico que será reflexo na fisiologia da planta para diminuir os impactos do estresse (Ruiz-Lozano & Aroca, 2017). Estes efeitos, provavelmente envolvem diversos mecanismos morfológicos, fisiológicos e moleculares que se associam entre si, conforme descrito a seguir:

- a) Absorção de água via hifa extra radicular. A simbiose micorrízica promove maior desenvolvimento das raízes e pelos radiculares e, juntamente com as hifas extra radiculares, a planta é capaz de absorver mais água em regiões de difícil acesso (Ruth et al., 2011; F. Zhang et al., 2018);
- b) A nutrição da planta também afeta a absorção de água. Alguns estudos mostram que a absorção de água via micorriza é feito pela absorção de fósforo (P), enquanto que outros estudos demonstram o efeito contrário, a absorção de água é em decorrência de uma boa nutrição da planta, principalmente P (Wu & Zou, 2017). Entretanto, Wu e Zou (2009) relatam melhor absorção de nutrientes em condições de déficit hídrico. De uma forma ou outra, o aumento da absorção de nutrientes pela simbiose, pode ser um mecanismo indireto na contribuição da simbiose na tolerância à seca (Wu & Zou, 2017);
- c) Aumento do ajuste osmótico. Tem-se relatado que a simbiose micorrízica melhora o ajustamento osmótico por osmorreguladores, como açúcares solúveis e acumulação de prolina livre (Yooyongwech et al., 2016; fei Zhang et al., 2018), carboidratos não estruturais e íons de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Wu et al., 2013);
- d) Aumento da capacidade antioxidante e assim, lidar com o acúmulo de espécies reativas oxidantes (Wu et al., 2013). Plantas micorrizadas submetidas a estresse hídrico podem aumentar as atividades enzimáticas antioxidantes, superóxido dismutase, guaiacol peroxidase, peroxidase e catalase, para diminuir o estresse (Wu & Zou, 2009);
- e) Pelo aumento da expressão de genes que codificam proteínas provavelmente envolvidas à tolerância ao estresse submetido (Folli-Pereira et al., 2012; Moreira & Siqueira, 2006) como a regulação de aquaporinas (Bárzana et al., 2014; J. M. Ruiz-Lozano & Aroca, 2017). As aquaporinas são proteínas semelhantes a canais de água que regulam o movimento das moléculas de água através de um gradiente de potencial de água pelas membranas intercelulares (Gaspar, 2014; Juan Manuel Ruiz-Lozano et al., 2008).

Entretanto, uma possível explicação para os benefícios da simbiose micorrízica é que o micélio fúngico transporta água à raiz da planta hospedeira, portanto, a planta aumenta a sua permeabilidade à água e as aquaporinas são expressadas para regular esse fluxo de água intercelular (Javot & Maurel, 2002);

Al-Karaki et al.(2004) observaram que plantas de trigo responderam melhor à tolerância ao estresse hídrico quando inoculadas com FMA. Segundo os autores, este efeito foi independente da nutrição da planta como resultado simbiose, uma vez que, tanto plantas submetidas a estresse como plantas não estressadas, apresentaram o mesmo estado nutricional testado (P e Fe), embora, plantas micorrizadas apresentaram melhor nutrição do que plantas não micorrizadas.

Beltrano Ronco (2008), observaram que na simbiose micorrízica pelo fungo *Glomus claroideum* (hoje descrito como *Claroideoglomus claroideum*) em situações de déficit hídrico, há uma maior absorção de água pela cultura de trigo, desta forma há uma diminuição do teor de água e dos pigmentos fotossintéticos resultando num maior peso seco total. Estes autores também observaram que a simbiose micorrízica, no restabelecimento da irrigação, aumentam as concentrações de clorofila e recuperam a permeabilidade da membrana celular em comparação com plantas não micorrizadas. Dessa forma, os autores afirmam que a simbiose diminui os efeitos negativos causados pelo estresse hídrico, aumentando a condutividade hidráulica das raízes resultando em uma maior eficiência de uso de água pelas plantas, que será refletido na produção.

De forma contrária, a diversidade genética de espécies vegetais e diferentes disponibilidades hídricas no solo podem afetar a estrutura da comunidade de FMA. Liu et al. (2015) observaram em genótipos de trigo em diferentes lâminas de irrigação, que houve uma mudança na diversidade e abundância desses fungos.

De forma indireta, a simbiose micorrízica pode aumentar a tolerância das plantas a estresse hídrico pela melhoria da estabilidade da estrutura do solo, aumentando a retenção de água no solo (Rapparini & Peñuelas, 2013) por meio da formação e estabilização de macro e micro agregados, importante para maior aeração, infiltração e retenção de água e nutrientes no solo. As hifas extra-radiculares destes fungos, juntamente com raízes finas da planta, formam uma rede biológica que entrelaça e mantém unidas as partículas do solo. Do mesmo modo, hifas extra radicales produzem glomalina, uma substância glicoproteica, hidrofóbica, termoestável e recalcitrante que atua como um agente cimentante nas partículas pequenas do solo (Moreira & Siqueira, 2006; Purin & Klauberger Filho, 2010; S. F. Wright & Upadhyaya, 1996).

Diversos estudos mostram uma forte relação entre a formação e a estabilização dos agregados com a glomalina (Bedini et al., 2009; Rashid et al., 2016), embora em alguns casos se relacione mais com a matéria orgânica do solo (Melloni et al., 2016).

A produção de glomalina, como a estrutura da comunidade de FMA, depende de vários fatores, entre eles, a composição e diversidade de espécies de plantas (Rillig et al., 2002) assim também como pelo manejo do solo (Dai et al., 2015; C. F. da Silva et al., 2014) e disponibilidade hídrica no solo (R. J. Liu et al., 2015; Rishcefid et al., 2017).

Entretanto, para fins de estudo, a extração e quantificação da glomalina não pode ser considerada como componente único. Diversos estudos mostram que a extração da glomalina está associada a compostos orgânicos que, pelos métodos de extração utilizados, são também quantificados, dessa forma, Rillig (2004) denominou este composto como proteínas do solo relacionadas à glomalina (PSRG).

A PSRG facilmente extraível, pode contribuir de forma significativa na tolerância à seca pelas plantas (Chi et al., 2018). Estes autores observaram que esta fração se comporta como um ácido húmico, como um regulador de crescimento em citrus. Plantas submetidas a estresse hídrico mostraram maior crescimento na parte aérea, e melhor desenvolvimento do sistema radicular. Nos fatores fisiológicos da planta, a PSRG aumentou o potencial hídrico nas folhas, taxa fotossintética líquida, taxa de transpiração, condutância estomática e concentração de CO₂ intercelular e, diminuiu a temperatura da folha.

Desse modo o uso de práticas agrícolas que favorecem ou estimulam o crescimento e abundância de espécies microbianas do solo, podem reduzir impactos ambientais e aumentar o rendimento de culturas (Bender & van der Heijden, 2015) como os FMA, que podem diminuir os problemas de produzir alimentos de uma forma mais sustentável (Rodriguez & Sanders, 2015), diminuindo a aplicação de fertilizantes fosfatados e micronutrientes nas culturas (Bennett et al., 2013), bem como diminuir os efeitos de estresses causados por déficit hídrico e aumentar a produção (J. M. Ruiz-Lozano & Aroca, 2017).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelkader, A., & Elshorbagy, A. (2021). ACPAR: A framework for linking national water and food security management with global conditions. *Advances in Water Resources*, 147, 103809. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2020.103809>
- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Cui, Y., Liu, Y., Zahoor, R., Jiang, D., & Dai, T. (2016). Nitrogen Nutrition Improves the Potential of Wheat (*Triticum aestivum* L.) to Alleviate the Effects of Drought Stress during Vegetative Growth Periods. *Frontiers in Plant Science*, 7, 981. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00981>
- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Wang, F., Liu, Y., Zahoor, R., Jiang, D., & Dai, T. (2016). Adaptation to and recovery from drought stress at vegetative stages in wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. *Functional Plant Biology*, 43(12), 1159. <https://doi.org/10.1071/FP16150>
- Abramovay, R. (2010). Alimentos versus população: está ressurgindo o fantasma malthusiano? *Ciência e Cultura*, 62(4), 38–43. http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S0009-67252010000400013&script=sci_arttext&tlng=pt
- Adam, J. C., Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2009). Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrological Processes*, 23(7), 962–972. <https://doi.org/10.1002/hyp.7201>
- Al-Karaki, G., McMichael, B., & Zak, J. (2004). Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14(4), 263–269. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0265-2>
- Ali, B. (2015). Bacterial auxin signaling: comparative study of growth induction in *Arabidopsis thaliana* and *Triticum aestivum*. *Turkish Journal of Botany*, 39, 1–9. <https://doi.org/10.3906/bot-1401-31>
- Ali, M. B., & El-Sadek, A. N. (2016). Evaluation of drought tolerance indices for wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigated and rainfed conditions. *Communications in Biometry and Crop Science*, 11(1), 77–89. http://agrobiol.sggw.waw.pl/~cbcs/articles/CBCS_11_1_6.pdf
- Allahverdiyev, T. I., Talai, J. M., Huseynova, I. M., & Aliyev, J. A. (2015). Effect of drought stress on some physiological parameters, yield, yield components of durum (*Triticum durum* desf.) and bread (*Triticum aestivum* L.) wheat genotypes. *Journal of Crop Breeding and Genetics*, 1(1), 50–62. www.ekinjournal.com
- Alori, E. T., Fawole, O. B., & Akanji, M. O. (2020). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi spores in soils of some legumes and their response to varying concentrations of phosphorus application. *Open Agriculture*, 5(1), 539–547. <https://doi.org/10.1515/OPAG-2020-0052>
- Amaral, J. A. T. do, Rena, A. B., & Amaral, J. F. T. do. (2006). Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação,

resistência estomática e fotossíntese. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(3), 377–384. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300002>

ANA. (2017). *Estudo da ANA aponta em 45% potencial de expansão da irrigação no Brasil até 2030*. Agência Nacional de Águas. <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/estudo-da-ana-aponta-em-45-potencial-de-expansao-da-irrigacao-no-brasil-ate-2030>

Araújo, S. A. do C., Vasquez, H. M., Campostrini, E., Netto, A. T., Deminicis, B. B., & Lima, É. D. S. (2010). Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.), em estresse hídrico. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 32(1), 1–7. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i1.8961>

Assad, E. D., Sano, E. E., Masutomo, R., Castro, L. H. R., & Silva, F. A. M. da. (1993). Veranicos na região dos Cerrados Brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 28(9), 993–1003. <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/3962/1253>

Bahadur, A., Batool, A., Nasir, F., Jiang, S., Mingsen, Q., Zhang, Q., Pan, J., Liu, Y., & Feng, H. (2019). Mechanistic Insights into Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Drought Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(17), 4199. <https://doi.org/10.3390/IJMS20174199>

Barea, J. M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 261–282. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162015005000021>

Bárzana, G., Aroca, R., Bienert, G. P., Chaumont, F., Ruiz-lozano, J. M., Microbiología, D. De, & Experimental, E. (2014). *New Insights into the Regulation of Aquaporins by the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Maize Plants Under Drought Stress and Possible Implications for Plant Performance*. 27(4), 349–363.

Bassett, C. L. (2013). Water Use and Drought Response in Cultivated and Wild Apples. In K. VAHDATI & C. LESLIE (Eds.), *Abiotic Stress - Plant Responses and Applications in Agriculture* (pp. 249–275). InTech. <https://doi.org/10.5772/55537>

Batista De Jesus, J., Kuplich, T. M., De Carvalho Barreto, Í., Niederauer Da Rosa, C., & Hillebrand, L. F. (2021). Temporal and phenological profiles of open and dense Caatinga using remote sensing: response to precipitation and its irregularities. *Journal of Forestry Research*, 32, 1067–1076. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01145-3>

Bedini, S., Pellegrino, E., Avio, L., Pellegrini, S., Bazzoffi, P., Argese, E., & Giovannetti, M. (2009). Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology & Biochemistry*, xxx, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.04.005>

Beltrano, J., & Ronco, M. G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus

Glomus claroideum: effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20(1), 29–37. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000100004>

Bender, S. F., & van der Heijden, M. G. A. (2015). Soil biota enhance agricultural sustainability by improving crop yield, nutrient uptake and reducing nitrogen leaching losses. *Journal of Applied Ecology*, 52(1), 228–239. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12351>

Bennett, A. E., Daniell, T. J., & White, P. J. (2013). Benefits of Breeding Crops for Yield Response to Soil Organisms. In *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere* (pp. 17–27). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch3>

Berbara, R. L., Souza, F., & Fonseca, H. M. A. C. (2006). Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In M. S. Fernandes (Ed.), *Nutrição mineral de plantas* (p. 432 p.). SBCS.

Bernardo, L., Carletti, P., Badeck, F. W., Rizza, F., Morcia, C., Ghizzoni, R., Roupael, Y., Colla, G., Terzi, V., & Lucini, L. (2019). Metabolomic responses triggered by arbuscular mycorrhiza enhance tolerance to water stress in wheat cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 137, 203–212. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.02.007>

Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A., Pun, A. B., Bhat, M. A., Mandal, D. L., Shah, S., Zhihao, D., Tan, Q., & Hu, C.-X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis 2021 84:1*, 84(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/S13199-021-00756-6>

Bombardi, R. J., & Véspoli De Carvalho, L. M. (2008). Variabilidade do regime de monções sobre o brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(1), 58–72. <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v23n1/07.pdf>

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

Brasil. (1997). *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Lei No 9.433. http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/Leis/L9433.htm

Calvo-Polanco, M., Sánchez-Castro, I., Cantos, M., García, J. L., Azcón, R., Ruiz-Lozano, J. M., Beuzón, C. R., & Aroca, R. (2016). Effects of different arbuscular mycorrhizal fungal backgrounds and soils on olive plants growth and water relation properties under well-watered and drought conditions. *Plant, Cell & Environment*, 39(11), 2498–2514. <https://doi.org/10.1111/PCE.12807>

Campos, A. A. B., Scotton, J. C., Costa, W. L. F., Giassi, V., Pinto, D. F. P., & Homma, S. K. (2015). Seleção de fungicidas visando à preservação de fungos micorrízicos arbusculares nativos no cultivo do feijoeiro. *Revista Brasileira de*

Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(9), 898–902. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n9p898-902>

Cargnin, A., Alves De Souza, M., Crescêncio, P., Carneiro, S., & Sofiatti, V. (2006). Interação entre genótipos e ambientes e implicações em ganhos com seleção em trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(6), 987–993. <http://www.scielo.br/pdf/pab/v41n6/30865.pdf>

Castro Neto, M. T. de. (2003). Efeito do déficit hídrico na transpiração e resistência estomática da mangueira. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(1), 93–95. <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v25n1/a27v25n1>

Cazetta, D. A., Fornasieri Filho, D., & Arf, O. (2007). Resposta de cultivares de trigo e triticale ao nitrogênio no sistema de plantio direto. *Científica*, 35(2), 155–165. <http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/194/115>

Chavarria, G., & Santos, H. P. dos. (2012). Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. In G. Montanaro & B. Dichio (Eds.), *Advances in Selected Plant Physiology Aspects* (pp. 105–132). InTech. <https://doi.org/10.5772/33478>

Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E., & Reinhardt, D. (2018). Beneficial Services of Arbuscular Mycorrhizal Fungi – From Ecology to Application. *Frontiers in Plant Science*, 0, 1270. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.01270>

Chi, G.-G., Kumar Srivastava, A., & Wu, Q.-S. (2018). Exogenous easily extractable glomalin-related soil protein improves drought tolerance of trifoliolate orange. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(10), 1341–1350. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1432854>

Christofidis, D. (2013). Água, irrigação e agropecuária sustentável. *Revista de Política Agrícola*, 22(1), 115–127. <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/286/247>

CONAB. (2021). *Conab - Safra Brasileira de Grãos*. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos>

Condé, A. B. T., Coelho, M. A. de O., Yamanaka, C. H., & Corte, H. R. (2009). Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo sob cultivo de sequeiro em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 40(1), 45–52. <https://doi.org/10.5216/pat.v40i1.5618>

Costa, E. A., Goedert, W. J., & De Sousa, D. M. G. (2006). Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(7), 1185–1191. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000700016>

Dai, J., Hu, J., Zhu, A., Bai, J., Wang, J., & Lin, X. (2015). No tillage enhances arbuscular mycorrhizal fungal population, glomalin-related soil protein content, and organic carbon accumulation in soil macroaggregates. *Journal of Soils and Sediments*, 15(5), 1055–1062. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1091-9>

Dar, Z. M., Masood, A., Asif, M., & Malik, M. A. (2018). Review on arbuscular mycorrhizal fungi: An approach to overcome drought adversities in plants. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 1040–1049. https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Review+on+arbuscular+mycorrhizal+fungi%3A+An+approach+to+overcome+drought+adversities+in+plants&btnG=

DePaula, G. (2020). The distributional effect of climate change on agriculture: Evidence from a Ricardian quantile analysis of Brazilian census data. *Journal of Environmental Economics and Management*, 104, 102378. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2020.102378>

Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Flörke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B. M., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S. N., Haddeland, I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., ... Wissler, D. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>

Ely, D. F., Almeida, I. R. de, & Neto, J. L. S. (2003). Variabilidade climática e o rendimento da cultura do milho no estado do Paraná: *Geografia*, 12(1), 495–508. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2003V12N1P495>

Embrapa. (1997). *Manual de Métodos de Análise de Solo* (M. E. C. Claessen, Ne, W. de O. Barreto, J. L. de Paula, & M. N. Duarte (eds.); 2nd ed.).

Embrapa. (2011). *Programa de Monitoramento de Irrigação no Cerrado*. <http://hidro.cpac.embrapa.br/>

Embrapa. (2017, May 26). Artigo - A importância do trigo para a sustentabilidade da agricultura brasileira. *Gestão Estratégica - Embrapa Trigo*. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/23416523/artigo---a-importancia-do-trigo-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-brasileira>

Embrapa. (2018, May 30). O trigo no sistema de produção no Cerrado. *Transferência de Tecnologia*, 1. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/34711706/o-trigo-no-sistema-de-producao-no-cerrado>

Fang, Yan, Du, Y., Wang, J., Wu, A., Qiao, S., Xu, B., Zhang, S., Siddique, K. H. M., & Chen, Y. (2017). Moderate Drought Stress Affected Root Growth and Grain Yield in Old, Modern and Newly Released Cultivars of Winter Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 0, 672. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00672>

Fang, Yujie, & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673–689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>

FAO. (2011). *Climate change, water and food security*. <http://www.fao.org/docrep/014/i2096e/i2096e.pdf>

Faran, M., Farooq, M., Rehman, A., Nawaz, A., Saleem, M. K., Ali, N., & Siddique, K. H. M. (2019). High intrinsic seed Zn concentration improves abiotic stress

tolerance in wheat. *Plant and Soil* 2019 437:1, 437(1), 195–213. <https://doi.org/10.1007/S11104-019-03977-3>

Fernandes, R. G., Mateus dos Santos, I., Caramelo, A. D., & Moreira, W. M. Q. (2018). Use of vegetable bioregulator in the treatment of seeds and via foliar in the initial development of granífero sorgo. *Science and Technology Innovation in Agronomy*, 2(1), 97–105. http://repositorio.unifafibe.com.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/44/2018_RGF.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ferrão, R. G., Volpi, P. S., Ferrão, M. A. G., Verdin Filho, A. C., Fonseca, A. F. A. da, Ferrão, L. M. V., & Ferrão, L. F. V. (2018). Melhoramento genético para obtenção da cultivar Marilândia ES 8143, variedade clonal de café conilon tolerante a seca. *Multi-Science Research (MSR)*, 1(1), 1–18. <http://msrreview.org/index.php/msr/article/view/1/1>

Ferreira, D. A., Carneiro, M. A. C., & Saggin-Junior, O. J. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi in an oxisol under managements and uses in cerrado. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 36(1), 51–61. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100006>

Ferreira, D. F. (2010). Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042.

Ferrini, F., & Nicese, F. (2002). Response of english oak (*Quercus robur* L.) trees to biostimulants application in the urban environment. *Journal of Arboriculture*, 28(2), 70–75.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O’Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>

Folli-Pereira, M. S., Meira-haddad, L. S. A., Bazzolli, D. M. S., & Kasuya, M. C. M. (2012). Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 36(1), 1663–1679.

Forni, C., Duca, D., & Glick, B. R. (2017). Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant and Soil*, 410(1–2), 335–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3007-x>

Franco, F. de A., & Evangelista, A. (2018). *Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2018 / XI Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale* (F. de A. Franco & A. Evangelista (eds.)). Embrapa. www.embrapa.br/fale-conosco

Galindo, F. S., Ludkiewicz, M. G. Z., Bellote, J. L. M., Santini, J. M. K., Teixeira Filho, M. C. M., & Buzetti, S. (2015). Épocas de inoculação com *Azospirillum* brasileiro via foliar afetando a produtividade da cultura do trigo irrigado. *Tecnologia e Ciência Agropecuária*, 9(2), 43–48. https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Teixeira_Filho/publication/2837187

93_Epocas_de_inoculacao_com_Azospirillum_brasilense_via_foliar_afetando_a_produtividade_da_cultura_do_trigo_irrigado_Leaf_application_times_of_Azospirillum_brasilense_in_yield_

Ganugi, P., Masoni, A., Pietramellara, G., & Benedettelli, S. (2019). A Review of Studies from the Last Twenty Years on Plant–Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associations and Their Uses for Wheat Crops. *Agronomy*, 9(12), 840. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9120840>

Garland, G., Edlinger, A., Banerjee, S., Degruene, F., García-Palacios, P., Pescador, D. S., Herzog, C., Romdhane, S., Saghai, A., Spor, A., Wagg, C., Hallin, S., Maestre, F. T., Philippot, L., Rillig, M. C., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food*, 2(1), 28–37. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00210-8>

Gaspar, M. (2014). Aquaporins: From water channels to multifunctional transporters in plants. *Brazilian Journal of Botany*, 34(4), 481–491. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042011000400002>

Gava, R., Lima, S. F. de, Dos Santos, O. F., Anselmo, J. L., Cotrim, M. F., & Kühn, I. E. (2018). Water depths for different soybean cultivars in center pivot. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(1), 10–15. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p10-15>

Genre, A., Lanfranco, L., Perotto, S., & Bonfante, P. (2020). Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nature Reviews Microbiology* 2020 18:11, 18(11), 649–660. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>

Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

Gevrek, M. N., & Atasoy, G. D. (2012). Effect of post anthesis drought on certain agronomical characteristics of wheat under two different nitrogen application conditions. *Turkish Journal of Field Crops*, 17(1), 19–23. <http://www.field-crops.org/assets/pdf/product512cbca60097e.pdf>

Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2019). EFFECT OF MYCORRHIZAL FUNGI ON SESAME PRODUCTIVITY UNDER WATER STRESS IN LOW-INPUT AGRICULTURE SYSTEM. *Turkish Journal of Field Crops*, 24(1), 46–53. <https://doi.org/10.17557/tjfc.564087>

Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., Siavash Moghaddam, S., & Popović-Djordjević, J. (2020). Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiochemical traits and enzymatic antioxidant activity. *Agricultural Water Management*, 238, 106234. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106234>

Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M. N., van Tuinen, D., Redecker, D., & Wipf, D. (2010). Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services.

Mycorrhiza, 20(8), 519–530. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3>

Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques to measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infections in roots. *New Phytologist*, 84(3), 489–500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>

Giroto, L., Alves, J. D., Deuner, S., Albuquerque, A. C. S., & Tomazoni, A. P. (2012). Tolerância à seca de genótipos de trigo utilizando agentes indutores de estresse no processo de seleção. *Revista Ceres*, 59(2), 192–199. <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/3805/1620>

Gomide, P. H. O., Santos, J. G. D. dos, Siqueira, J. O., & Soares, C. R. F. S. (2009). Diversidade e Função de fungos micorrízicos arbusculares em sucessão de espécies hospedeiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(11), 1483–1490. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100016>

Hamner, K., Weih, M., Eriksson, J., & Kirchmann, H. (2017). Influence of nitrogen supply on macro- and micronutrient accumulation during growth of winter wheat. *Field Crops Research*, 213, 118–129. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.08.002>

Hanks, R. J., Keller, J., Rasmussen, V. P., & Wilson, G. D. (1976). Line Source Sprinkler for Continuous Variable Irrigation-crop Production Studies. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 426–429. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1976.03615995004000030033X>

Hassan, M. U., Amer, M., Chattha, M. U., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A., Liu, Y., & Guoqin, H. (2020). The Critical Role of Zinc in Plants Facing the Drought Stress. *Agriculture*, 10(9), 396. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10090396>

He, J., Jin, Y., Turner, N. C., Chen, Z., Liu, H. Y., Wang, X. L., Siddique, K. H. M., & Li, F. M. (2019). Phosphorus application increases root growth, improves daily water use during the reproductive stage, and increases grain yield in soybean subjected to water shortage. *Environmental and Experimental Botany*, 166, 103816. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2019.103816>

Hernandez, F. B. T., Sousa, S. A. V. de, Zocoler, J. L., & Frizzone, J. A. (2003). Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'oeste, estado de São Paulo. *Engenharia Agrícola*, 23(1), 21–30. http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/REA_veranico.PDF

Hoffmann, R. B., Moreira, É. E. A., Hoffmann, G. S. da S., & Araújo, N. S. F. de. (2018). Effect of soil management on microbial biomass carbon. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 1(1), 168–178. <http://brazilianjournals.com/index.php/BJAER/article/view/738/631>

Husband, R., Herre, E. A., Turner, S. L., Gallery, R., & Young, J. P. W. (2002). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and patterns of host association over time and space in a tropical forest. *Molecular Ecology*, 11(12), 2669–2678. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12453249>

Ingraffia, R., Amato, G., Sosa-Hernández, M. A., Frenda, A. S., Rillig, M. C., &

Giambalvo, D. (2020). Nitrogen Type and Availability Drive Mycorrhizal Effects on Wheat Performance, Nitrogen Uptake and Recovery, and Production Sustainability. *Frontiers in Plant Science*, 0, 760. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00760>

INMET - Ministério da Agricultura, P. e A. (2019). *Clima - Gráficos Climatológicos (1931-1960 e 1961-1990)*. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosclimaticos>

Invam. (2021). *International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. <http://invam.wvu.edu/>

Janusz Blaszkowski. (2019). *Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota), Endogone and Complexipes species deposited in the Department of Plant Pathology, University of Agriculture in Szczecin, Poland*. [http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species descriptions of AMF.html](http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species%20descriptions%20of%20AMF.html)

Javot, H., & Maurel, C. (2002). The role of aquaporins in root water uptake. *Annals of Botany*, 90(3), 301–313. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf199>

Khakpour, O., & Khar, J. (2012). Spore density and root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in some species in the northwest of Iran. *Article in International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*. <https://www.researchgate.net/publication/291771864>

Khalvati, M. A., Hu, Y., Mozafar, A., & Schmidhalter, U. (2005). Quantification of Water Uptake by Arbuscular Mycorrhizal Hyphae and its Significance for Leaf Growth, Water Relations, and Gas Exchange of Barley Subjected to Drought Stress. *Plant Biology*, 7(6), 706–712. <https://doi.org/10.1055/s-2005-872893>

Kiriachek, S. G., Azevedo, L. C. B. de, Peres, L. E. P., & Lambais, M. R. (2009). Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 33(1), 1–16. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100001>

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science (New York, N.Y.)*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Larcher, W. (2000). *Ecofisiologia Vegetal*. RiMa Artes e Textos.

Lehnert, H., Serfling, A., Enders, M., Friedt, W., & Ordon, F. (2017). Genetics of mycorrhizal symbiosis in winter wheat (*Triticum aestivum*). *New Phytologist*, 215(2), 779–791. <https://doi.org/10.1111/nph.14595>

Liu, C., Ravnskov, S., Liu, F., Rubæk, G. H., & Andersen, M. N. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate abiotic stresses in potato plants caused by low phosphorus and deficit irrigation/partial root-zone drying. *The Journal of Agricultural Science*, 156(1), 46–58. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000023>

Liu, R. J., Sheng, P. P., Hui, H. Bin, Lin, Q., & Chen, Y. L. (2015). Integrating irrigation management for improved grain yield of winter wheat and rhizosphere AM fungal diversity in a semi-arid cropping system. *Agricultural Systems*, 132, 167–

173. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.10.002>

Lizana, C., Wentworth, M., Martinez, J. P., Villegas, D., Meneses, R., Murchie, E. H., Pastenes, C., Lercari, B., Vernieri, P., Horton, P., & Pinto, M. (2006). Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress: I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, *57*(3), 685–697. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj062>

Lopes, A. S., Guimarães, L. R. G., & Ramos, S. J. (2012). The Saga of the Agricultural Development of the Brazilian Cerrado - e-ifc 32: Research Findings. *International Potash Institute*, *32*, 29–37. <https://www.ipipotash.org/hi/eifc/2012/32/5/english>

Loss, A., Pereira, M. G., Giácomo, S. G., Perin, A., & Anjos, L. H. C. Dos. (2011). Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *46*(10), 1269–1276. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022>

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y., & Guo, T. (2017). Physiological Responses and Yield of Wheat Plants in Zinc-Mediated Alleviation of Drought Stress. *Frontiers in Plant Science*, *0*, 860. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00860>

MacLean, A. M., Bravo, A., & Harrison, M. J. (2017). Plant signaling and metabolic pathways enabling arbuscular mycorrhizal symbiosis. *The Plant Cell Online*. <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00555>

Manavalan, L. P., Guttikonda, S. K., Phan Tran, L.-S., & Nguyen, H. T. (2009). Physiological and Molecular Approaches to Improve Drought Resistance in Soybean. *Plant and Cell Physiology*, *50*(7), 1260–1276. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082>

Marengo, J. A. (2014). O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, *133*, 25–32. <http://www.journals.usp.br/revusp/article/view/99280/97696>

Melloni, R., Faria, M. T., Carneiro, L. O., Ferreira, G. M. R., Melloni, E. G. P., & Alvarenga, M. I. N. (2016). Propágulos e formação de micorriza em taludes de rodovia, no sul de Minas Gerais, Brasil. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, *11*(1), 26–32. <https://doi.org/10.5039/agraria.v11i1a5356>

Menezes, H. E. A., Brito, J. I. B. de, Lima, R. A. F., & Lima, A. (2010). Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *14*(2), 181–186. <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n2/v14n02a09.pdf>

Mihailescu, E., & Soares, M. B. (2020). The Influence of Climate on Agricultural Decisions for Three European Crops: A Systematic Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *0*, 64. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.00064>

Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e Biotecnologia do Solo*. 729.

Mori, C. de, & Ignaczak, J. C. (2011). Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo. In G. R. da PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA (Ed.), *Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável* (pp. 41–76).

Muhammad, I., Wang, J., Sainju, U. M., Zhang, S., Zhao, F., & Khan, A. (2021). Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma*, 381, 114696. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114696>

Nahar, K., Bovill, B., & McDonald, G. (2020). Mycorrhizal colonization in bread wheat varieties differing in their response to phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, 44(1), 29–45. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793190>

Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M., & Lee, D. (2009). Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. In D.C (Ed.), *Food Policy Report 2*. International Food Policy Research Institute (IFPRI). <https://doi.org/10.2499/0896295370>

Novák, V. (2012). *Evapotranspiration in the soil-plant-atmosphere system progress in soil science*. Springer Science and Business Media.

Nunes, H. B., Goto, B. T., Coimbra, J. L., Oliveira, J. S., Tavares, D. G., Rocha, M. S., Silva, F. L., & Soares, A. C. F. (2019). Is arbuscular mycorrhizal fungal species community affected by cotton growth management systems in the Brazilian cerrado? *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 91(4), 20180695. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180695>

Oleńska, E., Małek, W., Wójcik, M., Swiecicka, I., Thijs, S., & Vangronsveld, J. (2020). Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: A methodical review. *Science of The Total Environment*, 743, 140682. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140682>

ONU, O. das N.-D. de A. E. e S. (2021). *World Population Prospects 2019. Probabilistic Projections*. <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>

Ortas, I., & Bykova, A. (2018). The Effect of Mycorrhiza Inoculation and Phosphorus Application on Phosphorus Efficiency of Wheat Plants. *Https://Doi.Org/10.1080/00103624.2018.1455849*, 49(10), 1199–1207. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1455849>

Pasinato, A., Cunha, G. R. da, Fontana, D. C., Monteiro, J. E. B. de A., Nakai, A. M., & Oliveira, A. F. de. (2018). Potential area and limitations for the expansion of rainfed wheat in the Cerrado biome of Central Brazil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 53(7), 779–790. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000700001>

Pavithra, D., & Yapa, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances drought stress tolerance of plants. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 490–494. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2018.03.005>

Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)

Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for cleaning roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society London*, 55, 458–161.

PIRES, J. L. F., VARGAS, L., & CUNHA, G. R. da. (2011). *Trigo no Brasi: bases para produção competitiva e sustentável*. Embrapa Trigo.

Pontes, J. S. de, Oehl, F., Pereira, C. D., de Toledo Machado, C. T., Coyne, D., da Silva, D. K. A., & Maia, L. C. (2017). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the Brazilian's Cerrado and in soybean under conservation and conventional tillage. *Applied Soil Ecology*, 117, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.023>

Postel, S. L., Daily, G. C., & Ehrlich, P. R. (1996). Human Appropriation of Renewable Fresh Water. *Science*, 271(5250), 785–788. <https://doi.org/10.1126/science.266.5186.753>

Purin, S., & Klauberg Filho, O. (2010). Glomalina: nova abordagem para entendermos a biologia dos fungos micorrízicos arbusculares. In J. O. Siqueira, F. A. de Souza, j. b. n. Elke, & siu mui Tsai (Eds.), *Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil* (pp. 503–524).

Quiroga, G., Erice, G., Aroca, R., Chaumont, F., & Ruiz-lozano, J. M. (2017). *Enhanced Drought Stress Tolerance by the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in a Drought-Sensitive Maize Cultivar Is Related to a Broader and Differential Regulation of Host Plant Aquaporins than in a Drought-Tolerant Cultivar*. 8(June), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01056>

Raheem, A., Shaposhnikov, A., Belimov, A. A., Dodd, I. C., & Ali, B. (2018). Auxin production by rhizobacteria was associated with improved yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(4), 574–587. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1362105>

Rani, B., Madan, S., Sharma, K. D., Pooja, Berwa, M. K., & Kumar, A. (2017). Effect of Mycorrhizal Colonization on Nitrogen and Phosphorous Metabolism in Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Water Deficit Stress Cropping/Farming approaches for improving soil health and system productivity in coconut,arecanut and cocoa View project M. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 916–929. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.110>

Rapparini, F., & Peñuelas, J. (2013). Mycorrhizal Fungi to Alleviate Drought Stress on Plant Growth. In *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses, Volume 1* (pp. 21–42). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_2

Rapparini, F., & Peñuelas, J. (2014). Mycorrhizal Fungi to Alleviate Drought Stress on Plant Growth. *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses, 1*, 21–42. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_2

- Rashid, M. I., Mujawar, L. H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I. M. I., & Oves, M. (2016). Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, *183*, 26–41. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2015.11.007>
- Rasul, G., & Sharma, B. (2015). The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, *16*(6), 1752–17457. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>
- Ribeiro, G., Pimente, A. J. B., Souza, M. A. de, Carvalho, J. R. do A. S. de, & Fonseca, W. B. da. (2012). Estresse por altas temperaturas em trigo: impacto no desenvolvimento e mecanismos de tolerância. *Current Agricultural Science and Technology*, *18*(2), 133–142. <https://doi.org/10.18539/cast.v18i2.2502>
- Ribeiro Júnior, W. Q., Ramos, M. L. G., Vasconcelos, U., Trindade, M. D. g., Ferreira, F. M., Siqueira, M. M. H., Silva, H. L. M. Da, Rodrigues, G. C., Guerra, A. F., Rocha, O. C., Amábile, R. F., Albuquerque, A. C., Só e Silva, M., Albrecht, J. C., & Durães, F. O. M. (2007). Fenotipagem para tolerância à seca visando o melhoramento genético do trigo no cerrado. *Circular Técnica Online (INFOTECA-E)*, *21*, 24. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/852172>
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, *84*(4), 355–363. <https://doi.org/10.4141/S04-003>
- Rillig, M. C., Wright, S. F., & Eviner, V. T. (2002). The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, *238*(2), 325–333. <https://doi.org/10.1023/A:1014483303813>
- Rishcefid, M., Aliasgharzag, N., & Neyshabouri, M. (2017). Effects of Water Deficit Stress on Glomalin Secretion by Glomerales in Symbiosis with Corn Plant. *Journal of Water and Soil Science*, *21*(1), 229–238. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.1.229>
- Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2015). The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. *The ISME Journal*, *9*(5), 1053–1061. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.207>
- Rossi, R. M., & Neves, M. F. (2004). *Estratégias para o Trigo no Brasil*. <http://www.favaneves.org/wp-content/uploads/2018/03/Livro-Estrategias-para-o-Trigo-no-Brasil-Fava-Neves-Rossi-Editora-Atlas-2004-1.pdf>
- Ruiz-Lozano, J. M., & Aroca, R. (2017). Plant Aquaporins and Mycorrhizae: Their Regulation and Involvement in Plant Physiology and Performance. In F. Chaumont & S. Tyerman (Eds.), *Plant Aquaporins* (pp. 333–353). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49395-4_15
- Ruiz-Lozano, J., Porcel, R., Bárzana, G., Azcón, R., & Aroca, R. (2012). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis to Plant Drought Tolerance: State of the Art. In *Plant Responses to Drought Stress* (pp. 335–362). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_13
- Ruiz-Lozano, Juan Manuel, Porcel, R., & Aroca, R. (2008). Evaluation of the

Possible Participation of Drought-induced Genes in the Enhanced Tolerance of Arbuscular Mycorrhizal Plants to Water Deficit. *Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, Eco-Function, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics (Third Edition)*, October 2016, 1–797. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78826-3>

Ruth, B., Khalvati, M., & Schmidhalter, U. (2011). Quantification of mycorrhizal water uptake via high-resolution on-line water content sensors. *Plant and Soil*, 342(1–2), 459–468. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0709-3>

Saath, K. C. de O., & Fachinello, A. L. (2018). Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 56(2), 195–212. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>

Salehi, A., Tasdighi, H., & Gholamhoseini, M. (2016). Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(10), 886–891. <https://doi.org/10.1016/J.APJTB.2016.08.009>

Santos, D. dos, Guimarães, V. F., Klein, J., Fioreze, S. L., & Macedo Junior, E. K. (2012). Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(8), 836–842. <http://www.agriambi.com.br>

Santos, R. F., & Carlesso, R. (1998). Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2(3), 287–294. <http://www.agriambi.com.br/revista/v2n3/287.pdf>

Scalon, S. de P. Q., Mussury, R. M., Euzébio, V. L. de M., Kodama, F. M., & Kissmann, C. (2011). ESTRESSE HÍDRICO NO METABOLISMO E CRESCIMENTO INICIAL DE MUDAS DE MUTAMBO (*Guazuma ulmifolia* Lam.). *Ciência Florestal*, 21(4), 655–662. <https://doi.org/10.5902/198050984510>

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2010.02.004>

Shabbir, R. N., Waraich, E. A., Ali, H., Nawaz, F., Ashraf, M. Y., Ahmad, R., Awan, M. I., Ahmad, S., Irfan, M., Hussain, S., & Ahmad, Z. (2016). Supplemental exogenous NPK application alters biochemical processes to improve yield and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2651–2662. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5452-0>

Silva, A. D. O., Jaenisch, B. R., Ciampitti, I. A., & Lollato, R. P. (2021). Wheat nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake dynamics under different management practices. *Agronomy Journal*, 113(3), 2752–2769. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20637>

Silva, C. F. da, Araújo, J. L. S. de, Silva, E. M. R. da, Pereira, M. G., Schiavo, J. A., Freitas, M. S. M. de, Saggin-Junior, O. J., & Martins, M. A. (2014). Comunidade de

fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38(2), 423–431. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200007>

Silva, E. R., Oliveira, J. N., Rubio, C. P., Lyra, G. A. de, & Steiner, F. (2018). Épocas de semeadura do trigo para a região Centro-Sul Mato-Grossense. *JOURNAL OF NEOTROPICAL AGRICULTURE*, 5(1), 23–27. <http://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/1762/2044>

Silva, F. A., De Freitas, F. C. L., Rocha, P. R. R., Cunha, J. L. X., Dombroski, J. L. D., Coelho, M. E. H., & De Lima, M. F. P. (2015). Milho para ensilagem cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional sob efeito de veranico. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(1), 327–340. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n1p327>

Silva, M. S. e, Soares Sobrinho, J., Albrecht, J. C., Chagas, H. J., Caierão, E., Moresco, É. R., Castro, R. L. de, Nascimento Junior, A. do, Eichelberger, L., Guarienti, E. M., Miranda, M. Z. de, Maciel, J. L. N., Santana, F. M., Ribeiro Júnior, W. Q., & Scheeren, P. L. (2015). BRS 404 - Nova cultivar de trigo de sequeiro para o Cerrado brasileiro. *REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE*, 8.; *SEMINÁRIO TÉCNICO DO TRIGO*, 9., 2014, *Canela*; *REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE*, 9.; *SEMINÁRIO TÉCNICO DO TRIGO*, 10., 3.

Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press.

Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy* (11th ed.). USDA — Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050915.pdf

Sousa, C. N. A. de, & Caierão, E. (2014). *Cultivares de trigo indicadas para cultivo no Brasil e instituições criadoras 1922 a 2014 Cultivares de Trigo* (2nd ed.). Embrapa Trigo. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1012761/1/2014Cultivaresdetri go1922.pdf>

Sousa, D. M. G. de, & Lobato, E. (2004). *Cerrado Correção do solo e adubação* (D. M. G. de Sousa & E. Lobato (eds.); 2nd ed.). Embrapa Informação Tecnológica.

Souza, M. de, & Ramalho, M. A. P. (2001). Controle genético e tolerância ao estresse de calor em populações híbridas e em cultivares de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36(10), 1245–1253. <http://www.scielo.br/pdf/pab/v36n10/6748.pdf>

Symanczik, S., Lehmann, M. F., Wiemken, A., Boller, T., & Courty, P.-E. (2018). Effects of two contrasted arbuscular mycorrhizal fungal isolates on nutrient uptake by *Sorghum bicolor* under drought. *Mycorrhiza* 2018 28:8, 28(8), 779–785. <https://doi.org/10.1007/S00572-018-0853-9>

Taiz, L., & Zeiger, E. (2013). *Fisiologia vegetal* (5th ed.). Porto Alegre.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e*

Desenvolvimento Vegetal (6th ed.). Artmed. <https://www.saraiva.com.br/fisiologia-e-desenvolvimento-vegetal-6-ed-2017-9404479.html>

Takeiti, C. Y. (2015). *Trigo*. http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CO NT000girlwnqt02wx5ok05vadr1qrnof0m.html

Thirkell, T. J., Pastok, D., & Field, K. J. (2020). Carbon for nutrient exchange between arbuscular mycorrhizal fungi and wheat varies according to cultivar and changes in atmospheric carbon dioxide concentration. *Global Change Biology*, 26(3), 1725–1738. <https://doi.org/10.1111/GCB.14851>

Tran, B. T. T., Watts-Williams, S. J., & Cavagnaro, T. R. (2019). Impact of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and nutrition of fifteen crop and pasture plant species. *Functional Plant Biology*, 46(8), 732–742. <https://doi.org/10.1071/FP18327>

Truber, P. V., & Fernandes, C. (2014). Arbuscular mycorrhizal fungal communities and soil aggregation as affected by cultivation of various crops during the sugarcane fallow period. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38(2), 415–422. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200006>

USDA. (2021). *United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service*. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/statsByCommodity>

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

Verma, J. P., Yadav, J., Tiwari, K. N., Lavakush, & Sing, V. (2010). Impact of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Crop Production. *International Journal of Agricultural Research*, 5(11), 954–983. <http://docsdrive.com/pdfs/academicjournals/ijar/2010/954-983.pdf>

Verslues, P. E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J., & Zhu, J.-K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 45(4), 523–539. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2005.02593.x>

Vílchez, J. I., García-Fontana, C., Román-Naranjo, D., González-López, J., & Manzanera, M. (2016). Plant Drought Tolerance Enhancement by Trehalose Production of Desiccation-Tolerant Microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1577. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01577>

Wada, Y., Wisser, D., Eisner, S., Flörke, M., Gerten, D., Haddeland, I., Hanasaki, N., Masaki, Y., Portmann, F. T., Stacke, T., Tessler, Z., & Schewe, J. (2013). Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4626–4632. [https://doi.org/10.1002/GRL.50686@10.1002/\(ISSN\)1944-8007.GRLCMP5](https://doi.org/10.1002/GRL.50686@10.1002/(ISSN)1944-8007.GRLCMP5)

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for

determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.

Wang, J., Mao, H., Zhao, H., Huang, D., & Wang, Z. (2012). Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. *Field Crops Research*, 135, 89–96. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2012.07.010>

Waraich, E. A., Ahmad, R., & Ehsanullah, M. Y. A. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 764–777. https://www.cropj.com/waraich_5_6_2011_764_777.pdf

Woolet, J., & Whitman, T. (2020). Pyrogenic organic matter effects on soil bacterial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 141, 107678. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2019.107678>

Worku, T., Khare, D., & Tripathi, S. K. (2019). Spatiotemporal trend analysis of rainfall and temperature, and its implications for crop production. *Journal of Water and Climate Change*, 10(4), 799–817. <https://doi.org/10.2166/WCC.2018.064>

Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 161(9), 575–586.

Wright, Sara F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 61(9), 575–586. <https://doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>

Wu, Q.-S., Srivastava, A. K., & Zou, Y.-N. (2013). AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae*, 164, 77–87. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2013.09.010>

Wu, Q.-S., & Zou, Y.-N. (2009). Mycorrhizal influence on nutrient uptake of citrus exposed to drought stress. *The Philippine Agriculturist Scientist*, 92, 33–38. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PH2010000129>

Wu, Q.-S., & Zou, Y.-N. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Drought Stress in Plants. In *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (pp. 25–41). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_2

Yooyongwech, S., Samphumphuang, T., Tisarum, R., Theerawitaya, C., & Cha-um, S. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved water deficit tolerance in two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. *Scientia Horticulturae*, 198, 107–117. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2015.11.002>

Zhang, fei, He, J.-D., NI, Q.-D., WU, Q.-S., & ZOU, Y.-N. (2018). Enhancement of Drought Tolerance in Trifoliate Orange by Mycorrhiza: Changes in Root Sucrose and Proline Metabolisms. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(1), 270–276. <https://www.notulaeobotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/10983/8095>

Zhang, B., Zhang, H., Wang, H., Wang, P., Wu, Y., & Wang, M. (2018). Effect of Phosphorus Additions and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Inoculation on the Growth, Physiology, and Phosphorus Uptake of Wheat Under Two Water Regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(7), 862–874. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435798>

Zhang, F., Zou, Y.-N., & Wu, Q.-S. (2018). Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in citrus under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 229, 132–136. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2017.10.038>

Zhang, M., O'Connor, P. J., Zhang, J., & Ye, X. (2021). Linking soil nutrient cycling and microbial community with vegetation cover in riparian zone. *Geoderma*, 384, 114801. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114801>

Zhu, Y., Lv, G. C., Chen, Y. L., Gong, X. F., Peng, Y. N., Wang, Z. Y., Ren, A. T., & Xiong, Y. C. (2017). Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi with plastic mulching in rainfed wheat: A promising farming strategy. *Field Crops Research*, 204, 229–241. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2016.11.005>

Zilli, M., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Valin, H., Mosnier, A., Leclère, D., Havlík, P., Kraxner, F., Lopes, M. A., & Ramos, F. M. (2020). The impact of climate change on Brazil's agriculture. *Science of The Total Environment*, 740, 139384. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139384>

CAPITULO I – ASSOCIAÇÃO MICORRÍZICA EM GENÓTIPOS DE TRIGO SUBMETIDOS A IRRIGAÇÃO VARIÁVEL NO CERRADO

MYCORRHIZAL ASSOCIATION IN WHEAT GENOTYPES SUBMITTED TO VARIABLE IRRIGATION IN THE BRAZILIAN CERRADO

(Méndez, D. F. S.; Paula, A. M.; Ramos, M. L. G.; Ribeiro Junior, W. Q.; Busato, J.G.; Soares, G. F.; Lima, C. A. *Mycorrhizal Association in Wheat Genotypes Submitted to Variable Irrigation in the Brazilian Cerrado*. Journal of Agricultural Science, v. 13, p. x, 2021)

RESUMO

A associação micorrízica exerce contribuição no crescimento vegetal, com influência na tolerância à estresses abióticos, como o déficit hídrico. Há considerável variação na infecção por fungos micorrízicos arbusculares (FMA) entre cultivares de uma mesma cultura, mas há pouca informação dessas diferenças na cultura do trigo. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do déficit hídrico na associação micorrízica arbuscular em genótipos de trigo na região do Cerrado. O experimento foi conduzido em sistema plantio direto, utilizando diferentes lâminas de irrigação. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, com 12 tratamentos e 3 repetições. As parcelas compreenderam 4 genótipos de trigo e as subparcelas incluíram 3 lâminas de irrigação. Foram avaliadas a taxa de colonização micorrízica, o carbono da biomassa microbiana do solo; carbono orgânico total do solo; proteína do solo relacionada a glomalina; número de esporos e a diversidade de espécies de FMA. A colonização micorrízica não foi influenciada pelos genótipos de trigo, mas foi favorecida pela maior disponibilidade hídrica, sendo 44,8% maior comparado à menor lâmina de irrigação. A umidade do solo correlacionou-se positivamente com os atributos do solo exceto o número de esporos. A comunidade de FMA associada aos genótipos de trigo foi similar, abrangendo 12 espécies, predominando *Claroideoglomerus etunicatum* e *Glomerus macrocarpum*. A baixa variação entre os genótipos de trigo para a diversidade de FMA, sugere ausência de influência seletiva das plantas na comunidade de FMA na área do estudo. A disponibilidade hídrica mostrou-se como fator dominante na associação micorrízica.

Palavras chave: atributos do solo; Cerrado; déficit hídrico; fungos micorrízicos arbusculares; plantio direto; *Triticum aestivum*.

ABSTRACT

Mycorrhizal association contributes to plant growth, influencing tolerance to abiotic stresses such as water deficit. There is considerable variation in infection by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in cultivars of the same crop, but there is little information regarding these differences in wheat. The objective of this work was to evaluate the influence of water deficit on the arbuscular mycorrhizal association in wheat genotypes in the Cerrado region and the association between soil attributes and mycorrhizal colonization. The experiment was conducted in a no-till system, using different water regimes. The experimental design was a randomized block with subdivided plots scheme, with 12 treatments and 3 repetitions. The plots consisted of 4 wheat genotypes and the subplots included 3 water regimes. Mycorrhizal colonization, soil microbial biomass carbon, total soil organic carbon, easily extractable glomalin-related soil protein, spore number and AMF species diversity were evaluated. Mycorrhizal colonization was not influenced by wheat genotypes, but it was favored by the higher water regime, being 44.8% higher when compared to the lower water regime. The soil moisture was positively correlated with the soil attributes with the exception of the number of AMF spores. The community of AMF associated with wheat genotypes was similar, comprising of 12 species, predominantly *Claroideoglossum etunicatum* and *Glomus macrocarpum*. The low variation among wheat genotypes for AMF diversity suggests no selective influence of the plants on the AMF community in the area of the study. Water regime was shown to be a dominant factor in mycorrhizal association.

Keywords: soil attributes, Cerrado; water deficit; arbuscular mycorrhizal fungi; no-till; *Triticum aestivum*.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água é uma das variáveis ambientais determinantes para a produção agrícola. Esse recurso está no centro das preocupações dos produtores rurais, uma vez que as projeções de mudanças climáticas apontam para o aumento no número consecutivo de dias de seca, com possíveis efeitos nas regiões de maior demanda hídrica para agricultura, tais como o Cerrado brasileiro (Avila-Diaz et al., 2020). Esta região abriga 43% da área plantada com grãos no Brasil (Conab, 2021), mas desenvolver estratégias capazes de superar a limitação de cultivo no período de inverno, em decorrência da baixa ocorrência de chuvas, representa uma possibilidade importante para aumentar a produção sem ampliar a área já agricultada. Em sistemas não irrigados, essas estratégias podem colaborar para a realização do cultivo denominado safrinha, que ocorre exatamente em períodos de menor disponibilidade hídrica.

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos cereais mais cultivados e consumidos no mundo (Takeiti, 2015; Wang et al., 2012) e vem sendo cultivada em sistema de sequeiro no período de maior disponibilidade de chuvas no Cerrado brasileiro. Na safra 2021, a área total plantada nesta região foi de 106,6 mil hectares, que representou aumento de 84,7% em relação à safra anterior (Conab, 2021). A ocorrência de grande volume de chuvas no período de verão associada às condições edáficas favoráveis (e.g., solos porosos e profundos, de topografia suave e fertilidade corrigida), assim como a localização geográfica favorável à distribuição e comercialização, tem impulsionado o cultivo do trigo na região (Condé et al., 2009; Galindo et al., 2015). Programas de melhoramento genético tem sido desenvolvidos na região visando adaptar cultivares com menor demanda por água, com objetivo de possibilitar o plantio também no período de maior irregularidade na quantidade e distribuição das chuvas (Cargnin et al., 2006).

Associado aos programas de melhoramento, a seleção das cultivares capazes de realizar associação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) pode ser importante em decorrência da reconhecida contribuição desses fungos na capacidade das plantas cultivadas em tolerar períodos de reduzida ocorrência de chuvas (Bernardo et al., 2019). Esta contribuição está relacionada à maior área de absorção de água pelas hifas extrarradiculares dos FMA, com acesso facilitado aos microporos do solo que resulta em maior fluxo de água no apoplasto (Bárzana et al., 2012a; Chitarra et al., 2016). Os FMA também estimulam a exsudação radicular, especialmente a partir da liberação da

glomalina, resultando em maior agregação do solo na rizosfera, minimizando os efeitos negativos promovidos pela escassez de chuvas (Cheng et al., 2021). A associação micorrízica arbuscular também favorece a biomassa microbiana e o acúmulo de carbono no solo (Vlček & Pohanka, 2020). A composição da comunidade de FMA influencia na funcionalidade da simbiose em distintos ecossistemas, como os agroecossistemas (Castillo et al., 2016), sendo restrito o conhecimento sobre a relação entre a comunidade de FMA e a resposta das plantas à simbiose, pela avaliação da colonização micorrízica (Léon et al., 2020).

Os benefícios advindos da associação micorrízica para as plantas cultivadas são de grande interesse para a produção agrícola sustentável e, são diretamente regulados pelas condições ambientais, sendo as práticas de manejo agrícola consideradas como o principal regulador (Barea, 2015). A relação entre a colonização micorrízica e a resposta de crescimento em cereais de inverno como o trigo foi considerada baixa ou nula por Tran et al. (2019), refletindo a influência da seleção de genótipos em condições de elevados níveis de fertilidade do solo. Entretanto, variações na infecção por FMA entre cultivares têm sido apontadas na literatura (Lehnert et al., 2017; Nahar et al., 2020). A seleção de cultivares de trigo com maior capacidade de associação com FMA pode ser importante para determinar os materiais mais adequados para cultivo no Cerrado durante o período de menor ocorrência de chuvas. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de genótipos de trigo de sequeiro submetidos a estresse hídrico na dinâmica da simbiose micorrízica arbuscular em condições de campo no Cerrado Brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização e histórico da área experimental

O experimento foi conduzido entre junho e setembro de 2016, no campo experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF. Localizado nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 15°35'30'' Sul e longitude 47°42'30'' Oeste, altitude de 1000 m, sob um Latossolo Vermelho distrófico típico com textura argilosa (Soil Survey Staff, 2010).

O clima da região, segundo a classificação Köppen, é do tipo Aw tropical estacional com duas estações climáticas bem definidas: período de seca no outono e inverno; período de chuva na primavera e verão com possíveis ocorrências de veranicos. A temperatura média anual é de 20,5°C com precipitação de 1538 mm (Figura 1).

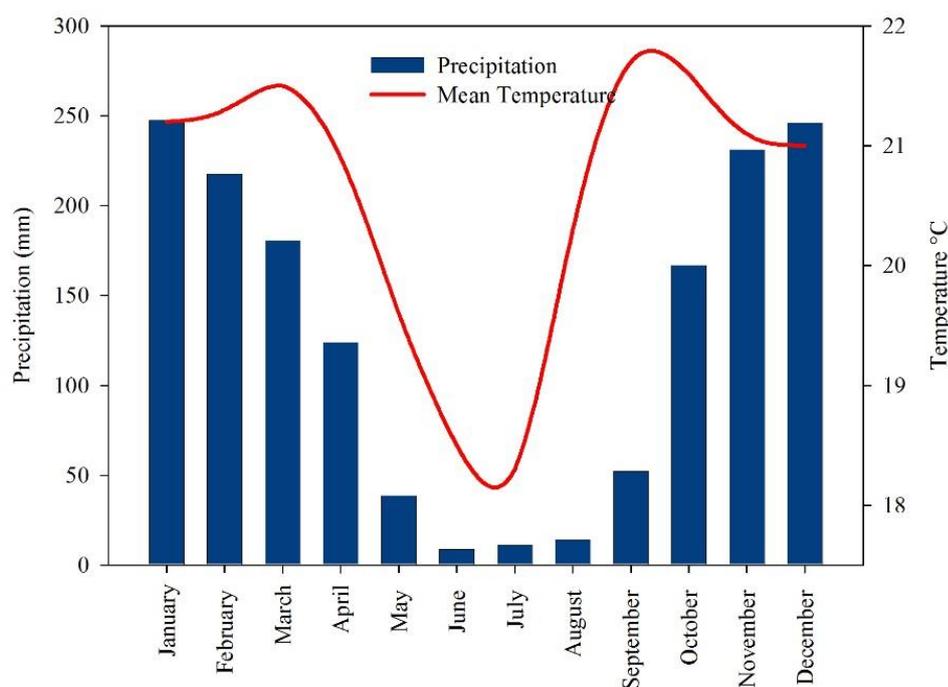


Figura 1. Dados climatológicos de temperatura média e precipitação acumulada mensal da região do Distrito Federal (Normal climatológica 1961 – 1990). Fonte: Inmet (2019).

A área foi cultivada com trigo em sistema de plantio direto por 10 anos com a mesmas cultivares selecionadas para este estudo no inverno (Maio a Setembro). No verão (Outubro a Abril), era feita a rotação soja-feijão. Anteriormente ao cultivo do trigo, a área foi cultivada com braquiária por cinco anos. A caracterização química do solo na camada

de 0-20 cm, amostrada antes a instalação do experimento, foi: pH (H₂O) = 6,36; Matéria orgânica = 21,6 g dm⁻³, P (Melich-1) = 7,23 mg dm⁻³; K, Ca, Mg, H + Al e CTC: 0,35; 3,01; 1,72; 3,47 e 8,55 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

2.2. Delineamento experimental e condução do experimento

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas foram compostas por quatro genótipos de trigo de sequeiro e as subparcelas por três lâminas de irrigação.

Os genótipos de trigo utilizados foram: 1) BRS 404: material de sequeiro, tolerante à seca, calor e ao alumínio tóxico do solo. Classe comercial tipo pão. Obtido do cruzamento da cultivar Aliança e a linhagem WT 99172 (Silva et al., 2015); 2) Brilhante: material de sequeiro, tolerante à seca, classe comercial tipo pão. Foi obtido da linhagem PF 8640 e a cultivar BR 24. Apresenta sistema radicular abundante, característica desejável para o uso eficiente da água em condições de deficiência hídrica (Franco & Evangelista, 2018); 3) PF 020037: linhagem selecionada em condições de sequeiro. Apresenta cerosidade intensa nas folhas e colmos, mecanismo natural de tolerância à seca; 4) PF 080492: material de sequeiro da região sul do país, entretanto adaptou-se bem na região Centro-Oeste.

As subparcelas consistiram em lâminas variáveis de irrigação, inferiores à reposição da evapotranspiração da cultura (ET_c). As irrigações foram realizadas conforme descrito no programa de monitoramento de irrigação no Cerrado (Embrapa, 2011), através da substituição da evapotranspiração, utilizando indicadores agrometeorológicos da região, o tipo de solo e a data de plena emergência das plantas. Foram consideradas 3 lâminas de irrigação correspondentes a 96, 68 e 6% da reposição da ET_c (L96, L68 e L6). As lâminas de irrigação variáveis foram obtidas através de uma adaptação a uma barra irrigadora com um conjunto de aspersores de diferentes vazões, de forma decrescente. A mesma foi acoplada a um carretel com velocidade ajustável a fim de aplicar as lâminas desejadas (Hanks, Keller, Rasmussen & Wilson, 1976).

O plantio ocorreu no dia 01 de junho de 2016, sendo a área útil de cada parcela (genótipos de trigo) de 18 m² (18 m de comprimento por 1 m de largura). Estas, foram instaladas perpendicularmente à barra irrigadora. As subparcelas, consistiram em 1 m² (1 m de comprimento por 1 m de largura) situadas na posição do regime hídrico adotado dentro de cada parcela. A densidade de plantas foi de 350 plantas m².

Previamente à instalação do experimento, o solo foi tratado com herbicida Glifosato como controle de plantas espontâneas. De acordo com a análise química do solo, a recomendação de adubo no plantio foi de 441 kg ha⁻¹ do fertilizante mineral misto 04-30-16. No início do perfilhamento da cultura, foi realizada a adubação nitrogenada de cobertura com 100 kg ha⁻¹ de nitrogênio na forma de ureia. Trinta dias após a emergência, os tratamentos receberam uma aplicação de 0,5 L ha⁻¹ de trinexapaque-etílico como regulador de crescimento.

Até os 30 dias após o plantio, as parcelas receberam a mesma lâmina de água, acumulando 134,1 mm (incluindo a precipitação). Após este período, aos 35 dias após o plantio, iniciou-se a irrigação com lâminas variáveis, utilizando-se barras de irrigação com diferentes vazões. Foram aplicadas 14 irrigações em diferentes lâminas de acordo com os tratamentos correspondentes (L96, L68 e L6) até o final do ciclo da cultura (Figura 2).

Em média, as lâminas aplicadas durante este período foram 33, 23 e 2 mm para L96, L68 e L6 respectivamente, acumulando uma lâmina total de 599, 462 e 164 mm para o ciclo total da cultura (Figura 3).

O monitoramento das lâminas aplicadas após cada irrigação foi realizado a partir da distribuição de coletores plásticos instalados perpendicularmente à barra irrigadora. Com isto, determinou-se as lâminas (mm) reais aplicadas nos tratamentos a cada irrigação.

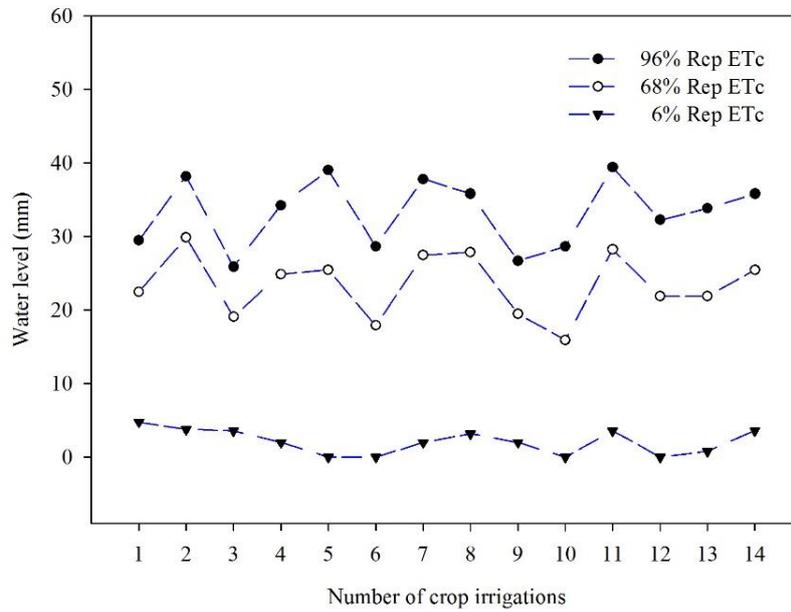


Figura 2. Lâminas de irrigação aplicadas, no período de 35 a 71 dias após o plantio, a partir da reposição da evapotranspiração da cultura (Rep ETc) em diferentes regimes hídricos e diferentes genótipos de trigo em um Latossolo vermelho no Cerrado.

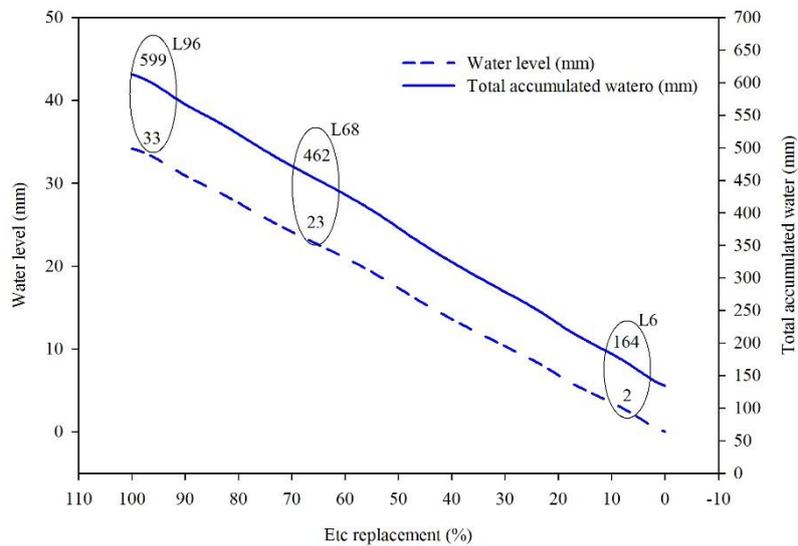


Figura 3. Esquema representando as lâminas médias aplicadas e lâmina total acumulada no ciclo de diferentes genótipos de trigo em um Latossolo vermelho no Cerrado.

2.3. Coleta e variáveis analisadas

Aproximadamente 72 dias após a emergência das plântulas, no período do florescimento, foram realizadas coletas do solo e das raízes. O solo foi coletado nas linhas do plantio, na camada de 0-10 cm, em amostra composta de cinco subamostras. As raízes do trigo foram coletadas em 5 de plantas aleatórias, dentro de cada parcela experimental. Os materiais foram imediatamente encaminhados para laboratório, sendo as amostras de solos conservadas em câmara fria a 4°C e as raízes mantidas em solução de álcool a 70%. Uma parte das amostras do solo foi utilizada imediatamente após coleta para a determinação a umidade, empregando-se o método gravimétrico (Embrapa, 1997).

A determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) foi realizada pelo método fumigação-extração, proposto por Vance, Brookes and Jenkinson (1987). Para isto, as amostras foram incubadas a 80% da capacidade de campo por um período de 7 dias e, após esse período, metade das amostras foram fumigadas com CHCl_3 durante 24 h. Foi utilizado K_2SO_4 0,5 mol L^{-1} como solução extratora e a oxidação do carbono orgânico empregou solução de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,166 mol L^{-1} em meio ácido. A quantidade de carbono da biomassa microbiana foi determinada pela diferença entre o carbono extraído do solo fumigado e o não fumigado, utilizando-se o fator de correção $\text{kec}=0,379$.

O carbono orgânico total do solo (COT) foi determinado de conforme a metodologia descrita por Walkley and Black (1934), através da oxidação com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,166 mol L^{-1} e titulação do Cr^{6+} remanescente com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,5 mol L^{-1} .

A determinação da concentração da proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível (PSRG-FE) foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Wright and Upadhyaya (1996), a partir da extração de 1 g de TFSA (terra fina seca ao ar) com 8 ml de $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ (citrato de sódio) 20 mmol L^{-1} , a pH 7,0, a 121 °C, por 30 minutos. As amostras foram centrifugadas (5000 rpm, 10 min) e a concentração de PSRG-FE no sobrenadante foi determinada pelo ensaio de Bradford (1976) em densidade óptica de 595 nm, utilizando-se bovine serum albumin (BSA) como proteína padrão.

A taxa de colonização micorrízica foi avaliada através do clareamento das raízes e coloração de estruturas fúngicas, conforme Phillips and Hayman (1970). O clareamento foi realizado com KOH a 10%, em banho maria, seguido de coloração das estruturas dos FMA com azul de tripan a 0,05% numa solução de água, glicerina e ácido láctico na proporção de 1:1:1 (v:v:v). Para a determinação da taxa de colonização, foram utilizados

placa quadriculada e microscópio estereoscópio, de acordo com Giovannetti and Mosse (1980).

O número de esporos de FMA no solo foi determinado pelo método de peneiramento úmido proposto por Gerdemann and Nicolson (1963), com algumas adaptações. Para recuperar a maior quantidade de esporos retidos nos agregados do solo, optou-se por agitar a amostra do solo (50 cm³) no liquidificador com água da torneira por 30 segundos e, após a decantação do solo, a suspensão foi disposta em peneiras com malha de 1000 e 45 µm. O material retido na peneira de 45 µm foi colocado em tubos de centrífuga com água e centrifugado (3000 rpm, 3 min). O sobrenadante foi descartado e uma nova centrifugação (2000 rpm, 3 min) foi realizada com solução de sacarose a 50%. O sobrenadante foi recuperado para a contagem dos esporos utilizando-se placa canaleta e microscópio estereoscópio.

A identificação taxonômica de espécies de FMA foi realizada através da caracterização morfológica (cor, formato, tamanho, entre outras características) dos esporos saudáveis extraídos a partir da análise de densidade de esporos. Lâminas permanentes foram confeccionadas em meio PVLG (Polivinil-Lactoglicerol) e PVLG + reagente de Melzer. A identificação das espécies de FMA foi conduzida com o auxílio da consulta em bancos de dados da Coleção Internacional de Culturas de Fungos Micorrízicos Arbusculares e Vesiculares-Arbusculares da Universidade de West Virginia (Invam, 2021) e do Departamento de Patologia de Plantas da Universidade Agrícola de Szczecin Polônia (Janusz Blaszkowski, 2019), ambos disponíveis nos sites web correspondentes.

2.4. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade pelo programa estatístico Sisvar 5.6 (Ferreira, 2010). Os dados de número de esporos e colonização micorrízica foram transformados em $\log X + 1$ e $(\arcsin \% / 100)^{0,5}$, respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Atributos microbiológicos do solo e simbiose micorrízica

O cultivo dos diferentes genótipos de trigo resultou em efeito similar nos teores de CBM, COT, PSRG-FE, na colonização micorrízica e na densidade de esporos de FMA (Tabela 1). Entretanto, as lâminas de irrigação afetaram os teores de CBM, COT, PSRG-FE e colonização micorrízica. Em relação às lâminas de irrigação, as maiores médias para CBM (284 mg kg⁻¹), COT (21 mg kg⁻¹), PSRG-FE (6 mg g⁻¹) e taxa de colonização (42%) foram observadas no tratamento L96.

Tabela 1. Carbono da biomassa microbiana (CBM); Carbono orgânico total (COT); Proteína do solo relacionado a glomalina (PSRG-FE); Taxa de colonização micorrízica (CM) e número de esporos em um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm.

Cultivar de trigo	CBM	COT	PSRG-FE	CM	Esporos
	mg kg ⁻¹ solo	g kg ⁻¹ solo	mg g ⁻¹ solo	%	n.º 50 cm ⁻³
Brilhante	236	19	4,9	32	190
BRS 404	223	20	4,6	35	241
PF 020037	261	20	5,0	33	281
PF 080492	208	19	4,6	37	296
L96	284 a	21a	6,0a	42 a	224
L68	220 b	20b	4,6b	33 ab	239
L6	191 b	19b	3,6c	29 b	294
CV1 (%)	25	9	19	14	54
CV2 (%)	28	7	13	18	62

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV1: Coeficiente de variação relacionado às cultivares do trigo; CV2: coeficiente de variação relacionado às lâminas de irrigação. L96, L68 e L6 correspondem às lâminas 96, 68 e 6% da reposição da ETc, respectivamente. Dados transformados em $(\log X + 1)$ para densidade de esporos e $(\arcsin \% / 100)^{0,5}$ para a taxa de colonização micorrízica.

Nas lâminas de água L68 e L6, observou-se redução dos teores de CBM na ordem de 22,5 e 32,7%, respectivamente, em relação à L96. Para o COT, reduções de 5 e 9,5% foram observadas nas lâminas L68 e L6, em comparação com L96. Já os teores de PSRG-FE foram reduzidos em 23,3 e 40% nas lâminas L68 e L6, respectivamente, enquanto as taxas de colonização micorrízica foram reduzidas em 21,4 e 30,9%. A umidade do solo influenciou positivamente o aumento dos teores dos atributos do solo avaliados, com

exceção do número de esporos de FMA (Tabela 2). A PSRG-FE foi o atributo que maior teve correlação com a umidade do solo (0,721**).

Tabela 2. Correlação de Pearson nos atributos de um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm.

	Umidade do solo	CBM	COT	PSRG-FE	CM	Esporos
Umidade do solo	1	,470**	,497**	,721**	,473**	-,177
CBM		1	,401**	,380**	,068	-,160
COT			1	,524**	,224	-,019
PSRG-FE				1	,453**	-,185
CM					1	-,277*
Esporos						1

CBM=Carbono da biomassa microbiana; COT=Carbono orgânico total; PSRG-FE=Proteína do solo relacionado a glomalina; CM=Colonização micorrízica.

3.2. Ocorrência e distribuição de espécies de fungos micorrízicos arbusculares

Foram observadas doze espécies de FMA nas amostras obtidas, dez das quais puderam ser identificadas em nível de espécie e duas em nível de gênero. As espécies que ocorreram em todas as parcelas experimentais foram *Claroideoglossum etunicatum* e *Glomus macrocarpum* (Tabela 3), ambas com maior frequência de esporos (100%). Já as espécies *Ambispora leptoticha*, *Scutellospora gregaria* e *Gigaspora sp.* apresentaram os menores valores de frequência de esporos (42, 50 e 50%, respectivamente). Foram identificadas também as espécies *Acaulospora mellea*, *Acaulospora rehmi*, *Acaulospora scrobiculata*, *Glomus clavisorum*, *Glomus microagregatum*, *Glomus sp.* e *Scutellospora cerradencis*, que mostraram ocorrências variadas nas áreas estudadas.

Nas parcelas cultivadas com o genótipo Brilhante, as espécies *Acaulospora rehmi*, *Glomus sp* e *Gigaspora sp.* foram observadas apenas na menor lâmina de irrigação (L6), e as espécies *Acaulospora mellea* e *Ambispora leptoticha* apenas na lâmina intermediária (L68). Das 12 espécies identificadas, 5 delas estiveram presentes em todas as lâminas de irrigação (*Claroideoglossum etunicatum*, *Glomus macrocarpum*, *Acaulospora scrobiculata*; *Glomus clavisorum*; *Scutellospora gregaria*).

Dentre os genótipos de trigo, somente no genótipo PF 020037 foi constatada a influência de apenas uma das lâminas de irrigação (L6) na presença específica das espécies *Ambispora leptoticha*, *Scutellospora gregaria* e *Scutellospora cerradencis*. Por outro lado, para esse mesmo genótipo, foram observadas em todas as lâminas de irrigação

as espécies *Claroideoglopus etunicatum*, *Glomus clavisporum*, *Glomus macrocarpum* e *Gigaspora* sp.

Nas parcelas cultivadas com o genótipo BRS 404, a espécie *Glomus clavisporum* foi observada apenas na menor lâmina de irrigação (L6) e, a espécie *Acaulospora mellea* apenas na maior lâmina (L96). Semelhante ao verificado nas áreas cultivadas com os demais genótipos, as espécies *Claroideoglopus etunicatum* e *Glomus macrocarpum* foram observadas em todas as lâminas de irrigação.

Já nas parcelas cultivadas com o genótipo PF 080492, as espécies *Glomus microagregatum* e *Gigaspora* sp. foram observadas apenas na lâmina de irrigação intermediária (L68) e a espécie *Ambispora leptoticha* foi observada apenas na maior lâmina de irrigação (L96). Similar às áreas cultivadas com o genótipo Brilhante, 5 das 12 espécies identificadas estiveram presentes em todas as lâminas de irrigação (*Acaulospora mellea*; *Acaulospora scrobiculata*; *Claroideoglopus etunicatum* e *Glomus macrocarpum*).

Considerando a influência das lâminas de irrigação na distribuição das espécies de FMA, observou-se a presença das 12 espécies identificadas em ao menos um dos genótipos de trigo. No tratamento L6, constatou-se o maior número de espécies mais frequentes, sendo elas *Acaulospora scrobiculata*; *Claroideoglopus etunicatum*; *Glomus clavisporum* e *Glomus macrocarpum*. A espécie *Glomus microagregatum* foi a que apresentou a menor frequência, encontrada apenas na subparcelas cultivada com o genótipo BRS 404.

As espécies com maior frequência na lâmina intermediária (L68) foram similares às observadas no tratamento L6, exceto para *Glomus clavisporum* e, 2 espécies apresentaram a menor frequência: *Ambispora leptoticha* e *Scutellospora gregária*, ambas ocorreram somente na subparcela cultivada com genótipo Brilhante.

No tratamento L96, apenas as espécies *Claroideoglopus etunicatum* e *Glomus macrocarpum*, que apresentaram maior frequência, também observadas nas demais lâminas. A espécie que apresentou a menor frequência foi a *Gigaspora* sp. encontrada apenas na subparcelas cultivada com o genótipo PF020037.

Tabela 3. Diversidade de espécies de FMA identificados morfologicamente de um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm.

Espécie FMA	Cultivar/Lâmina de irrigação												Frequência (%)
	Brilhante	PF020037	BRS404	PF080492	Brilhante	PF020037	BRS404	PF080492	Brilhante	PF020037	BRS404	PF080492	
	Lâmina 6				Lâmina 68				Lâmina 96				
<i>Acaulospora mellea</i>		+		+	+			+		+			58
<i>Acaulospora rehmi</i>	+		+	+		+		+	+				58
<i>Acaulospora scrobiculata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	92
<i>Ambispora leptoticha</i>		+	+		+						+	+	42
<i>Claroideoglossum etunicatum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
<i>Glomus claviforme</i>	+	+	+	+	+	+		+	+			+	83
<i>Glomus macrocarpum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
<i>Glomus microaggregatum</i>			+		+	+		+	+	+			58
<i>Glomus</i> sp	+	+		+		+	+	+			+		58
<i>Scutellospora gregaria</i>	+	+	+		+				+		+		50
<i>Scutellospora. cerradensis</i>	+	+			+		+	+			+	+	58
<i>Gigaspora</i> sp	+	+				+	+	+		+			50
Riqueza de espécies	10	11	9	8	11	10	8	12	9	11	12	10	

A análise de correspondência canônica confirmou que a ocorrência e frequência de esporos das espécies identificadas não foram influenciadas pelas cultivares de trigo, mas foram pela disponibilidade hídrica (Figura 4). As maiores lâminas de irrigação aumentaram a diversidade de FMA. É importante destacar que o número de esporos não indica o número de indivíduos da espécie identificada, uma vez que os esporos apenas são uma estrutura de reprodução dos FMA. Nesse sentido, embora o número de esporos recuperados tenha relação contrária à colonização micorrízica, o aumento dos teores de PSRG-FE e a maior diversidade de FMA indicam que há uma atividade maior nos ambientes com maior disponibilidade hídrica.

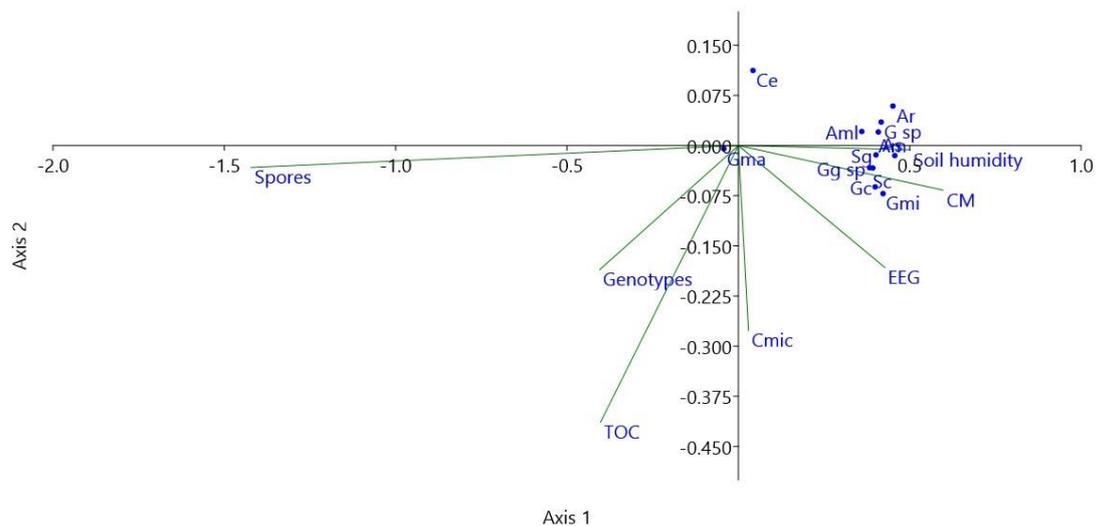


Figura 4. Análise de correspondência canônica da frequência de esporos de espécies de fungos micorrízicos arbusculares e atributos do solo em um Latossolo vermelho sob diferentes genótipos de trigo e lâminas de irrigação, na profundidade de 0 – 10 cm. Am=*Acaulospora mellea*; Ar=*Acaulospora rehmi*; As=*Acaulospora scrobiculata*; Aml=*Ambispora leptoticha*; Ce=*Claroideoglobus etunicatum*; Gc=*Glomus clavisporum*; Gma=*Glomus macrocarpum*; Gmi=*Glomus microagregatum*; G sp=*Glomus sp*; Sg=*Scutellospora gregária*; Sc=*Scutellospora cerradencis*; Gg sp=*Gigaspora sp*. TOC=carbono orgânico total; Cmic=carbono da biomassa microbiana; EEG=proteína do solo relacionado à glomalina – facilmente extraível; Genotypes=Brilhante, PF020037. BRS404, PF080492.

4. DISCUSSÃO

4.1. Atributos microbiológicos do solo e simbiose micorrízica

A sobrevivência dos microrganismos e sua atividade são dependentes da disponibilidade de água no solo. O CBM responde às condições climáticas e a intensificação do estresse hídrico reduz o teor de CBM (Geng et al., 2015). Teores de CBM abaixo de 245 mg kg⁻¹ são considerados baixos (Mendes et al., 2019) e associados com condições de seca severa (Geng et al., 2015), como o que foi observado nas lâminas de irrigação L68 e L6. A baixa disponibilidade de água no solo afeta também o fluxo de carbono entre as plantas e o solo, por provocar o fechamento estomático e subsequente declínio na transpiração, bem como a redução da fotossíntese e, conseqüentemente, a diminuição do COT derivado da planta e da rizodeposição (Zhao et al., 2020). Outros trabalhos também mostram que ambientes com déficit hídrico reduzem severamente a deposição de C no solo, afetando também os teores de COT (Hasibeder et al., 2015; Canarini & Dijkstra, 2015; Fuchslueger et al., 2016).

Os genótipos de trigo não influenciaram os teores de CBM e de COT. Características morfológicas como a razão raiz/parte aérea e espessura das raízes (dados não avaliados) auxiliam na compreensão da contribuição das plantas na alocação de carbono no solo por rizodeposição (Bakhshandeh et al., 2018). Diferente do que foi constatado neste trabalho, genótipos de trigo com maior razão raiz/parte aérea e raízes mais grossas alocaram mais C no solo através da rizodeposição em detrimento de produzir maior rendimento (Bakhshandeh et al., 2018), podendo, essas características, desempenhar um papel funcional importante na transferência de mais C para o reservatório de COT no solo.

Componente essencial do COT em ecossistemas terrestres (JIA et al., 2016) e participante do carbono armazenado no solo (Wilkes et al., 2021), a PSRG – FE correlacionou-se positivamente com o COT e se destaca como um componente essencial para o COT em ecossistemas terrestres (JIA et al., 2016). Correlação positiva também foi encontrada para a PSRG – FE e CBM em áreas de trigo cultivadas sob diferentes sistemas de manejo, em condição de clima temperado (Galazka et al., 2018).

A restrição de água resultante da aplicação da menor lâmina de irrigação (L6) reduziu o teor de PSRG – FE no solo e a CM, possivelmente devido as condições desfavoráveis ao crescimento das raízes das plantas (dados não avaliados) e, conseqüentemente resultando em limitação no estabelecimento da simbiose micorrízica, na abundância e diversidade

dos FMA. Diferentes espécies de FMA produzem diferentes quantidades de glomalina e apenas esses fungos produzem PSRG, logo, uma comunidade diversa e abundante de FMA contribui para maiores teores de glomalina no solo (Hossain, 2021). Essa relação é baseada em experimentos com amostras de raízes colonizadas por FMA e outras não colonizadas, onde a glomalina só foi detectada nas raízes colonizadas por esses fungos (Vlček & Pohanka, 2020).

Em concordância com os resultados observados nesse trabalho, a CM nas maiores lâminas de irrigação (L96 e L68) é similar em trigo cultivado sob diferentes sistemas de manejo, em condição de clima temperado (Galazka et al., 2018) e também está dentro da média observada (41%) em estudo que avaliou a CM em 94 genótipos de trigo (Lehnert et al., 2017).

Práticas de manejo que interferem no desenvolvimento das plantas, como adubação, uso de agrotóxicos, monocultivos e revolvimento constante do solo, resultam na redução da presença de propágulos infectivos das micorrizas arbusculares (Nyamwange et al., 2018), como o número de esporos de FMA. Já em sistemas mais conservacionistas, como sistema plantio direto, há uma condição ambiental favorável para o desenvolvimento da simbiose, pela ausência de revolvimento do solo (Schalamuk e Cabello, 2010). Na área em estudo, a adoção do plantio direto como sistema de cultivo, aliado a um programa de rotação de cultivos com gramíneas e leguminosas (Silva et al., 2020), possivelmente estabeleceu uma condição favorável a manutenção do número de esporos de FMA. No ciclo de desenvolvimento da simbiose, a produção de esporos entre as espécies de FMA possuem diferentes tempos e quantidades de esporulação e germinação (Gomide et al., 2009; Nyamwange et al., 2018), dessa forma, a ausência de resposta observada para o número de esporos de FMA pode estar relacionada ao período de avaliação utilizado neste estudo (70 dias após a emergência das plantas de trigo), podendo este ser considerado um curto prazo para a observação de resposta à mudanças no manejo do solo e fatores ambientais

4.2. Ocorrência e distribuição de espécies de fungos micorrízicos arbusculares

No presente estudo, as maiores lâminas de irrigação aumentaram a diversidade de FMA, conforme a análise de correspondência canônica. Condições ambientais favoráveis como a disponibilidade de água para a planta hospedeira e, conseqüentemente para o simbiote, são fatores que contribuem para a abundância de espécies de FMA, já condições adversas como a escassez de água, atuam como um filtro ambiental e, um reduzido número de

FMA tolerantes ao habitat predominante tem condições de permanecer no ambiente (Deepika & Kothamasi, 2015). Estudos recentes têm evidenciado que mudanças na disponibilidade de água no solo podem afetar a composição da comunidade de FMA (Deveautour et al., 2018; Deepika & Kothamasi, 2015). A influência das práticas de manejo do solo, como a irrigação, na composição da comunidade de FMA em áreas de cultivos anuais é aparentemente dominante em comparação à comunidade vegetal presente na área (Bainard et al., 2017).

A predominância de espécies pertencentes às famílias Glomeraceae, Acaulosporaceae e Gigasporaceae é consistente com a avaliação da comunidade de FMA em áreas de plantio direto cultivado com trigo (Schalamuk e Cabello, 2010). As duas espécies com maior frequência na área de estudo, *Claroideoglossum etunicatum* e *Glomus macrocarpum* (Tabela 3), já foram identificadas com maior ocorrência em áreas agrícolas, em sistemas convencionais e conservacionistas, bem como em áreas nativas do Cerrado (Fernandes et al., 2016; Ferreira et al., 2012; Nunes et al., 2019; Pontes et al., 2017). A alta frequência de uma espécie do gênero *Claroideoglossum* (*Claroideoglossum claroideum*) foi relatada em área cultivada com trigo no Sul do Chile (Castillo et al., 2016). Dentre as espécies menos frequentes observadas neste trabalho (*Ambispora leptoticha*, *Scutellospora gregaria* e *Gigaspora sp.*), *Ambispora leptoticha* também se apresentou entre as espécies menos frequentes em área cultivada com trigo no Sul do Chile (Castillo et al., 2016).

A dominância de espécies do gênero *Glomus* (cerca de 41% das espécies identificadas neste trabalho) em áreas sob plantio direto está associada com a habilidade e adaptação evolutiva dos FMA desse gênero em utilizar hifas extrarradiculares e fragmentos de raízes colonizadas como propágulos infectivos, em detrimento a produção de esporos (Schalamuk e Cabello, 2010). A contribuição na tolerância de plantas de trigo ao estresse hídrico está descrita entre os benefícios promovidos pela inoculação com uma espécie pertencente ao gênero *Glomus* (*Glomus mosseae*), melhorando o rendimento e crescimento das plantas em condição de baixa disponibilidade de água, em condições controladas (Rani et al., 2018).

5. CONCLUSÕES

Os genótipos de trigo estudados, destinados para programas de melhoramento visando à tolerância ao déficit hídrico, não promoveram alterações na associação com fungos micorrízicos arbusculares e nos atributos carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico total, proteína do solo relativa à glomalina –facilmente extraível.

A associação entre os atributos do solo carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico total, proteína do solo relativa à glomalina –facilmente extraível e a colonização micorrízica em plantas de trigo foram confirmadas, contribuindo com os estudos relacionados com a simbiose micorrízica.

A disponibilidade de água, influenciada pelas lâminas de irrigação aplicadas no cultivo do trigo, influenciou a colonização micorrízica, bem como os atributos do solo carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico total, proteína do solo relativa à glomalina – facilmente extraível, favorecidos pela maior lâmina aplicada, correspondente a 95% da evapotranspiração da cultura.

A ocorrência e a frequência das espécies de fungos micorrízicos arbusculares, identificados pela descrição morfológica, foi favorecida pela disponibilidade de água no solo e não foi influenciada pelos genótipos de trigo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avila-Diaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., & Wilson, A. (2020). Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, *55*, (5–6), 1403–1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- Bainard, L.D., Chagnon, P.-L., Cade-Menun, B.J., Lamb, E.G., LaForge, K., Schellenberg, M., Hamel, C. (2017). Plant communities and soil properties mediate agricultural land use impacts on arbuscular mycorrhizal fungi in the Mixed Prairie ecoregion of the North American Great Plains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *249*, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.010>
- Bakhshandeh, S., Corneo, P. E., Yin, L., & Dijkstra, F. A. (2018). Drought and heat stress reduce yield and alter carbon rhizodeposition of different wheat genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *205*(2), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jac.12314>
- Barea, J. M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *15*(2), 261–282. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162015005000021>
- Bárzana, G., Aroca, R., Paz, J. A., Chaumont, F., Martinez-Ballesta, M. C., Carvajal, M., & Ruiz-Lozano, J. M. (2012). Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in roots of the host plant under both well-watered and drought stress conditions. *Annals of Botany*, *109*(5), 1009–1017. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs007>
- Bernardo, L., Carletti, P., Badeck, F. W., Rizza, F., Morcia, C., Ghizzoni, R., Rouphael, Y., Colla, G., Terzi, V., & Lucini, L. (2019). Metabolomic responses triggered by arbuscular mycorrhiza enhance tolerance to water stress in wheat cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, *137*, 203–212. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.02.007>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Canarini, A., & Dijkstra, F. A. (2015). Dry-rewetting cycles regulate wheat carbon rhizodeposition, stabilization and nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, *81*, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.014>
- Cargnin, A., Alves de Souza, M. A. de, Rocha, V. S., Machado, J. C., & Piccini, E. (2006). Tolerância ao estresse térmico em genótipos de trigo. *Pesquisa*

Castillo, C. G., Borie, F., Oehl, F., & Sieverding, E. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi biodiversity: prospecting in Southern-Central zone of Chile. A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(2), 400–422. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000036>

Cheng, H. Q., Giri, B., Wu, Q. S., Zou, Y. N., & Kuča, K. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate drought stress in citrus by modulating root microenvironment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1–5. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1878497>

Chitarra, W., Maserti, B., Gambino, G., Guerrieri, E., & Balestrini, R. (2016). Arbuscular mycorrhizal symbiosis-mediated tomato tolerance to drought. *Plant Signaling & Behavior*, 11(7), e1197468 (3 pages). <https://doi.org/10.1080/15592324.2016.1197468>

Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. (2021). *Trigo: projeção de crescimento em todo o Brasil*. Retrieved from <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>

Condé, A. B. T., Coelho, M. A. de O., Yamanaka, C. H., & Corte, H. R. (2009). Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo sob cultivo de sequeiro em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 40(1), 45–52. <https://doi.org/10.5216/pat.v40i1.5618>

Deepika, S., & Kothamasi, D. (2014). Soil moisture—a regulator of arbuscular mycorrhizal fungal community assembly and symbiotic phosphorus uptake. *Mycorrhiza*, 25(1), 67–75. doi:10.1007/s00572-014-0596-1

Deveautour, C., Donn, S., Power, S. A., Bennett, A. E., & Powell, J. R. (2018). Experimentally altered rainfall regimes and host root traits affect grassland arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Molecular Ecology*, 27(8), 2152–2163. doi:10.1111/mec.14536

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). *Manual de Métodos de Análise de Solo* (2nd ed.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa-CNPS

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011). *Programa de Monitoramento de Irrigação no Cerrado*. Retrieved from <http://hidro.cpac.embrapa.br/>

Fernandes, R. A., Ferreira, D. A., Saggin-Junior, O. J., Stürmer, S. L., Paulino, H. B., Siqueira, J. O., & Carneiro, M. A. C. (2016). Occurrence and species richness of mycorrhizal fungi in soil under different land use. *Canadian Journal of Soil Science*,

96(3), 271–280. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0011>

Ferreira, D. A., Carneiro, M. A. C., & Saggin-Junior, O. J. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi in an oxisol under managements and uses in cerrado. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 36(1), 51–61. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100006>

Ferreira, D. F. (2010). Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042.

Franco, F. de A., & Evangelista, A. (2018). *Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2018 / XI Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale*. Londrina, PR: Embrapa Soja

Fuchslueger, L., Bahn, M., Hasibeder, R., Kienzl, S., Fritz, K., Schmitt, M., Watzka, M., & Richter, A. (2016). Drought history affects grassland plant and microbial carbon turnover during and after a subsequent drought event. *Journal of Ecology*, 104(5), 1453–1465. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12593>

Galazka, A., Gawryjolek, K., Gajda, A., Furtak, K., Ksiezniak, A., & Jończyk, K. (2018). Assessment of the glomalins content in the soil under winter wheat in different crop production systems. *Plant Soil Environment*, 64(1), 32–37. <https://doi.org/10.17221/726/2017-PSE>

Galindo, F. S., Ludkiewicz, M. G. Z., Bellote, J. L. M., Santini, J. M. K., Teixeira Filho, M. C. M., & Buzetti, S. (2015). Épocas de inoculação com *Azospirillum* brasilense via foliar afetando a produtividade da cultura do trigo irrigado. *Tecnologia e Ciência Agropecuária*, 9(2), 43–48.

Geng, S. M., Yan, D. H., Zhang, T. X., Weng, B. S., Zhang, Z. B., Qin, T. L. (2015). Effects of drought stress on agriculture soil. *Natural Hazards* 75:1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1409-8>

Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques to measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infections in roots. *New Phytologist*, 84(3), 489–500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>

Gomide, P. H. O., Santos, J. G. D., Siqueira, J. O., & Soares, C. R. F. S. (2009). Diversidade e Função de fungos micorrízicos arbusculares em sucessão de espécies hospedeiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(11) 1483–1490. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100016>

Hanks, R. J., Keller, J., Rasmussen, V. P., & Wilson, G. D. (1976). Line Source Sprinkler for Continuous Variable Irrigation-crop Production Studies. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 426–429. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1976.03615995004000030033X>

Hasibeder, R., Fuchslueger, L., Richter, A., & Bahn, M. (2015). Summer drought alters carbon allocation to roots and root respiration in mountain grassland. *New Phytologist*, 205(3), 1117–1127. <https://doi.org/10.1111/nph.13146>

Hossain, M. B. (2021). Glomalin and Contribution of Glomalin to Carbon Sequestration in Soil: A Review. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(1), 191–196. <https://doi.org/https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i1.191-196.3803>

Inmet - Instituto Nacional de Meteorologia. (2019). *Clima - Gráficos Climatológicos (1931-1960 e 1961-1990)*. Retrieved from <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosclimaticos>

Invam. (2021). *International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. Retrieved from <http://invam.wvu.edu/>

Janusz Blazkowski. (2019). *Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota), Endogone and Complexipes species deposited in the Department of Plant Pathology, University of Agriculture in Szczecin, Poland*. Retrieved from [http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species descriptions of AMF.html](http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species%20descriptions%20of%20AMF.html)

Jia, X., Zhao, Y., Liu, T., Huang, S., & Chang, Y. (2016). Elevated CO₂ increases glomalin-related soil protein (GRSP) in the rhizosphere of Robinia pseudoacacia L. seedlings in Pb- and Cd-contaminated soils. *Environmental Pollution*, 218, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.010>

Labuschagne, J., van Zyl, J., Agenbag, G. A., Crous, I. R., & Hoffman, J. E. (2020). Effect of once-off tillage on soil water, inorganic nitrogen and glomalin contents under conservation agriculture in the Swartland sub-region of the Western Cape. *South African Journal of Plant and Soil*, 37(4), 273–282. <https://doi.org/10.1080/02571862.2020.1750069>

Lehnert, H., Serfling, A., Enders, M., Friedt, W., & Ordon, F. (2017). Genetics of mycorrhizal symbiosis in winter wheat (*Triticum aestivum*). *New Phytologist*, 215(2), 779–791. <https://doi.org/10.1111/nph.14595>

Léon, D. G. de, Vahter, T., Zobel, M., Koppel, M., Edesi, L., Davison, J., Al-Quraishy, S., Hozzein, W. N., Moora, M., Oja, J., Vasar, M., & Opik, M. (2020). Different wheat cultivars exhibit variable responses to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi from organic and conventional farms. *PLoS ONE*, 15(5), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233878>

- Lombardo, L., Palese, A. M., Grasso, F., Duffy, D. H., Bati, C. B., & Xiloyannis, C. (2019). Mechanical tillage diversely affects glomalin content, water stable aggregates and AM fungal community in the soil profiles of two differently managed olive orchards. *Biomolecules*, *9*(10). <https://doi.org/10.3390/biom9100639>
- Mendes, I. C., Souza, L. M., Sousa, D. M. G., Lopes, A. A. C., Reis-Junior, F. B., Lacerda, M. P. C., & Malaquias, J. V. (2019). Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. *Applied Soil Ecology*, *139*(March), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>
- Nahar, K., Bovill, B., & McDonald, G. (2020). Mycorrhizal colonization in bread wheat varieties differing in their response to phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, *44*(1), 29–45. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793190>
- Nunes, H. B., Goto, B. T., Coimbra, J. L., Oliveira, J. S., Tavares, D. G., Rocha, M. S., Silva, F. L., & Soares, A. C. F. (2019). Is arbuscular mycorrhizal fungal species community affected by cotton growth management systems in the Brazilian cerrado? *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, *91*(4), 20180695. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180695>
- Nyamwange, M. M., Njeru, E. M., Mucheru-Muna, M., & Ngetich, F. (2018). Soil management practices affect arbuscular mycorrhizal fungi propagules, root colonization and growth of rainfed maize. *AIMS Agriculture and Food*, *3*(2), 120–134. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.2.120>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for cleaning roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assesment of infection. *Transactions of the British Mycological Society London*, *55*, 458–161.
- Pontes, J. S. de, Oehl, F., Pereira, C. D., de Toledo Machado, C. T., Coyne, D., da Silva, D. K. A., & Maia, L. C. (2017). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the Brazilian's Cerrado and in soybean under conservation and conventional tillage. *Applied Soil Ecology*, *117*, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.023>
- Rani, B., Madan, S., Pooja, Sharma, K. D., Kumari, N., & Kumar, A. (2018). Mitigating the effect of drought stress on yield in wheat (*Triticum aestivum*) using arbuscular mycorrhiza fungi (*Glomus mosseae*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *88*(12), 1903–1908.
- Schalamuk, S., & Cabello, M. (2010). Arbuscular mycorrhizal fungal propagules from tillage and no-tillage systems: Possible effects on Glomeromycota diversity. *Mycologia*, *102*(2), 261–268. <https://doi.org/10.3852/08-118>
- Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, *4*(3), 178–202. <https://doi.org/10.1002/FES3.64>

Silva, A. N., Ramos, M. L. G., Ribeiro Junior, W. Q., Alencar, E. R., Silva, P. C., Lima, C. A., Vinson, C. C., & Silva, M. A. V. (2020). Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. *Agricultural Water Management*, 231, 106023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106023>

Silva, A. M. M., Ramos, M. L. G., Nascimento, R. S. D. M. P., Silva, A. D. N., Silva, S. B., Cardoso, E. J. B. N., & Paula, A. M. (2019). Soil quality indicators under management systems in a Quilombola community in the Brazilian Cerrado. *Scientia Agricola*, 76(6), 518–526. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0008>

Silva, M., Soares Sobrinho, J., Albrecht, J. C., Chagas, H. J., Caierão, E., Moresco, É. R., Castro, R. L., Nascimento Junior, A., Eichelberger, L., Guarienti, E. M., Miranda, M. Z., Maciel, J. L. N., Santana, F. M., Ribeiro Júnior, W. Q., & Scheeren, P. L. (2015). BRS 404 - Nova cultivar de trigo de sequeiro para o Cerrado brasileiro. *Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale*, 8.; *Seminário Técnico do Trigo*, 9., 2014, Canela; *Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale*, 9.; *Seminário Técnico do Trigo*, 10. Passo Fundo: Biotrigo Genética: Embrapa Trigo

Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy* (11th ed.). Washington, DC, USA: USDA — Natural Resources Conservation Service.

Steinberg, P. D., & Rillig, M. C. (2003). Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(1), 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00249-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00249-3)

Tran, B. T. T., Watts-Williams, S. J., & Cavagnaro, T. R. (2019). Impact of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and nutrition of fifteen crop and pasture plant species. *Functional Plant Biology*, 46(8), 732–742. <https://doi.org/10.1071/FP18327>

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

Vlček, V., & Pohanka, M. (2020). Glomalin – an interesting protein part of the soil organic matter. *Soil and Water Research*, 15(2), 67–74. <https://doi.org/10.17221/29/2019-SWR>

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.

Wang, W., Zhong, Z., Wang, Q., Wang, H., Fu, Y., & He, X. (2017). Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles. *Scientific Reports*, 7(1), 1–13.

<https://doi.org/10.1038/s41598-017-12731-7>

Wilkes, T. I., Warner, D. J., Edmonds-Brown, V., Davies, K. G., & Denholm, I. (2021). Zero tillage systems conserve arbuscular mycorrhizal fungi, enhancing soil glomalin and water stable aggregates with implications for soil stability. *Soil Systems*, 5(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010004>

Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 61(9), 575–586. <https://doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>

Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., & Han, X. (2020). Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat. *Water*, 12(8), 2127. <https://doi.org/10.1037/1061-4087.45.2.10>

CAPITULO II – CONTRIBUIÇÃO DOS FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NA TOLERÂNCIA DO TRIGO AO ESTRESSE HÍDRICO

RESUMO

O déficit hídrico nas culturas é um dos principais estresses abióticos, responsável por grandes perdas econômicas significativas no mundo. Em contrapartida, diversos estudos vêm demonstrando benefícios dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na tolerância das plantas a estresse hídrico. Contudo, há uma carência de estudos que avaliem a relação entre a simbiose micorrízica e o estresse hídrico em graníferas cultivadas em sequeiro no Cerrado brasileiro. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar os benefícios da simbiose micorrízica, por meio de parâmetros biométricos, fisiológicos e nutricionais, sobre a expressão do potencial da cultivar de trigo BRS404 tolerante a seca, submetido a estresse hídrico e níveis de adubação fosfatada. O experimento foi conduzido sob condições controladas em casa de vegetação com delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2 x 2 x 4 com 3 repetições, sendo duas condições de irrigação (com e sem estresse hídrico); inoculação de FMA (presença e ausência) e quatro doses de adubação fosfatada (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ P₂O₅). O estresse hídrico promoveu o desenvolvimento de novos perfilhos das plantas e aumentou em 19% o crescimento das raízes, como resposta direta das plantas ao estresse. Já inoculação e FMA reduziu em 42% da produção de massa seca da raiz. Plantas micorrizadas tiveram maiores taxas fotossintéticas e maior eficiência instantânea do uso da água, tanto em tratamentos sem déficit hídrico como nos tratamentos submetidos a estresse hídrico. A condutância estomática e a transpiração das plantas foram maiores em plantas micorrizadas em condições de estresse hídrico. Plantas inoculadas apresentaram uma redução de 25% no extravasamento de eletrólitos. Plantas não inoculadas apresentaram maiores teores de nutrientes, exceto o fósforo (P). O acúmulo de P em plantas micorrizadas foi, em média, 89% maior que nas plantas não inoculadas. Os resultados obtidos indicaram que plantas micorrizadas pela comunidade nativa de FMA são mais tolerantes ao estresse hídrico e, a micorrização favorece uma rápida recuperação. Por outro lado, a comunidade de FMA presentes em área com histórico de cultivo de trigo, pode limitar a absorção e o acúmulo de nutrientes no tecido vegetal.

Palavras chave: *Triticum aestivum* L.; simbiose micorrízica; déficit hídrico; adubação fosfatada.

ABSTRACT

Crop water deficit is one of the main abiotic stresses, responsible for significant economic losses in the world. On the other hand, several studies have shown benefits of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in plant tolerance to water stress. However, there is a lack of studies that assess the relationship between mycorrhizal symbiosis and water stress in grains cultivated in rainfed areas in the Brazilian Cerrado. Thus, the aim of the present study was to evaluate the benefits of mycorrhizal symbiosis, through biometric, physiological and nutritional parameters, on the expression of the potential of the drought-tolerant wheat cultivar BRS404, subjected to water stress and levels of phosphorus fertilization. The experiment was carried out under controlled conditions in a greenhouse with a completely randomized design in a 2 x 2 x 4 factorial arrangement with 3 replications, with two irrigation conditions (with and without water stress); inoculation of AMF (presence and absence) and four doses of phosphate fertilization (0, 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ P₂O₅). Water stress promoted the development of new plant tillers and increased root growth by 19%, as a direct response of plants to stress. Inoculation and FMA reduced the dry mass production of the root by 42%. Mycorrhizal plants had higher photosynthetic rates and higher instantaneous water use efficiency, both in treatments without water deficit and in treatments submitted to water stress. Plant stomatal conductance and transpiration were higher in mycorrhizal plants under water stress conditions. Inoculated plants showed a 25% reduction in electrolyte leakage. Uninoculated plants had higher nutrient content, except for phosphorus (P). The accumulation of P in mycorrhizal plants was, on average, 89% higher than in non-inoculated plants. The results obtained indicated that plants mycorrhizal by the native AMF community are more tolerant to water stress, and mycorrhization favors a quick recovery. On the other hand, the AMF community present in an area with a history of wheat cultivation can limit the absorption and accumulation of nutrients in plant tissue.

Keywords: *Triticum aestivum* L.; mycorrhizal symbiosis; water deficit; phosphate fertilization.

1. INTRODUÇÃO

O trigo de sequeiro no cerrado brasileiro tem se tornado uma das principais culturas de safrinha na região e considerada uma das culturas de baixo investimento. Entretanto, é considerada também uma cultura de alto risco devido a doenças como a brusone e eventos climáticos extremos como a baixa disponibilidade hídrica por eventos climáticos durante o ciclo da cultura comprometendo a produção (Gava et al., 2018; Lopes et al., 2012; E. R. Silva et al., 2018), e em casos extremos, a produção pode ser totalmente perdida (Ely et al., 2003; Nelson et al., 2009).

Períodos de seca prolongados causam efeitos adversos em muitas características morfológicas e fisiológicas nas plantas, assim como a redução de absorção de nutrientes comprometendo o desenvolvimento e produtividade da cultura (Salehi et al., 2016).

Em contrapartida, a pesquisa, por programas de melhoramento de trigo, vem desenvolvendo cultivares tolerantes a períodos de déficit hídrico, abrindo fronteiras para o cultivo, uma vez que, a produção deste cereal é de grande importância para o abastecimento na região e, da mesma forma, aumentar a produção do país (Condé et al., 2009). No entanto, cultivares tolerantes ao calor e seca, dependendo da duração e a intensidade do estresse e da capacidade de adaptabilidade da planta, podem apresentar efeitos significativos ao estresse (Abid, Tian, Ata-Ul-Karim, Wang, et al., 2016).

É importante salientar que o sucesso de absorção de água pelas plantas, tolerantes, ou não ao estresse, se dá pelo bom desenvolvimento da raiz e por boas práticas no manejo do solo para o crescimento da raiz. Do mesmo modo, a simbiose micorrízica é uma estratégia amplamente reconhecida para aumentar a absorção de nutrientes e lidar com estresses abióticos como o estresse hídrico (Quiroga et al., 2017).

A micorriza arbuscular é a associação simbiótica entre fungos micorrízicos arbusculares e as raízes das plantas com as hifas dos fungos explorando um volume do solo além das raízes, melhorando a absorção de água e nutrientes (Berbara et al., 2006; MacLean et al., 2017). No trigo, essa simbiose apresenta benefícios contundentes, desde maior absorção de nutrientes pela planta (Ingraffia et al., 2020), até aumentos na produção dessa cultura (Zhu et al., 2017). Além dessas vantagens para a cultura do trigo, esta simbiose pode aumentar a tolerância da planta a fatores adversos como a salinidade, excesso de elementos fitotóxicos e falta de água (Bernardo et al., 2019; Ganugi et al., 2019).

Alguns estudos sobre FMA indicam a importância dessa simbiose para redução dos efeitos negativos provocados pela seca e relacionam esses fungos a uma função essencial na resposta a esse estresse (Calvo-Polanco et al., 2016; Pavithra & Yapa, 2018; Rapparini & Peñuelas, 2014) principalmente em relação a manutenção da captação de água, ajuste osmótico, aumento do nível de antioxidante (Dar et al., 2018; Ganugi et al., 2019; Symanczik et al., 2018).

Em eventos de estresse hídrico, plantas micorrizadas, pode absorver mais nutrientes (Bernardo et al., 2019; Gholinezhad & Darvishzadeh, 2019; Pavithra & Yapa, 2018) e mais água como resposta a uma boa nutrição, principalmente por fósforo (P) (He et al., 2019; C. Liu et al., 2018) em relação às plantas não micorrizadas.

Entretanto, é observado que níveis de P no solo influencia a eficiência da simbiose. Teores altos de P no solo inibe o processo de infecção. Isto, provavelmente pela diminuição da permeabilidade das membranas e exsudação das raízes de plantas mais nutridas em P, ou pela inibição do crescimento do fungo pela expressão de genes específicos da simbiose como resultado da alteração bioquímica das raízes (Kiriachek et al., 2009).

A maior tolerância de plantas micorrizadas ao estresse hídrico se deve a mecanismos morfológicos e fisiológicos ocorridos na simbiose, que se associam entre si, dentre eles, maior absorção de água pela maior exploração do solo das hifas externas e raízes mais desenvolvidas (Ruth et al., 2011; F. Zhang et al., 2018); melhor nutrição da planta (Wu & Zou, 2017); aumento do ajustamento osmótico (Wu et al., 2013; Yooyongwech et al., 2016; F. Zhang et al., 2018); aumento da capacidade oxidativa (Wu et al., 2013; Wu & Zou, 2009) e pela regulação de aquaporinas (Bárzana et al., 2014; J. M. Ruiz-Lozano & Aroca, 2017).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da simbiose micorrízica, através de parâmetros biométricos e fisiológicos, na expressão do potencial de trigo tolerante a seca, submetido a estresse hídrico e níveis de adubação fosfatada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Instalação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Fitopatologia, localizado na Estação Experimental da Biologia, da Universidade de Brasília, localizado nas seguintes coordenadas: latitude 15°44'05.8 Sul e longitude 47°52'59.4 Oeste. Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 2 x 4 com 3 repetições, totalizando 48 unidades experimentais, constituídas em vasos com capacidade de 3 litros. O primeiro fator avaliado foi a presença e ausência de FMA, o segundo fator compreendeu duas condições de irrigação: controle e estresse hídrico. O terceiro fator abrangeu quatro doses de adubação fosfatada.

A cultivar de trigo utilizado para este experimento foi a cultivar BRS404, de classe comercial tipo pão, material proveniente da Embrapa Cerrados. Esta cultivar é de ciclo curto e apresenta tolerância à seca, calor e ao alumínio tóxico dos solos, recomendada para os solos do Cerrado (GO, MG e no DF) e, também apresenta resistência moderada à doença mancha marrom, causado pelo fungo *Bipolaris sorokiniana*, e moderadamente susceptível a brusone e mancha amarela causado pelo fungo *Drechslera tritici-repentis*. Esta cultivar é produto do cruzamento da cultivar Aliança e a linhagem WT 99172 como resultado do programa de melhoramento de trigo no Brasil (M. S. e Silva et al., 2015).

O solo utilizado no experimento foi um solo Latossolo vermelho coletado em uma área sob pousio da Fazenda Água Limpa – UnB, no Distrito Federal. A coleta foi realizada na camada subsuperficial (20-40 cm de profundidade).

As doses de P consistiram em 0, 50, 100 e 150% da adubação recomendada para uma produtividade de 5 t ha⁻¹ (Sousa & Lobato, 2004), o que correspondeu a aplicação de: 0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, correspondentes a 0, 20, 40 e 60 mg dm⁻³ solo.

Previamente à adubação fosfatada, foi realizada a calagem, com a aplicação de 1,035 g dm⁻³ solo de calcário para corrigir a acidez do solo e elevar a saturação por bases a 50%, de acordo com a caracterização química do solo. Do mesmo modo, também foi realizada uma adubação corretiva de fósforo, com a aplicação de 100 mg kg⁻³ solo de P₂O₅, segundo as recomendações de adubação para essa cultura (Sousa & Lobato, 2004).

O solo foi autoclavado a 121°C durante duas horas e, posteriormente, foi feito a calagem e adubação corretiva. O solo então, foi incubado em vasos plásticos, os mesmos para condução do experimento, por um período de duas semanas, isto, com o objetivo de reagir com o calcário e a adubação corretiva. Neste período foi mantida a capacidade de campo para acelerar a reação química. A análise química de fertilidade do solo após a calagem e adubação corretiva apresenta-se na Tabela 4.

Tabela 4. Análise química de um Latossolo vermelho após a calagem e adubação corretiva e previa à adubação da cultura de trigo de sequeiro paro o Cerrado.

V%	pH	P Mehlich 1	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al ³⁺	CTC	MO
%		mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----						mg dm ⁻³
54,5	5,6	12,7	0,4	2,8	1,0	0,1	3,6	8,0	23,5
B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na	S	Argila	Areia	Silte
----- mg dm ⁻³ -----							----- g dm ⁻³ -----		
0,1	1,4	53,2	23,7	8,4	0,1	3,5	450	400	150

V%: Saturação por bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; MO: matéria orgânica.

A adubação de plantio de nitrogênio e potássio, de 10 e 12,5 mg kg⁻³ solo de N e K₂O, respectivamente e, 12,5 mg kg⁻³ solo de S, foi aplicada em todos os tratamentos para a mesma expectativa de rendimento. Ainda, a adubação nitrogenada foi complementada com 35 mg kg⁻³ solo na cobertura, 20 dias após a germinação, no início do perfilhamento. As fontes de adubo utilizadas foram sulfato de amônio – (NH₄)₂SO₄, ureia – CO(NH₂)₂, fosfato monoamônico (MAP) – (NH₄)₄H₂PO₄ e cloreto de potássio – KCl.

A colonização micorrízica foi induzida a partir de 50 ml de solo inóculo por vaso. O inóculo utilizado foi de um solo proveniente do campo agrícola da Embrapa Cerrados, no DF, cultivado com trigo em sucessão com graníferas contendo esporos fúngicos e raízes colonizadas por FMA, constituído por uma comunidade nativa com aproximadamente 700 esporos e uma riqueza de 12 espécies descritos por Méndez et al. (2021). A coleta do inóculo foi realizada ao final do ciclo da cultura do trigo. Os tratamentos não inoculados (NI), receberam o mesmo solo inóculo, porém, submetido a um processo de esterilização por meio do autoclavagem.

As condições de irrigação adotadas para o experimento foram: 1) controle – plantas não submetidas a estresse hídrico, 2) estresse hídrico, plantas submetidas a um período de déficit hídrico. O tratamento ‘estresse hídrico’ consistiu em submeter as

plantas a um período de 4 dias de restrição hídrica, no início da floração da cultura, aos 77 DAE (dias após o plantio).

O plantio do trigo foi realizado no dia 15 de fevereiro de 2019. A densidade de plantas foi de 350 plantas m⁻², 15 plantas por vaso, considerada adequada para um solo de boa fertilidade e sem Alumínio trocável para a região do DF (Franco & Evangelista, 2018). As sementes de trigo foram colocadas na superfície do solo inoculado (com solo inóculo ou com solo inóculo autoclavado) e coberto com uma camada de 3 cm de solo esterilizado, para evitar possíveis contaminações entre os vasos adjacentes. A fim de repor a comunidade microbiana dos tratamentos sem FMA, 30 mL de extrato obtido a partir de uma suspensão de 100g de solo inóculo em água e, filtrado em papel de filtro Whatman No. 41 (20 mm de poro) foi adicionado em todos os vasos.

Aos 20 dias após a emergência das plantas, no início do perfilhamento, foi feita a aplicação de fungicida a base de Tebuconazol correspondente a 0,75 L ha⁻¹ como controle preventivo da brusone, fungicida sem risco de comprometer a colonização micorrízica (Campos et al., 2015).

A irrigação do experimento foi realizada por meio da reposição da evapotranspiração do cultivo para manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo. Para isto, foi necessário monitorar os vasos continuamente e repor a água por pesagens dos vasos com ajuda de uma balança digital com capacidade de 10 kg, seguindo os princípios de funcionamento de um lisímetro. A reposição de água foi realizada a cada 2 dias.

As condições ambientais durante o experimento foram monitoradas com ajuda de um termohigrômetro instalado no local do experimento. Durante o período de indução ao déficit hídrico, houve uma elevação de temperatura e diminuição da umidade relativa do ar, o que resultou em maior efeito do estresse hídrico do experimento (Figura 5).

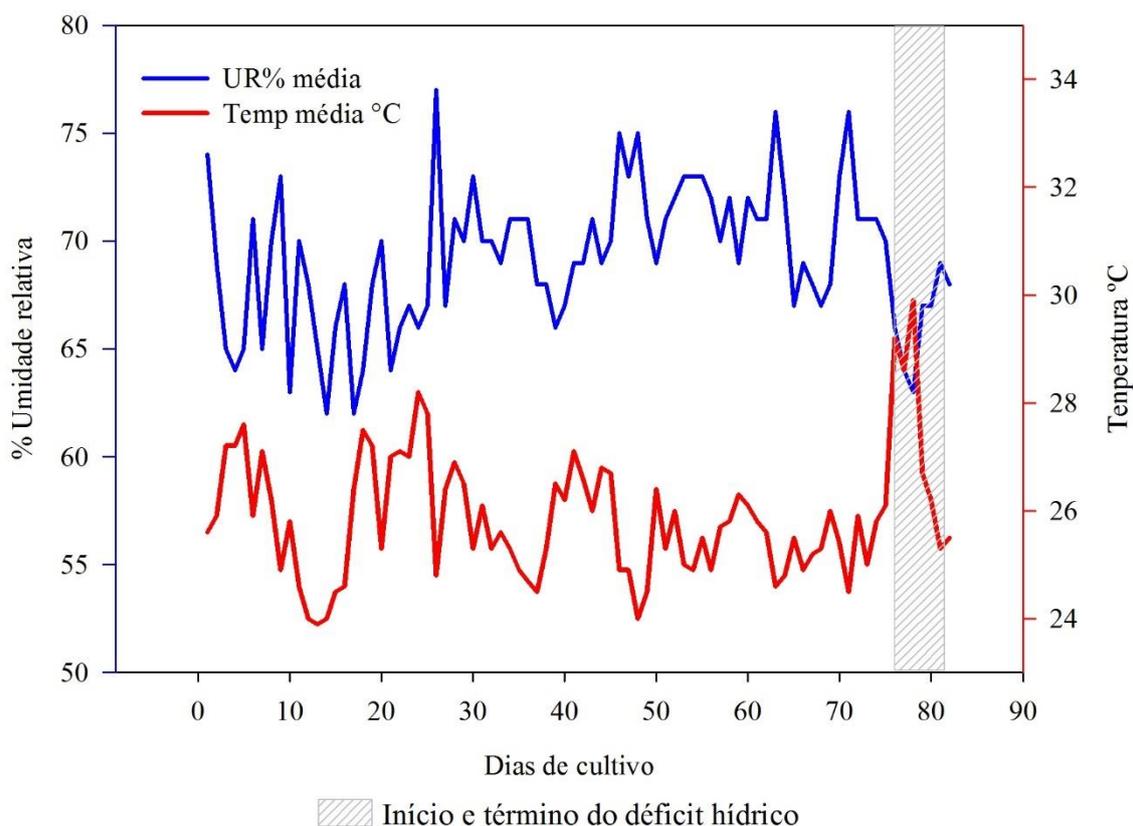


Figura 5. Medias da temperatura (°C) e Umidade relativa do ar (UR) durante a condução do experimento de trigo sob adubação fosfatada variável e estresse hídrico em casa de vegetação.

2.2. Avaliações fisiológicas, biométricas e micorrízicas

As avaliações fisiológicas da planta (taxa de assimilação de CO₂, carbono interno, condutância estomática e transpiração foliar) foram realizadas no final do estresse hídrico (81 DAP). Posterior à realização das avaliações fisiológicas, nas plantas submetidas a estresse hídrico, foi realizado a reposição da ET_c para recuperação das mesmas. Três dias após a reposição do ET_c, foram realizadas novamente as avaliações como resposta à recuperação das plantas ao estresse hídrico (84 DAP). Plantas controle foram avaliadas posterior às avaliações das plantas recuperadas.

A leitura das variáveis fisiológicas foi realizada na parte média da folha anterior à folha bandeira, no período da manhã das 8 horas às 11 horas, com o equipamento portátil de medição de trocas gasosas IRGA (Infra Red Gas Analyser) modelo LI-6400/XT, LI-

COR, Lincoln, USA. O equipamento foi calibrado usando luz artificial de 1500 μmol de fótons ativos $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, concentração de CO_2 de 400 ppm e taxa de fluxo de ar a 500 $\mu\text{mol} \text{s}^{-1}$. A intensidade de luz utilizada foi definida a partir de uma curva fotossintética rápida de resposta à luz, prévio ao início das avaliações. Após as leituras das trocas gasosas, foram retirados 5 discos de 6 mm da folha para avaliações de extravasamento de eletrólitos e teores relativos de água na folha. Do mesmo modo, também foram avaliados os índices de clorofila tipo Falker total com ajuda do medidor de clorofila portátil ClorofiLOG (CFL-1030, Falker) na folha bandeira da planta.

Os parâmetros biométricos (altura da planta, número de perfilhos, número de espigas, massa seca da parte aérea, massa seca da raiz e volume da raiz) foram avaliados após as medições fisiológicas, por serem análises destrutivas (84 DAP). Foram avaliadas todas as plantas do vaso. Após as medições, uma alíquota de raízes (5 g) foi retirada para avaliações da taxa de colonização micorrízica.

Para avaliação da taxa de colonização micorrízica, utilizou-se a metodologia proposta por Phillips & Hayman (1970), para a clarificação das raízes e de Giovannetti & Mosse (1980), para a determinação da porcentagem de raízes colonizadas.

As análises de macro e micronutrientes do tecido vegetal foi extraído a partir da massa seca da parte aérea da planta. Foi utilizado 500 mg de amostra moída, seguido da extração por digestão nitro perclórica HNO_3 : HCl (3: 1, v / v) e, os teores foram determinados por espectroscopia de plasma acoplado por indução (Modelo ICPE-9000, Shimadzu, Kyoto, Japão).

2.3. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro Wilk e, atestada a normalidade, foram submetidos a análise de variância, considerando o esquema fatorial com 3 fatores. Para a interação entre os três fatores, foi utilizada a opção de verificar o efeito da simbiose micorrízica, fixando os fatores déficit hídrico e doses de fósforo. Na constatação de efeito significativo de algum dos fatores pelo teste F, as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foi utilizado o software Sisvar 5.6 (D. F. Ferreira, 2010).

3. RESULTADOS

3.1. Avaliações de parâmetros biométricos

O estresse hídrico afetou diretamente a produção de biomassa das plantas, o volume da raiz e a formação de perfilhos. Plantas sob estresse hídrico reduziram a massa seca da parte aérea em 18%. Embora a massa seca da raiz não apresentou diferença significativa, o volume da raiz mostrou um maior crescimento nos tratamentos sob estresse hídrico. O volume da raiz foi 19% maior ($22,3 \text{ cm}^3 \text{ vaso}^{-1}$) em plantas submetidas ao estresse hídrico. A produção de perfilhos em plantas sob estresse hídrico foi de 1,3 perfilhos por planta, um aumento de 18% (Tabela 5).

No desdobramento dos fatores avaliados, o efeito do estresse hídrico em cada nível de inoculação com FMA a massa seca da parte aérea das plantas não diferiu entre as condições com e sem estresse hídrico. Já nos tratamentos sem inoculação, o efeito adverso do estresse hídrico foi de 25% em comparação com as plantas não submetidas ao estresse (Tabela 6).

Na avaliação do efeito da inoculação com FMA em cada nível de condição de estresse hídrico, não foi observada diferença estatística significativa na massa seca da parte aérea entre as plantas inoculadas e não inoculadas com FMA. Já na ausência de estresse hídrico, as plantas inoculadas apresentaram uma redução de cerca de 12% em comparação às plantas não inoculadas. A inoculação micorrízica reduziu em 42% a produção de massa seca da raiz. De igual forma, o volume da raiz também diminuiu em 18%.

Tabela 5. Médias dos parâmetros biométricos avaliados no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo.

Tratamentos	Perfilhos planta ⁻¹	MSA g vaso ⁻¹	MSR g vaso ⁻¹	Vol. raiz cm ³ vaso ⁻¹	Num. espigas vaso ⁻¹	Altura cm planta ⁻¹
Condição hídrica						
EH	1,3 a	13,6 b	4,1	22,3 a	-	56,6
Controle	1,1 b	16,6 a	3,8	18,7 b	-	56,4
Inoculação						
FMA	1,1 b	14,7	2,9 b	18,8 b	14,7	56,5
NI	1,3 a	15,5	5,0 a	22,9 a	15,3	56,5
Doses de P						
P0	1,1	15,1	4,0	20,8	15,2	55,6
P40	1,3	15,2	4,4	23,0	14,5	56,2
P80	1,2	15,0	4,1	21,0	15,1	56,1
P120	1,2	15,1	3,5	18,6	15,3	58,0

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Número de perfilhos por planta, massa seca da parte aérea (MSA), massa seca da raiz (MSR), volume da raiz (Vol. raiz), número de espigas e altura da planta. FMA: Com inoculação de fungos micorrízicos arbusculares; NI: Sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. P(0; 50; 100; 150)% da dose recomendada de P₂O₅. EH: estresse hídrico.

Tabela 6. Desdobramento da interação dos fatores inoculação x doses de fósforo e condição hídrica na avaliação de parâmetros biométricos no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo.

Tratamentos	Perfilhos		MSA (g)		MSR (g)		Vol. Raiz		Altura (cm)	
	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI
Interação Inoculação x Doses de P										
P0	1,1	1,2	14,6	15,6	2,8	5,2	18,2	23,4	52,7 Bb	58,6 Aa
P40	1,2	1,4	14,2	16,2	3,5	5,2	21,0	25,0	57,6 Aab	54,9 Aab
P80	1,1	1,2	14,7	15,4	3,0	5,3	18,3	23,8	58,9 Aa	53,3 Bb
P120	1,0	1,4	15,4	14,9	2,4	4,5	18,0	19,3	56,7 Aab	59,3 Aa
Interação Condição hídrica x Doses de P										
Tratamentos	EH	Controle	EH	Controle	EH	Controle	EH	Controle	EH	Controle
P0	1,2	1,1	13,1	17,1	3,8	4,2	21,8	19,8	55,1	56,1
P40	1,4	1,1	13,5	16,8	5,1	3,6	29,3	16,8	57,7	54,7
P80	1,2	1,1	14,5	15,5	4,6	3,7	23,1	19,0	55,4	56,8
P120	1,3	1,1	13,3	16,9	3,1	3,9	18,0	19,3	58,2	57,8
Interação Inoculação x Condição hídrica										
Tratamentos	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI
EH	1,2	1,4	13,9 Aa	13,3 Ab	2,6 Ba	5,7 Aa	19,0 Ba	27,1 Aa	56,1	57,1
Controle	1,0	1,2	15,5B a	17,7 Aa	3,3 Aa	4,4 Aa	18,7 Aa	18,7 Ab	56,8	55,9

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Número de perfilhos por planta, massa seca da parte aérea (MSA), massa seca da raiz (MSR), volume da raiz (Vol. raiz) e altura da planta. FMA: Com inoculação de fungos micorrízicos arbusculares; NI: Sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. P(0; 50; 100; 150)% da dose recomendada de P_2O_5 . EH: estresse hídrico.

3.2. Avaliações de parâmetros fisiológicos

Nas avaliações fisiológicas foram considerados apenas os fatores inoculação e adubação fosfatada. Isto, de forma independente para cada situação hídrica, a fim de interpretar os efeitos de acordo com cada condição a que a planta foi submetida (controle, estresse hídrico e recuperação).

Condição hídrica controle

Na condição hídrica controle, plantas não submetidas a estresse hídrico, a inoculação com FMA promoveu um aumento de 38% na taxa fotossintética da planta (A) com $18,02 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e um aumento de 60% na eficiência instantânea do uso da água (EUA) resultando em $2,47 [(\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}]$ (Figura 6). Por outro lado, a concentração interna de CO_2 (C_i), a transpiração foliar (E) e a condutância estomática (g_s) mostraram uma redução de 16, 24 e 40% nas plantas inoculadas, resultando em $452 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, $7,43 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,25 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. As variáveis extravasamento de eletrólitos (EE), índice de clorofila total, assim como o teor relativo de água na folha (TRA) não foram influenciadas pela inoculação micorrízica. Em média, os valores encontrados para o extravasamento de eletrólitos foram de 21%, o índice de clorofila total foi de 63 e o teor relativo de água na folha de 85%.

As doses de fósforo mostraram influência apenas na C_i e na E (Tabela 7). As maiores concentrações de C_i foram encontradas na menor e maior dose de P aplicada, $535,2$ e $533,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, na dose 0 kg ha^{-1} e na dose 120 kg ha^{-1} respectivamente, as menores concentrações ($415,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) foram encontradas na dose indicada para a cultura, 80 kg ha^{-1} . A E apresentou comportamento similar às concentrações de C_i , os maiores valores foram encontrados na dose 0 kg ha^{-1} com $10,12 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, já a dose 80 kg ha^{-1} apresentou uma redução de 34% ($6,63 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

O efeito da interação dos fatores, inoculação x doses de P, influenciou sobre o TRA. Plantas sem inoculação de FMA (NI) mostraram um decréscimo do TRA à medida que aumentou as doses de P. Por outro lado, plantas inoculadas com FMA mostraram um efeito contrário, sendo que o menor valor de TRA foi encontrado nas plantas com adubação P0 e foi maior em todos os tratamentos que receberam adubação fosfatada, P40, P80 e P120.

Condição estresse hídrico

Na avaliação conduzida durante o estresse hídrico, todas as variáveis foram influenciadas pela inoculação com FMA, exceto o TRA. Plantas inoculadas aumentaram em 386% a taxa de assimilação de CO₂ (0,86 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) em relação às plantas não inoculadas (0,17 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (Figura 6). Da mesma forma, a transpiração, a condutância estomática e a eficiência instantânea do uso da água (A/E) também mostraram maiores valores em plantas micorrizadas, resultando em aumentos de 110, 108 e 124% em relação às plantas não inoculadas, correspondendo a E 0,785 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, g_s 0,011 mol H₂O m⁻² s⁻¹ e a EUA 1,122 [(μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (mmol H₂O m⁻² s⁻¹)⁻¹], respectivamente.

Por outro lado, a concentração interna de CO₂ diminuiu 20% nas plantas inoculadas (471,8 μmol CO₂ mol⁻¹). O extravasamento de eletrólitos também mostrou uma redução de 25% nas plantas inoculadas, os valores observados foram de 43% nas plantas inoculadas e de 58% em plantas não inoculadas (Figura 6).

A adubação fosfatada influenciou a taxa de assimilação de CO₂, foi observado que a adubação P0 e P80 mantiveram similaridade entre si (Tabela 7). No entanto, plantas sob adubação P40 e P120 mostraram uma redução de 76 e 68% em relação aos tratamentos P0. A concentração interna de CO₂ foi maior nos tratamentos P40 (661,5 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). Do mesmo modo, a adubação P40 foi o tratamento que apresentou menores valores do UEA, 0,38 [(μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (mmol H₂O m⁻² s⁻¹)⁻¹], redução de 59% em relação à adubação P0.

Na interação dos fatores, inoculação x doses de P, plantas não inoculadas apresentaram similaridade na taxa de assimilação de CO₂ em todas as doses de P testadas, variando de 0,1 a 0,3 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹. Já nas plantas inoculadas, as doses P0 e P80 se destacaram por apresentarem maiores taxas fotossintéticas, com um aumento de 16 e 2,6 vezes, em relação às plantas não inoculadas. Desse modo, as concentrações de CO₂ foram maiores nas doses P40 e P120, 565 e 519 μmol CO₂ mol⁻¹, nas plantas inoculadas.

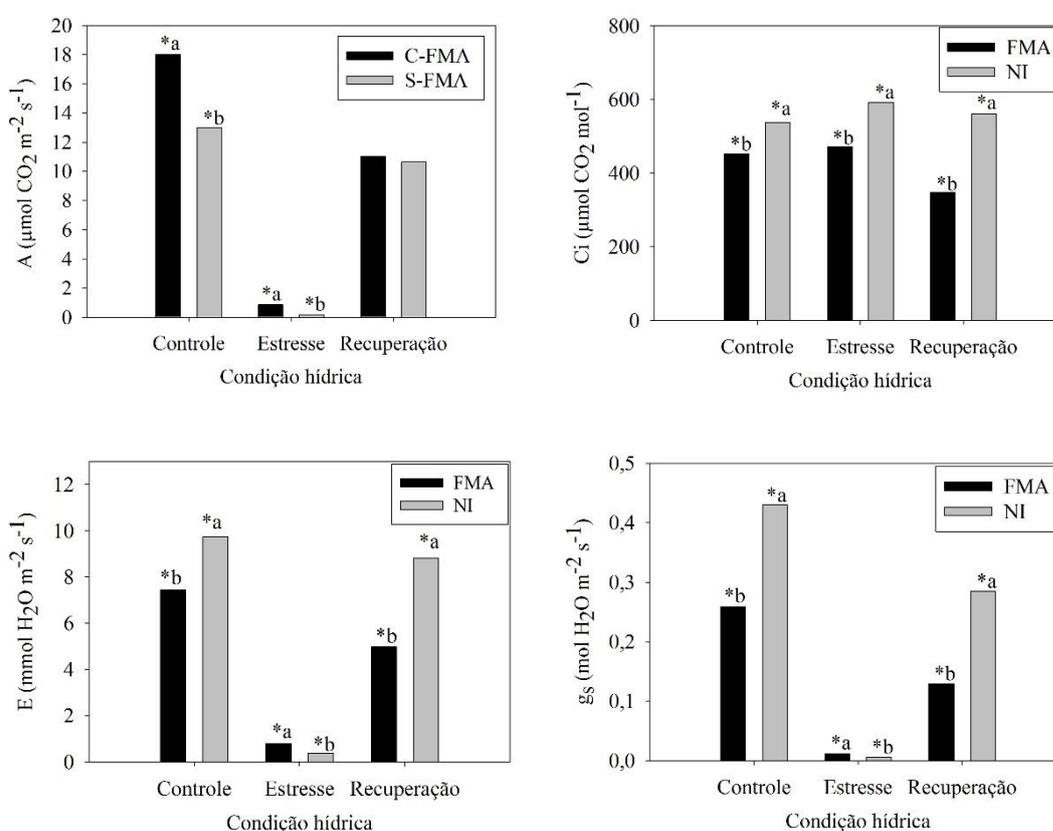
Devido ao efeito da inoculação micorrízica sobre a taxa fotossintética, plantas sob dose P0 e P80, também apresentaram uma maior eficiência instantânea do uso da água, 1,5 e 1,7 [(μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (mmol H₂O m⁻² s⁻¹)⁻¹], respectivamente (Tabela 8).

Condição recuperação hídrica

A taxa de assimilação de CO₂ não foi influenciada estatisticamente (Tukey, $p \leq 0,05$) pela inoculação com FMA. Embora, a concentração interna de CO₂ em plantas inoculadas foi reduzida em 38% ($347 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) em relação às plantas não inoculadas, seguindo o mesmo comportamento que nas situações hídricas anteriores. A condutância estomática em plantas inoculadas, embora tenha aumentado durante o estresse hídrico, na recuperação hídrica manteve o mesmo comportamento observado na situação hídrica controle, tendo uma redução de 55% ($0,128 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em relação às plantas não inoculadas ($0,284 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

A eficiência instantânea do uso da água foi duas vezes maior em plantas micorrizadas em relação às plantas não inoculadas, sendo de 2,36 e 1,18 para os tratamentos FMA e NI, respectivamente (Figura 6).

As doses de P apenas influenciaram o teor relativo de água na folha, à medida que as doses aumentaram, o TRA diminuiu em até 12% na dose P120. Doses de P na interação com a inoculação micorrízica não promoveram diferenças significativas (Tabela 8).



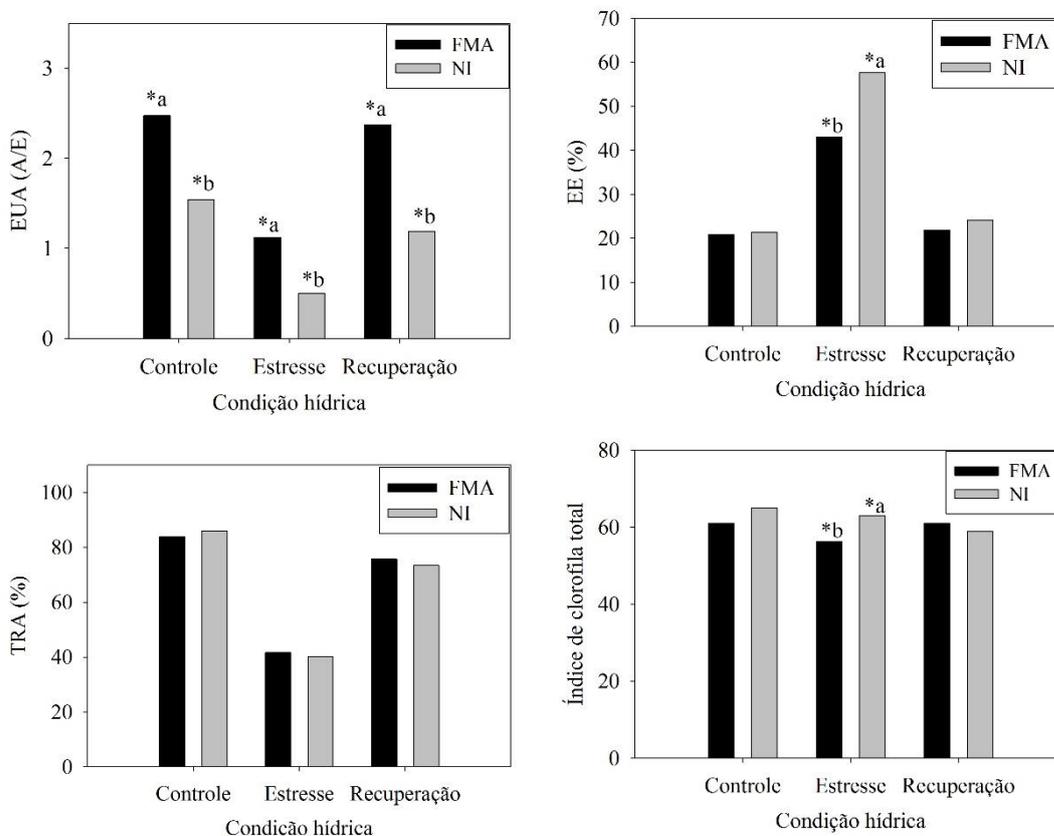


Figura 6. Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), concentração de carbono interno (Ci), transpiração foliar (E), condutância estomática (gs), extravasamento de eletrólitos (EE), eficiência instantânea do uso da água (EUA), índice de clorofila total e teor relativo de água na folha (TRA) no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo.

Observou-se que as plantas inoculadas com FMA apresentaram menor extravasamento de eletrólitos, ou seja, maior resistência a condição de estresse hídrico, enquanto plantas não inoculadas apresentaram maior transpiração e condutância estomática. De igual forma, observou-se que as mesmas plantas foram mais eficientes no uso instantâneo da água, com destaque nos tratamentos da recuperação hídrica, pois a eficiência aumentou em 100%.

Tabela 7. Médias dos parâmetros fisiológicos avaliados no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo para cada condição hídrica.

Tratamentos	Parâmetros fisiológicos avaliados													
	A	Ci	E	g _s	EE	EUA	Clo-Total	TRA						
Controle	P0	14,97	535,2	a	10,12	a	0,42	23,05	1,66		63,04		84,30	
	P40	14,89	495,3	ab	8,02	ab	0,32	20,90	2,03		61,22		86,72	
	P80	15,12	415,4	b	6,63	b	0,27	20,27	2,43		65,63		86,40	
	P120	17,13	533,5	a	9,57	ab	0,37	20,13	1,92		61,99		82,57	
Estresse	P0	0,88	a	490,6	b	0,70	0,01	45,22	0,92	a	60,25	ab	44,97	
	P40	0,21	b	661,5	a	0,72	0,01	61,13	0,38	b	63,73	a	43,12	
	P80	0,70	a	474,1	b	0,56	0,01	47,94	1,14	a	59,26	ab	37,61	
	P120	0,28	b	501,1	b	0,35	0,01	46,95	0,82	ab	55,07	b	38,08	
Recuperação	P0	11,35		420,8		6,95	0,22	21,49	1,81		52,72	b	80,96	a
	P40	10,62		483,6		6,53	0,19	24,20	1,60		63,10	a	74,53	ab
	P80	10,55		433,8		6,48	0,17	23,27	1,92		64,19	a	71,31	ab
	P120	10,80		480,1		7,63	0,24	22,94	1,78		59,54	ab	71,23	b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), concentração de carbono interno (Ci), transpiração foliar (E), condutância estomática (g_s), extravasamento de eletrólitos (EE), eficiência instantânea do uso da água (EUA), índice de clorofila total (Clo-Total) e teor relativo de água na folha (TRA).

Tabela 8. Desdobramento da interação dos fatores micorriza x doses de fósforo em cada condição hídrica na avaliação de parâmetros fisiológicos no cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo.

Tratamentos	A		Ci		E		g _s		EE		EUA		Clo-Total		TRA		
	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	
Controle	P0	18,0	11,9	452	619	8,0	12,3	0,27	0,56	22,7	23,4	2,3	1,0	61	65	75 Bb	94 Aa
	P40	16,5	13,3	427	564	6,1	10,0	0,19	0,44	21,2	20,6	2,7	1,4	60	63	84 Aab	89 Aab
	P80	17,9	12,3	423	407	7,6	5,7	0,27	0,27	20,2	20,4	2,4	2,5	60	72	88 Aa	84 Aab
	P120	19,8	14,5	507	560	8,1	11,0	0,30	0,45	19,3	20,9	2,5	1,3	64	60	88 Aa	77 Bb
Estresse	P0	1,7 Aa	0,1 Ba	422 Bbc	559 Ab	1,1	0,3	0,02	0,00	38,1	52,4	1,5 Aa	0,3 Bab	58 Aa	63 Aab	45	45
	P40	0,3 Ab	0,1 Aa	565 Ba	758 Aa	1,0	0,4	0,01	0,01	41,0	81,2	0,5 Ab	0,2 Ab	61 Aa	67 Aa	44	43
	P80	1,1 Aa	0,3 Ba	381 Bc	567 Ab	0,7	0,5	0,01	0,01	46,5	49,4	1,7 Aa	0,6 Bab	51 Ba	67 Aa	37	38
	P120	0,3 Ab	0,3 Aa	519 Aab	483 Ab	0,4	0,3	0,01	0,00	46,4	47,5	0,7 Ab	0,9 Aa	55 Aa	55 Ab	41	35
Recuperação	P0	11,9	10,8	340	502	5,2	8,7	0,13	0,32	18,5	24,5	2,4	1,2	56	49	82	80
	P40	13,4	7,8	386	581	6,7	6,3	0,20	0,19	24,7	23,7	2,0	1,2	60	66	72	77
	P80	9,6	11,5	314	554	3,8	9,1	0,09	0,26	24,6	21,9	2,6	1,2	65	64	72	70
	P120	9,3	12,3	349	611	4,2	11,1	0,10	0,38	19,7	26,2	2,4	1,1	63	56	77	66

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), concentração de carbono interno (Ci), transpiração foliar (E), condutância estomática (g_s), extravasamento de eletrólitos (EE), eficiência instantânea do uso da água (EUA), índice de clorofila total (Clo-Total) e teor relativo de água na folha (TRA).

3.3. Avaliações micorrízicas

Para estas avaliações foram considerados apenas os tratamentos sob inoculação (FMA). Foi utilizado unicamente o fator P como fonte de variação, uma vez que a condição hídrica não promoveu alteração na taxa de colonização e esporulação de FMA devido ao tempo curto entre o estresse hídrico até a recuperação e coleta das variáveis (cinco dias).

A colonização micorrízica não foi influenciada pelas doses de P testadas. As médias para a colonização micorrízica foram de 64, 69, 70 e 72% para as doses de 0, 40, 80 e 120 P_2O_5 $kg\ ha^{-1}$, respectivamente.

Por outro lado, as doses P40, P80 e P120 estimularam a formação de esporos de FMA em 365, 121 e 282% em relação à dose P0 (Figura 7).

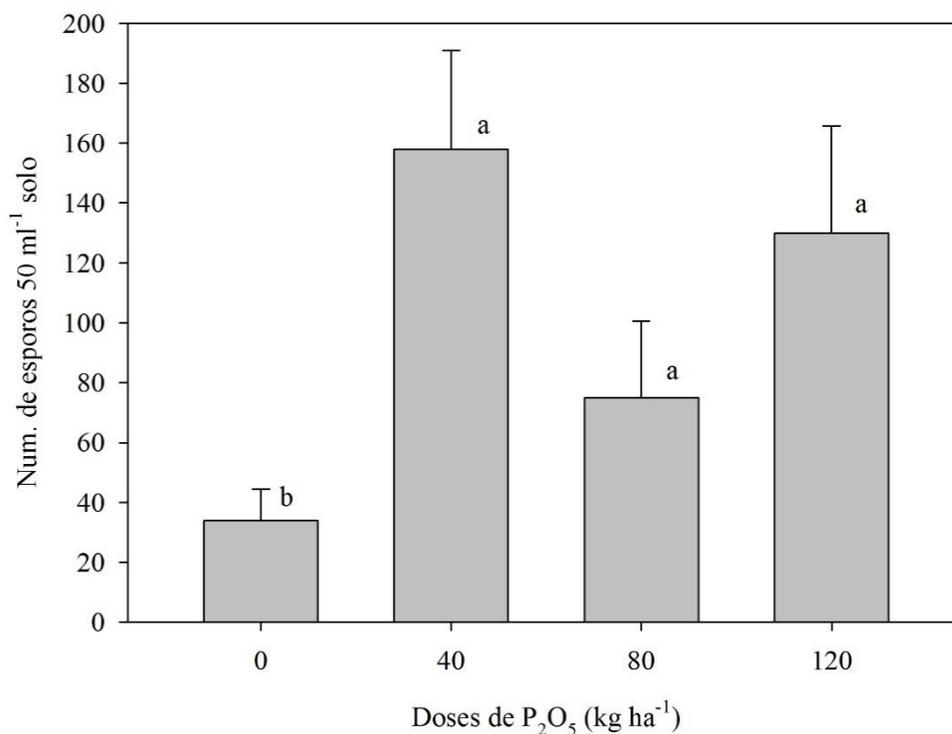


Figura 7. Número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) recuperados em 50 ml de solo sob cultivo de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob inoculação de FMA e doses de fósforo.

3.4. Teores de macro e micronutrientes do tecido vegetal

De modo geral, os teores de nutrientes no tecido vegetal foram influenciados principalmente pela inoculação micorrízica. Plantas micorrizadas tiveram uma redução de 12, 26, 38, 10, 13, 16, 9 e 18% nos teores de nutrientes de B, Fe, Mn, Mo, Zn, Ca, Mg e S em relação às plantas não inoculadas.

Por outro lado, os teores de P em plantas micorrizadas acumularam 2094 mg kg⁻¹ MS, em relação a 1107 mg kg⁻¹ MS das plantas não inoculadas, resultando num aumento de 89% (Tabela 9).

A condição hídrica teve efeito direto apenas no acúmulo de Zn e S, onde os maiores teores foram encontrados nos tratamentos que receberam estresse hídrico (38,7 e 2643 mg kg⁻¹ MS), tendo um aumento de 7% e 4% para Zn e S, respectivamente (Tabela 9). Esse aumento se deve à interação entre a inoculação de FMA e a condição hídrica, uma vez que houve, maior acúmulo desses nutrientes em plantas não micorrizadas quando submetidas ao déficit hídrico, em média, as plantas sem micorrização, sob déficit hídrico, acumularam 42,2 e 2968 mg kg⁻¹ MS de Zn e S, respectivamente (Tabela 10 e Tabela 11).

Os teores de K, em plantas micorrizadas, apresentaram um aumento de 9% em relação a plantas não micorrizadas na condição hídrica controle. Plantas não inoculadas, aumentaram os teores de K em 10% em relação quando submetidas a estresse hídrico e posterior recuperação hídrica.

Os teores de P, em plantas micorrizadas, apresentaram maiores valores em ambas as condições hídricas em 110% na condição controle e 72% na condição estresse hídrico. Plantas não micorrizadas mostraram um aumento de 19% quando submetidas a estresse hídrico.

Tabela 9. Teores de macro e micronutrientes no tecido vegetal de trigo, cultivar BRS404, submetido a estresse hídrico sob efeito de doses de fósforo e níveis de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares.

	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Ca	K	Mg	P	S
FMA	10.0 b	3.0	601 b	160 b	6.2 b	34.8 b	4303 b	13479	3427 b	2094 a	2333 b
NI	11.3 a	2.3	815 a	257 a	6.9 a	40.0 a	5096 a	13179	3746 a	1107 b	2849 a
P0	10.0	2.8	699	199	6.6	37.8	4509	13975	3420	1497	2528
P40	10.9	2.7	765	215	6.5	36.5	4896	13167	3674	1580	2586
P80	10.4	2.6	582	204	6.4	36.8	4458	12975	3637	1699	2579
P120	11.2	2.4	786	217	6.8	38.5	4935	13192	3615	1627	2671
EH	10.6	2.8	741	203	6.4	38.7 a	4805	13529	3560	1634	2643 a
Controle	10.7	2.4	675	214	6.7	36.2 b	4594	13125	3614	1567	2538 b
Média	10.6	2.6	708	208	6.6	37	4699	13327	3587	1601	2591
cv (%)	12.8	91.7	33.8	11.7	16.6	9.1	10.4	9.0	7.2	12.1	6.4

B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Mo: Molibdênio; Zn: Zinco; Ca: Cálcio; K: Potássio; Mg: Magnésio; P: Fósforo; S: Enxofre. FMA: Com inoculação de fungos micorrízicos arbusculares; NI: Sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. P(0; 50; 100; 150)% da dose recomendada de P₂O₅. EH: Estresse hídrico. Letras iguais minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Tabela 10. Desdobramento da interação dos fatores micorriza x doses de fósforo x níveis de irrigação nos teores de micronutrientes (mg kg⁻¹ MS) no tecido vegetal de trigo cultivar BRS404 submetido a estresse hídrico sob o efeito de micorrização e níveis de adubação fosfatada.

	B		Cu		Fe		Mn		Mo		Zn	
	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI
P0	9.9 Aa	10.1 Ab	3.4	2.1	665.2	732.0	148.3	248.7	6.4	6.8	35.0	40.5
P40	9.9 Ba	11.9 Aab	3.2	2.2	579.8	951.0	156.7	273.0	5.9	7.1	34.8	38.2
P80	10.5 Aa	10.4 Ab	2.6	2.7	575.3	588.8	161.2	246.2	6.0	6.7	33.4	40.3
P120	9.8 Ba	12.7 Aa	2.8	2.1	585.0	986.2	173.5	259.8	6.5	7.2	36.0	41.1
EH	10.3	10.9	3.1	2.6	727.9 Aa	753.5 Aa	159.9	246.4	6.2	6.6	35.1 Ba	42.2 Aa
Controle	9.8	11.6	2.9	1.9	474.8 Bb	875.5 Aa	159.9	267.4	6.2	7.3	34.6 Ba	37.8 Ab
Média	10.6		2.6		707.9		208.4		6.6		37.4	
cv (%)	12.8		91.7		33.8		11.7		16.6		9.1	

B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Mo: Molibdênio; Zn: Zinco. FMA: Com inoculação de fungos micorrízicos arbusculares; NI: Sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. EH: Estresse hídrico. Letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Tabela 11. Desdobramento da interação dos fatores micorriza x doses de fósforo x níveis de irrigação nos teores de macronutrientes (mg kg⁻¹ MS) no tecido vegetal de trigo cultivar BRS404 submetido a estresse hídrico sob o efeito de micorrização e níveis de adubação fosfatada.

	Ca		K		Mg		P		S									
	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI	FMA	NI								
P0	4468	Aa	4550	Ab	14017	13933	3353	3487	1963	1030	2362	2693						
P40	4033	Ba	5758	Aa	13433	12900	3378	3970	2087	1073	2352	2820						
P80	4283	Aa	4633	Ab	13283	12667	3467	3808	2245	1153	2300	2858						
P120	4428	Ba	5443	Aa	13183	13200	3510	3720	2082	1172	2317	3025						
EH	4318		5293		13250	Aa	13808	Aa	3364	3755	2067	Aa	1202	Ba	2319	Ba	2968	Aa
Controle	4288		4900		13708	Aa	12542	Bb	3490	3738	2122	Aa	1012	Bb	2346	Ba	2731	Ab
Média		4699.4			13327.1				3586.7				1600.6					2590.8
cv (%)		10.4			9.0				7.2				12.1					6.4

Ca: Cálcio; K: Potássio; Mg: Magnésio; P: Fósforo; S: Enxofre. FMA: Com inoculação de fungos micorrízicos arbusculares; NI: Sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. EH: Estresse hídrico. Letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4. DISCUSSÃO

Avaliações biométricas

O estresse hídrico afeta diretamente o desenvolvimento das plantas. Um efeito direto e notável é a diminuição da produção biomassa. Por outro lado, plantas sob o efeito do estresse hídrico manifestam alterações fisiológicas e morfológicas com a finalidade de desenvolver mecanismos para se adaptarem e se recuperarem dessas condições hídricas limitadas (Rani et al., 2018).

Neste estudo, a produção de massa seca da parte aérea foi afetada negativamente pelo estresse hídrico, enquanto o volume da raiz teve um aumento. Esse aumento do crescimento da raiz é uma forma da planta à resposta ao estresse hídrico para maior exploração do solo em busca de água (Fang et al., 2017).

Por outro lado, avaliando o efeito da inoculação micorrízica, plantas inoculadas apresentaram menor produção da raiz tanto na produção da massa seca como no volume. Geralmente, plantas micorrizadas apresentam menor quantidade de raízes comparadas com plantas não micorrizadas. Essa menor produção de raízes em plantas micorrizadas já pé relatada em diversos estudos e é compensada pela extensão do micélio dos fungos micorrízicos arbusculares, suprindo à planta de efeitos negativos pelo estresse hídrico (Bahadur et al., 2019).

Maior produção de massa seca da parte aérea em plantas não inoculadas, no tratamento controle, pode ser explicado ao efeito do estresse sobre a fisiologia da planta, uma vez que plantas sob estresse hídrico não conseguem produzir fotoassimilados suficientes para a manutenção e crescimento (Scalon et al., 2011), este efeito já é descrito em outros trabalhos envolvendo estresse hídrico em trigo (Khayatnejad et al. 2010, Ahmadizadeh et al. 2011). Já nas plantas inoculadas, no tratamento controle, pode indicar queos FMA associados às plantas possivelmente atuaram como um dreno de fotoassimilados, reduzindo o crescimento da planta comparado com plantas não inoculadas. No geral, de 4 a 20% do carbono assimilado pelas plantas, na forma de fotoassimilados, são destinados à simbiose micorrízica (Thirkell et al., 2020), mesmos que poderiam ser destinados à formação de tecidos das plantas.

Avaliações fisiológicas

De modo geral, observou-se que as plantas inoculadas com FMA apresentaram maiores taxas fotossintéticas, independente da condição hídrica. Possivelmente, plantas associadas aos FMA necessitam incorporar mais C em seus tecidos, como forma de sintetizar os fotoassimilados que serão em parte destinados à simbiose micorrízica, em troca de água e nutrientes, especialmente o fósforo. No geral, de 4 a 20% do carbono assimilado pelas plantas, na forma de fotoassimilados, são destinados à simbiose micorrízica, garantindo assim que as plantas possam manter seu metabolismo ativo e em contrapartida garantindo a colonização micorrízica (Thirkell et al., 2020).

Interessantemente, observou-se que na condição hídrica de recuperação do estresse, as plantas não inoculadas com FMA possuem maior C nas folhas, o que pode estar relacionado ao não dreno de fotoassimilados para os FMA. Sabe-se que sob condições de estresse hídrico, a simbiose micorrízica promove melhoria da condutividade hidráulica da raiz, regulação da atividade estomatal e taxa de transpiração, ajuste do potencial osmótico, no qual melhora a manutenção do turgor mesmo em baixos níveis de potencial de água, incrementam a taxa fotossintética e aumentam o acúmulo de prolina e carboidratos (Bernardo et al., 2019; Aletaha; Sinigani, 2020; Abdi et al., 2021).

Do mesmo modo, as melhores condições fisiológicas em plantas micorrizadas relaciona-se ao aumento da aquisição de P, uma vez que o P é indispensável na intermediação de fosforilados no processo da fotossíntese no processo do metabolismo dos carboidratos (Borie et al 2019)

Zhang et al. (2018), também observaram que as plantas micorrizadas com adição de fósforo melhora a fisiologia das plantas numa situação de déficit hídrico. Segundo os autores, esses benefícios são o resultado do crescimento das hifas dos FMA e sendo uma extensão radicular das plantas. Com isto, há um aumento de captação de água, garantindo uma melhor regulação dos estômatos e assimilação do carbono.

Avaliações micorrízicas

A disponibilidade de P no solo, em geral, é relatada por reduzir a colonização micorrízica nas raízes na maioria das espécies de plantas (Balzergue et al. 2011), no entanto, a disponibilidade de P no solo não necessariamente suprime ou controla a atividade micorrízica (Smith et al. 2011), de modo que a colonização pode ser representada pelo equilíbrio entre a taxa de crescimento da raiz e infecção radicular.

Em solos agrícolas, teores elevados de P tendem a diminuir a esporulação dos FMA. Diversos estudos mostram correlação negativa entre a disponibilidade de P no solo e a multiplicação do propágulo micorrízico no solo (Khakpour & Khar, 2012). Entretanto, a capacidade de esporulação de fungos micorrízicos, em algumas culturas, pode estar atribuída aos exsudados das raízes (Alori et al., 2020).

Teores de macro e micronutrientes do tecido vegetal

Curiosamente, os resultados deste trabalho indicam efeito contrário em relação a nutrição das plantas micorrizadas, pois plantas inoculadas apresentaram menor absorção e acúmulo de nutriente, exceto para o fósforo, sendo que os fungos micorrízicos arbusculares melhoram a nutrição das plantas (Smith & Read, 2008; Wu & Zou, 2017). Desse modo, existem duas possibilidades para explicação dos resultados deste estudo.

O primeiro é o desenvolvimento das raízes das plantas. Em plantas micorrizadas observou-se uma redução de 42% da massa seca da raiz (MSR) e 18% do volume da raiz. Dessa forma, a exploração das raízes no solo, por conta própria, foi menor em relação às plantas não inoculadas. Plantas micorrizadas, produzem menor massa seca da raiz e é compensada pela extensão do micélio desses fungos, principalmente a absorção de P (MacLean et al., 2017; Smith & Read, 2008). Do mesmo modo, de acordo como os resultados dos teores de P, onde plantas micorrizadas aumentaram em 89% a absorção de P, assim, os fungos micorrízicos arbusculares favoreceram prioritariamente na absorção de P nas plantas em relação aos outros nutrientes.

A segunda possível explicação é o fato dos fungos micorrízicos arbusculares terem atuado de uma forma competitiva durante a infecção. Cabe destacar que foi utilizado a comunidade nativa de um solo agrícola contendo 12 espécies de FMA. Assim, há possibilidade de existir espécies de FMA que são pouco eficientes na absorção de nutriente e inclusive atuem de forma parasitária para a planta. Diversos estudos mostram que altas taxas de colonização micorrízica não é sinônimo de maiores benefícios para as plantas. Altos teores de nutrientes no solo disponíveis para a planta, torna essa simbiose desnecessária em termos de nutrição, inclusive pode causar um efeito parasitário nas plantas (Ortas & Bykova, 2018).

Em relação aos teores de fósforo, este estudo corroborou os resultados de diversos estudos envolvendo inoculação micorrízica e doses de P, onde a principal função dos FMA é a translocação de P (Bhantana et al., 2021), contribuindo para uma melhor

nutrição nas plantas, principalmente naquelas em condição de seca. O efeito positivo dessa associação também foi observado em outro estudo (Rani et al., 2017) onde a inoculação com FMA nas plantas de trigo resultou em maiores teores de P devido à liberação de mais P devido ao aumento da fosfatase ácida mediada pela simbiose micorrízica, aliviando parcialmente a planta do estresse hídrico.

O aumento nos teores de Zn nas plantas de trigo submetidas à escassez de água pode fornecer informações importantes no que tange a tolerância do trigo à seca, pois sabe-se que esse nutriente pode atenuar os efeitos causados pelo estresse hídrico (Faran et al., 2019; Ma et al., 2017). O Zn pode aliviar o estresse oxidativo do trigo através da regulação transcricional das vias de defesa, e o metabolismo secundário de flavonóides (Ma et al., 2017), além de interagir com hormônios vegetais, aumentar a expressão das proteínas do estresse e estimular as enzimas antioxidantes (Hassan et al., 2020) e assim aliviar a planta dos efeitos da seca.

Os FMA têm um papel importante no comportamento de Zn no solo, abaixo de uma concentração crítica de Zn, a absorção desse nutriente aumenta com a simbiose; e acima do nível crítico, a translocação de Zn para as plantas se torna restrita (Bhantana et al., 2021).

5. CONCLUSÕES

A associação micorrízica em plantas de trigo da cultivar BRS404, promovida pela inoculação de espécies nativas fungos micorrízicos arbusculares de um solo agrícola, melhorou a condição fisiológica da cultura frente ao estresse hídrico induzido.

A colonização micorrízica da comunidade de espécies nativas de fungos micorrízicos arbusculares utilizados neste experimento promoveram uma redução do crescimento das plantas de trigo BRS404, principalmente do sistema radicular.

A associação micorrízica promovida pela comunidade de espécies nativas de fungos micorrízicos arbusculares promoveram maior absorção de fósforo na cultura de trigo BRS404, entretanto, a absorção e acúmulo de outros macro e micronutrientes no tecido vegetal foram afetados negativamente pela micorrização, provavelmente pela menor exploração do solo pelas raízes por conta própria.

6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abdelkader, A., & Elshorbagy, A. (2021). ACPAR: A framework for linking national water and food security management with global conditions. *Advances in Water Resources*, 147, 103809. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2020.103809>

Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Cui, Y., Liu, Y., Zahoor, R., Jiang, D., & Dai, T. (2016). Nitrogen Nutrition Improves the Potential of Wheat (*Triticum aestivum* L.) to Alleviate the Effects of Drought Stress during Vegetative Growth Periods. *Frontiers in Plant Science*, 7, 981. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00981>

Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Wang, F., Liu, Y., Zahoor, R., Jiang, D., & Dai, T. (2016). Adaptation to and recovery from drought stress at vegetative stages in wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. *Functional Plant Biology*, 43(12), 1159. <https://doi.org/10.1071/FP16150>

Abramovay, R. (2010). Alimentos versus população: está ressurgindo o fantasma malthusiano? *Ciência e Cultura*, 62(4), 38–43. http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S0009-67252010000400013&script=sci_arttext&tlng=pt

Adam, J. C., Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2009). Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrological Processes*, 23(7), 962–972. <https://doi.org/10.1002/hyp.7201>

Al-Karaki, G., McMichael, B., & Zak, J. (2004). Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14(4), 263–269. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0265-2>

Ali, B. (2015). Bacterial auxin signaling: comparative study of growth induction in *Arabidopsis thaliana* and *Triticum aestivum*. *Turkish Journal of Botany*, 39, 1–9. <https://doi.org/10.3906/bot-1401-31>

Ali, M. B., & El-Sadek, A. N. (2016). Evaluation of drought tolerance indices for wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigated and rainfed conditions. *Communications in Biometry and Crop Science*, 11(1), 77–89. http://agrobiol.sggw.waw.pl/~cbcs/articles/CBCS_11_1_6.pdf

Allahverdiyev, T. I., Talai, J. M., Huseynova, I. M., & Aliyev, J. A. (2015). Effect of drought stress on some physiological parameters, yield, yield components of durum (*Triticum durum* desf.) and bread (*Triticum aestivum* L.) wheat genotypes. *Journal of Crop Breeding and Genetics*, 1(1), 50–62. www.ekinjournal.com

Alori, E. T., Fawole, O. B., & Akanji, M. O. (2020). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi spores in soils of some legumes and their response to varying concentrations of phosphorus application. *Open Agriculture*, 5(1), 539–547. <https://doi.org/10.1515/OPAG-2020-0052>

Amaral, J. A. T. do, Rena, A. B., & Amaral, J. F. T. do. (2006). Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(3), 377–384. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300002>

ANA. (2017). *Estudo da ANA aponta em 45% potencial de expansão da irrigação no Brasil até 2030*. Agência Nacional de Águas. <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/estudo-da-ana-aponta-em-45-potencial-de-expansao-da-irrigacao-no-brasil-ate-2030>

Araújo, S. A. do C., Vasquez, H. M., Campostrini, E., Netto, A. T., Deminicis, B. B., & Lima, É. D. S. (2010). Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.), em estresse hídrico. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 32(1), 1–7. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i1.8961>

Assad, E. D., Sano, E. E., Masutomo, R., Castro, L. H. R., & Silva, F. A. M. da. (1993). Veranicos na região dos Cerrados Brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 28(9), 993–1003. <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/3962/1253>

Bahadur, A., Batool, A., Nasir, F., Jiang, S., Mingsen, Q., Zhang, Q., Pan, J., Liu, Y., & Feng, H. (2019). Mechanistic Insights into Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Drought Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(17), 4199. <https://doi.org/10.3390/IJMS20174199>

Barea, J. M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 261–282. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162015005000021>

Bárcana, G., Aroca, R., Bienert, G. P., Chaumont, F., Ruiz-lozano, J. M., Microbiología, D. De, & Experimental, E. (2014). *New Insights into the Regulation of Aquaporins by the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Maize Plants Under Drought Stress and Possible Implications for Plant Performance*. 27(4), 349–363.

Bassett, C. L. (2013). Water Use and Drought Response in Cultivated and Wild Apples. In K. VAHDATI & C. LESLIE (Eds.), *Abiotic Stress - Plant Responses and Applications in Agriculture* (pp. 249–275). InTech. <https://doi.org/10.5772/55537>

Batista De Jesus, J., Kuplich, T. M., De Carvalho Barreto, Í., Niederauer Da Rosa, C., & Hillebrand, L. F. (2021). Temporal and phenological profiles of open and dense Caatinga using remote sensing: response to precipitation and its irregularities. *Journal of Forestry Research*, 32, 1067–1076. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01145-3>

Bedini, S., Pellegrino, E., Avio, L., Pellegrini, S., Bazzoffi, P., Argese, E., & Giovannetti, M. (2009). Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology & Biochemistry*, xxx, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.04.005>

Beltrano, J., & Ronco, M. G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum*

aestivum L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20(1), 29–37. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000100004>

Bender, S. F., & van der Heijden, M. G. A. (2015). Soil biota enhance agricultural sustainability by improving crop yield, nutrient uptake and reducing nitrogen leaching losses. *Journal of Applied Ecology*, 52(1), 228–239. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12351>

Bennett, A. E., Daniell, T. J., & White, P. J. (2013). Benefits of Breeding Crops for Yield Response to Soil Organisms. In *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere* (pp. 17–27). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch3>

Berbara, R. L., Souza, F., & Fonseca, H. M. A. C. (2006). Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In M. S. Fernandes (Ed.), *Nutrição mineral de plantas* (p. 432 p.). SBCS.

Bernardo, L., Carletti, P., Badeck, F. W., Rizza, F., Morcia, C., Ghizzoni, R., Rouphael, Y., Colla, G., Terzi, V., & Lucini, L. (2019). Metabolomic responses triggered by arbuscular mycorrhiza enhance tolerance to water stress in wheat cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 137, 203–212. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.02.007>

Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A., Pun, A. B., Bhat, M. A., Mandal, D. L., Shah, S., Zhihao, D., Tan, Q., & Hu, C.-X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis 2021 84:1*, 84(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/S13199-021-00756-6>

Bombardi, R. J., & Véspoli De Carvalho, L. M. (2008). Variabilidade do regime de monções sobre o brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(1), 58–72. <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v23n1/07.pdf>

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

Brasil. (1997). *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Lei No 9.433. http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/Leis/L9433.htm

Calvo-Polanco, M., Sánchez-Castro, I., Cantos, M., García, J. L., Azcón, R., Ruiz-Lozano, J. M., Beuzón, C. R., & Aroca, R. (2016). Effects of different arbuscular mycorrhizal fungal backgrounds and soils on olive plants growth and water relation properties under well-watered and drought conditions. *Plant, Cell & Environment*, 39(11), 2498–2514. <https://doi.org/10.1111/PCE.12807>

Campos, A. A. B., Scotton, J. C., Costa, W. L. F., Giassi, V., Pinto, D. F. P., & Homma, S. K. (2015). Seleção de fungicidas visando à preservação de fungos micorrízicos arbusculares nativos no cultivo do feijoeiro. *Revista Brasileira de*

Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(9), 898–902. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n9p898-902>

Cargnin, A., Alves De Souza, M., Crescêncio, P., Carneiro, S., & Sofiatti, V. (2006). Interação entre genótipos e ambientes e implicações em ganhos com seleção em trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(6), 987–993. <http://www.scielo.br/pdf/pab/v41n6/30865.pdf>

Castro Neto, M. T. de. (2003). Efeito do déficit hídrico na transpiração e resistência estomática da mangueira. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(1), 93–95. <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v25n1/a27v25n1>

Cazetta, D. A., Fornasieri Filho, D., & Arf, O. (2007). Resposta de cultivares de trigo e triticale ao nitrogênio no sistema de plantio direto. *Científica*, 35(2), 155–165. <http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/194/115>

Chavarria, G., & Santos, H. P. dos. (2012). Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. In G. Montanaro & B. Dichio (Eds.), *Advances in Selected Plant Physiology Aspects* (pp. 105–132). InTech. <https://doi.org/10.5772/33478>

Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E., & Reinhardt, D. (2018). Beneficial Services of Arbuscular Mycorrhizal Fungi – From Ecology to Application. *Frontiers in Plant Science*, 0, 1270. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.01270>

Chi, G.-G., Kumar Srivastava, A., & Wu, Q.-S. (2018). Exogenous easily extractable glomalin-related soil protein improves drought tolerance of trifoliolate orange. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(10), 1341–1350. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1432854>

Christofidis, D. (2013). Água, irrigação e agropecuária sustentável. *Revista de Política Agrícola*, 22(1), 115–127. <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/286/247>

CONAB. (2021). *Conab - Safra Brasileira de Grãos*. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>

Condé, A. B. T., Coelho, M. A. de O., Yamanaka, C. H., & Corte, H. R. (2009). Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo sob cultivo de sequeiro em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 40(1), 45–52. <https://doi.org/10.5216/pat.v40i1.5618>

Costa, E. A., Goedert, W. J., & De Sousa, D. M. G. (2006). Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(7), 1185–1191. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000700016>

Dai, J., Hu, J., Zhu, A., Bai, J., Wang, J., & Lin, X. (2015). No tillage enhances arbuscular mycorrhizal fungal population, glomalin-related soil protein content, and organic carbon accumulation in soil macroaggregates. *Journal of Soils and Sediments*, 15(5), 1055–1062. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1091-9>

Dar, Z. M., Masood, A., Asif, M., & Malik, M. A. (2018). Review on arbuscular

mycorrhizal fungi: An approach to overcome drought adversities in plants. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 1040–1049. https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Review+on+arbuscular+mycorrhizal+fungi%3A+An+approach+to+overcome+drought+adversities+in+plants&btnG=

DePaula, G. (2020). The distributional effect of climate change on agriculture: Evidence from a Ricardian quantile analysis of Brazilian census data. *Journal of Environmental Economics and Management*, 104, 102378. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2020.102378>

Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Flörke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B. M., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S. N., Haddeland, I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., ... Wissler, D. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>

Ely, D. F., Almeida, I. R. de, & Neto, J. L. S. (2003). Variabilidade climática e o rendimento da cultura do milho no estado do Paraná: *Geografia*, 12(1), 495–508. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2003V12N1P495>

Embrapa. (1997). *Manual de Métodos de Análise de Solo* (M. E. C. Claessen, Ne, W. de O. Barreto, J. L. de Paula, & M. N. Duarte (eds.); 2nd ed.).

Embrapa. (2011). *Programa de Monitoramento de Irrigação no Cerrado*. <http://hidro.cpac.embrapa.br/>

Embrapa. (2017, May 26). Artigo - A importância do trigo para a sustentabilidade da agricultura brasileira. *Gestão Estratégica - Embrapa Trigo*. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/23416523/artigo---a-importancia-do-trigo-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-brasileira>

Embrapa. (2018, May 30). O trigo no sistema de produção no Cerrado. *Transferência de Tecnologia*, 1. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/34711706/o-trigo-no-sistema-de-producao-no-cerrado>

Fang, Yan, Du, Y., Wang, J., Wu, A., Qiao, S., Xu, B., Zhang, S., Siddique, K. H. M., & Chen, Y. (2017). Moderate Drought Stress Affected Root Growth and Grain Yield in Old, Modern and Newly Released Cultivars of Winter Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 0, 672. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00672>

Fang, Yujie, & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673–689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>

FAO. (2011). *Climate change, water and food security*. <http://www.fao.org/docrep/014/i2096e/i2096e.pdf>

Faran, M., Farooq, M., Rehman, A., Nawaz, A., Saleem, M. K., Ali, N., & Siddique, K. H. M. (2019). High intrinsic seed Zn concentration improves abiotic stress tolerance in wheat. *Plant and Soil* 2019 437:1, 437(1), 195–213. <https://doi.org/10.1007/S11104-019-03977-3>

- Fernandes, R. G., Mateus dos Santos, I., Caramelo, A. D., & Moreira, W. M. Q. (2018). Use of vegetable bioregulator in the treatment of seeds and via foliar in the initial development of granífero sorgo. *Science and Technology Innovation in Agronomy*, 2(1), 97–105. http://repositorio.unifafibe.com.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/44/2018_RGF.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ferrão, R. G., Volpi, P. S., Ferrão, M. A. G., Verdin Filho, A. C., Fonseca, A. F. A. da, Ferrão, L. M. V., & Ferrão, L. F. V. (2018). Melhoramento genético para obtenção da cultivar Marilândia ES 8143, variedade clonal de café conilon tolerante a seca. *Multi-Science Research (MSR)*, 1(1), 1–18. <http://msrreview.org/index.php/msr/article/view/1/1>
- Ferreira, D. A., Carneiro, M. A. C., & Saggin-Junior, O. J. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi in an oxisol under managements and uses in cerrado. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 36(1), 51–61. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100006>
- Ferreira, D. F. (2010). Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042.
- Ferrini, F., & Nicese, F. (2002). Response of english oak (*Quercus robur* L.) trees to biostimulants application in the urban environment. *Journal of Arboriculture*, 28(2), 70–75.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O’Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Folli-Pereira, M. S., Meira-haddad, L. S. A., Bazzolli, D. M. S., & Kasuya, M. C. M. (2012). Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 36(1), 1663–1679.
- Forni, C., Duca, D., & Glick, B. R. (2017). Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant and Soil*, 410(1–2), 335–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3007-x>
- Franco, F. de A., & Evangelista, A. (2018). *Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2018 / XI Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale* (F. de A. Franco & A. Evangelista (eds.)). Embrapa. www.embrapa.br/fale-conosco
- Galindo, F. S., Ludkiewicz, M. G. Z., Bellote, J. L. M., Santini, J. M. K., Teixeira Filho, M. C. M., & Buzetti, S. (2015). Épocas de inoculação com *Azospirillum* brasilense via foliar afetando a produtividade da cultura do trigo irrigado. *Tecnologia e Ciência Agropecuária*, 9(2), 43–48. https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Teixeira_Filho/publication/283718793_Epocas_de_inoculacao_com_Azospirillum_brasilense_via_foliar_afetando_a_produtividade_da_cultura_do_trigo_irrigado_Leaf_application_times_of_Azospirillum_brasilense_in_yield_

- Ganugi, P., Masoni, A., Pietramellara, G., & Benedettelli, S. (2019). A Review of Studies from the Last Twenty Years on Plant–Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associations and Their Uses for Wheat Crops. *Agronomy*, 9(12), 840. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9120840>
- Garland, G., Edlinger, A., Banerjee, S., Degrune, F., García-Palacios, P., Pescador, D. S., Herzog, C., Romdhane, S., Saghai, A., Spor, A., Wagg, C., Hallin, S., Maestre, F. T., Philippot, L., Rillig, M. C., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food*, 2(1), 28–37. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00210-8>
- Gaspar, M. (2014). Aquaporins: From water channels to multifunctional transporters in plants. *Brazilian Journal of Botany*, 34(4), 481–491. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042011000400002>
- Gava, R., Lima, S. F. de, Dos Santos, O. F., Anselmo, J. L., Cotrim, M. F., & Kühn, I. E. (2018). Water depths for different soybean cultivars in center pivot. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(1), 10–15. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p10-15>
- Genre, A., Lanfranco, L., Perotto, S., & Bonfante, P. (2020). Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nature Reviews Microbiology* 2020 18:11, 18(11), 649–660. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>
- Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Gevrek, M. N., & Atasoy, G. D. (2012). Effect of post anthesis drought on certain agronomical characteristics of wheat under two different nitrogen application conditions. *Turkish Journal of Field Crops*, 17(1), 19–23. <http://www.field-crops.org/assets/pdf/product512cbca60097e.pdf>
- Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2019). EFFECT OF MYCORRHIZAL FUNGI ON SESAME PRODUCTIVITY UNDER WATER STRESS IN LOW-INPUT AGRICULTURE SYSTEM. *Turkish Journal of Field Crops*, 24(1), 46–53. <https://doi.org/10.17557/tjfc.564087>
- Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., Siavash Moghaddam, S., & Popović-Djordjević, J. (2020). Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiochemical traits and enzymatic antioxidant activity. *Agricultural Water Management*, 238, 106234. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106234>
- Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M. N., van Tuinen, D., Redecker, D., & Wipf, D. (2010). Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8), 519–530. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3>
- Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques to measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infections in roots. *New Phytologist*, 84(3), 489–500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>

- Giroto, L., Alves, J. D., Deuner, S., Albuquerque, A. C. S., & Tomazoni, A. P. (2012). Tolerância à seca de genótipos de trigo utilizando agentes indutores de estresse no processo de seleção. *Revista Ceres*, 59(2), 192–199. <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/3805/1620>
- Gomide, P. H. O., Santos, J. G. D. dos, Siqueira, J. O., & Soares, C. R. F. S. (2009). Diversidade e Função de fungos micorrízicos arbusculares em sucessão de espécies hospedeiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(11), 1483–1490. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100016>
- Hamner, K., Weih, M., Eriksson, J., & Kirchmann, H. (2017). Influence of nitrogen supply on macro- and micronutrient accumulation during growth of winter wheat. *Field Crops Research*, 213, 118–129. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.08.002>
- Hanks, R. J., Keller, J., Rasmussen, V. P., & Wilson, G. D. (1976). Line Source Sprinkler for Continuous Variable Irrigation-crop Production Studies. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 426–429. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1976.03615995004000030033X>
- Hassan, M. U., Amer, M., Chattha, M. U., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A., Liu, Y., & Guoqin, H. (2020). The Critical Role of Zinc in Plants Facing the Drought Stress. *Agriculture*, 10(9), 396. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10090396>
- He, J., Jin, Y., Turner, N. C., Chen, Z., Liu, H. Y., Wang, X. L., Siddique, K. H. M., & Li, F. M. (2019). Phosphorus application increases root growth, improves daily water use during the reproductive stage, and increases grain yield in soybean subjected to water shortage. *Environmental and Experimental Botany*, 166, 103816. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2019.103816>
- Hernandez, F. B. T., Sousa, S. A. V. de, Zocoler, J. L., & Frizzone, J. A. (2003). Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'oeste, estado de São Paulo. *Engenharia Agrícola*, 23(1), 21–30. http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/REA_veranico.PDF
- Hoffmann, R. B., Moreira, É. E. A., Hoffmann, G. S. da S., & Araújo, N. S. F. de. (2018). Effect of soil management on microbial biomass carbon. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 1(1), 168–178. <http://brazilianjournals.com/index.php/BJAER/article/view/738/631>
- Husband, R., Herre, E. A., Turner, S. L., Gallery, R., & Young, J. P. W. (2002). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and patterns of host association over time and space in a tropical forest. *Molecular Ecology*, 11(12), 2669–2678. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12453249>
- Ingraffia, R., Amato, G., Sosa-Hernández, M. A., Frenda, A. S., Rillig, M. C., & Giambalvo, D. (2020). Nitrogen Type and Availability Drive Mycorrhizal Effects on Wheat Performance, Nitrogen Uptake and Recovery, and Production Sustainability. *Frontiers in Plant Science*, 0, 760. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00760>
- INMET - Ministério da Agricultura, P. e A. (2019). *Clima - Gráficos Climatológicos (1931-1960 e 1961-1990)*.

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosclimaticos>

Invam. (2021). *International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. <http://invam.wvu.edu/>

Janusz Blaszkowski. (2019). *Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota), Endogone and Complexipes species deposited in the Department of Plant Pathology, University of Agriculture in Szczecin, Poland*. [http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species descriptions of AMF.html](http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species%20descriptions%20of%20AMF.html)

Javot, H., & Maurel, C. (2002). The role of aquaporins in root water uptake. *Annals of Botany*, 90(3), 301–313. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf199>

Khakpour, O., & Khar, J. (2012). Spore density and root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in some species in the northwest of Iran. *Article in International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*. <https://www.researchgate.net/publication/291771864>

Khalvati, M. A., Hu, Y., Mozafar, A., & Schmidhalter, U. (2005). Quantification of Water Uptake by Arbuscular Mycorrhizal Hyphae and its Significance for Leaf Growth, Water Relations, and Gas Exchange of Barley Subjected to Drought Stress. *Plant Biology*, 7(6), 706–712. <https://doi.org/10.1055/s-2005-872893>

Kiriachek, S. G., Azevedo, L. C. B. de, Peres, L. E. P., & Lambais, M. R. (2009). Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 33(1), 1–16. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100001>

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science (New York, N.Y.)*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Larcher, W. (2000). *Ecofisiologia Vegetal*. RiMa Artes e Textos.

Lehnert, H., Serfling, A., Enders, M., Friedt, W., & Ordon, F. (2017). Genetics of mycorrhizal symbiosis in winter wheat (*Triticum aestivum*). *New Phytologist*, 215(2), 779–791. <https://doi.org/10.1111/nph.14595>

Liu, C., Ravnskov, S., Liu, F., Rubæk, G. H., & Andersen, M. N. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate abiotic stresses in potato plants caused by low phosphorus and deficit irrigation/partial root-zone drying. *The Journal of Agricultural Science*, 156(1), 46–58. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000023>

Liu, R. J., Sheng, P. P., Hui, H. Bin, Lin, Q., & Chen, Y. L. (2015). Integrating irrigation management for improved grain yield of winter wheat and rhizosphere AM fungal diversity in a semi-arid cropping system. *Agricultural Systems*, 132, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.10.002>

Lizana, C., Wentworth, M., Martinez, J. P., Villegas, D., Meneses, R., Murchie, E. H., Pastenes, C., Lercari, B., Vernieri, P., Horton, P., & Pinto, M. (2006). Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress: I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 57(3), 685–697. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj062>

- Lopes, A. S., Guimarães, L. R. G., & Ramos, S. J. (2012). The Saga of the Agricultural Development of the Brazilian Cerrado - e-ific 32: Research Findings. *International Potash Institute*, 32, 29–37. <https://www.ipipotash.org/hi/eifc/2012/32/5/english>
- Loss, A., Pereira, M. G., Giácomo, S. G., Perin, A., & Anjos, L. H. C. Dos. (2011). Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10), 1269–1276. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022>
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y., & Guo, T. (2017). Physiological Responses and Yield of Wheat Plants in Zinc-Mediated Alleviation of Drought Stress. *Frontiers in Plant Science*, 0, 860. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00860>
- MacLean, A. M., Bravo, A., & Harrison, M. J. (2017). Plant signaling and metabolic pathways enabling arbuscular mycorrhizal symbiosis. *The Plant Cell Online*. <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00555>
- Manavalan, L. P., Guttikonda, S. K., Phan Tran, L.-S., & Nguyen, H. T. (2009). Physiological and Molecular Approaches to Improve Drought Resistance in Soybean. *Plant and Cell Physiology*, 50(7), 1260–1276. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082>
- Marengo, J. A. (2014). O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, 133, 25–32. <http://www.journals.usp.br/revusp/article/view/99280/97696>
- Melloni, R., Faria, M. T., Carneiro, L. O., Ferreira, G. M. R., Melloni, E. G. P., & Alvarenga, M. I. N. (2016). Propágulos e formação de micorriza em taludes de rodovia, no sul de Minas Gerais, Brasil. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 11(1), 26–32. <https://doi.org/10.5039/agraria.v11i1a5356>
- Méndez, D. F. S.; Paula, A. M.; Ramos, M. L. G.; Ribeiro Junior, W. Q.; Busato, J.G.; Soares, G. F. & Lima, C. A. (2021). Mycorrhizal Association in Wheat Genotypes Submitted to Variable Irrigation in the Brazilian Cerrado. *Journal of Agricultural Science*, 13, p. x, <https://10.5539/jas.v13n11p41>
- Menezes, H. E. A., Brito, J. I. B. de, Lima, R. A. F., & Lima, A. (2010). Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(2), 181–186. <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n2/v14n02a09.pdf>
- Mihailescu, E., & Soares, M. B. (2020). The Influence of Climate on Agricultural Decisions for Three European Crops: A Systematic Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 0, 64. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.00064>
- Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e Biotecnologia do Solo*. 729.
- Mori, C. de, & Ignaczak, J. C. (2011). Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo. In G. R. da PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA (Ed.), *Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável* (pp. 41–76).

- Muhammad, I., Wang, J., Sainju, U. M., Zhang, S., Zhao, F., & Khan, A. (2021). Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma*, 381, 114696. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114696>
- Nahar, K., Bovill, B., & McDonald, G. (2020). Mycorrhizal colonization in bread wheat varieties differing in their response to phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, 44(1), 29–45. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793190>
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M., & Lee, D. (2009). Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. In D.C (Ed.), *Food Policy Report 2*. International Food Policy Research Institute (IFPRI). <https://doi.org/10.2499/0896295370>
- Novák, V. (2012). *Evapotranspiration in the soil-plant-atmosphere system progress in soil science*. Springer Science and Business Media.
- Nunes, H. B., Goto, B. T., Coimbra, J. L., Oliveira, J. S., Tavares, D. G., Rocha, M. S., Silva, F. L., & Soares, A. C. F. (2019). Is arbuscular mycorrhizal fungal species community affected by cotton growth management systems in the Brazilian cerrado? *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 91(4), 20180695. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180695>
- Oleńska, E., Małek, W., Wójcik, M., Swiecicka, I., Thijs, S., & Vangronsveld, J. (2020). Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: A methodical review. *Science of The Total Environment*, 743, 140682. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140682>
- ONU, O. das N.-D. de A. E. e S. (2021). *World Population Prospects 2019. Probabilistic Projections*. <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>
- Ortas, I., & Bykova, A. (2018). The Effect of Mycorrhiza Inoculation and Phosphorus Application on Phosphorus Efficiency of Wheat Plants. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1455849>, 49(10), 1199–1207. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1455849>
- Pasinato, A., Cunha, G. R. da, Fontana, D. C., Monteiro, J. E. B. de A., Nakai, A. M., & Oliveira, A. F. de. (2018). Potential area and limitations for the expansion of rainfed wheat in the Cerrado biome of Central Brazil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 53(7), 779–790. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000700001>
- Pavithra, D., & Yapa, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances drought stress tolerance of plants. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 490–494. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2018.03.005>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)

Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for cleaning roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society London*, 55, 458–161.

PIRES, J. L. F., VARGAS, L., & CUNHA, G. R. da. (2011). *Trigo no Brasi: bases para produção competitiva e sustentável*. Embrapa Trigo.

Pontes, J. S. de, Oehl, F., Pereira, C. D., de Toledo Machado, C. T., Coyne, D., da Silva, D. K. A., & Maia, L. C. (2017). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the Brazilian's Cerrado and in soybean under conservation and conventional tillage. *Applied Soil Ecology*, 117, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.023>

Postel, S. L., Daily, G. C., & Ehrlich, P. R. (1996). Human Appropriation of Renewable Fresh Water. *Science*, 271(5250), 785–788. <https://doi.org/10.1126/science.266.5186.753>

Purin, S., & Klauberg Filho, O. (2010). Glomalina: nova abordagem para entendermos a biologia dos fungos micorrízicos arbusculares. In J. O. Siqueira, F. A. de Souza, j. b. n. Elke, & siu mui Tsai (Eds.), *Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil* (pp. 503–524).

Quiroga, G., Erice, G., Aroca, R., Chaumont, F., & Ruiz-lozano, J. M. (2017). *Enhanced Drought Stress Tolerance by the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in a Drought-Sensitive Maize Cultivar Is Related to a Broader and Differential Regulation of Host Plant Aquaporins than in a Drought-Tolerant Cultivar*. 8(June), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01056>

Raheem, A., Shaposhnikov, A., Belimov, A. A., Dodd, I. C., & Ali, B. (2018). Auxin production by rhizobacteria was associated with improved yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(4), 574–587. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1362105>

Rani, B., Madan, S., Sharma, K. D., Pooja, Berwa, M. K., & Kumar, A. (2017). Effect of Mycorrhizal Colonization on Nitrogen and Phosphorous Metabolism in Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Water Deficit Stress Cropping/Farming approaches for improving soil health and system productivity in coconut,arecanut and cocoa View project M. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 916–929. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.110>

Rapparini, F., & Peñuelas, J. (2013). Mycorrhizal Fungi to Alleviate Drought Stress on Plant Growth. In *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses, Volume 1* (pp. 21–42). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_2

Rapparini, F., & Peñuelas, J. (2014). Mycorrhizal Fungi to Alleviate Drought Stress on Plant Growth. *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses, 1*, 21–42. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_2

Rashid, M. I., Mujawar, L. H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I. M. I., & Oves, M. (2016). Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183, 26–41. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2015.11.007>

Rasul, G., & Sharma, B. (2015). The nexus approach to water-energy-food security:

an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 16(6), 1752–7457. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>

Ribeiro, G., Pimente, A. J. B., Souza, M. A. de, Carvalho, J. R. do A. S. de, & Fonseca, W. B. da. (2012). Estresse por altas temperaturas em trigo: impacto no desenvolvimento e mecanismos de tolerância. *Current Agricultural Science and Technology*, 18(2), 133–142. <https://doi.org/10.18539/cast.v18i2.2502>

Ribeiro Júnior, W. Q., Ramos, M. L. G., Vasconcelos, U., Trindade, M. D. g., Ferreira, F. M., Siqueira, M. M. H., Silva, H. L. M. Da, Rodrigues, G. C., Guerra, A. F., Rocha, O. C., Amábile, R. F., Albuquerque, A. C., Só e Silva, M., Albrecht, J. C., & Durães, F. O. M. (2007). Fenotipagem para tolerância à seca visando o melhoramento genético do trigo no cerrado. *Circular Técnica Online (INFOTECA-E)*, 21, 24. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/852172>

Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4), 355–363. <https://doi.org/10.4141/S04-003>

Rillig, M. C., Wright, S. F., & Eviner, V. T. (2002). The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, 238(2), 325–333. <https://doi.org/10.1023/A:1014483303813>

Rishcefid, M., Aliasghar zad, N., & Neyshabouri, M. (2017). Effects of Water Deficit Stress on Glomalin Secretion by Glomerales in Symbiosis with Corn Plant. *Journal of Water and Soil Science*, 21(1), 229–238. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.1.229>

Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2015). The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. *The ISME Journal*, 9(5), 1053–1061. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.207>

Rossi, R. M., & Neves, M. F. (2004). *Estratégias para o Trigo no Brasil*. <http://www.favaneves.org/wp-content/uploads/2018/03/Livro-Estrategias-para-o-Trigo-no-Brasil-Fava-Neves-Rossi-Editora-Atlas-2004-1.pdf>

Ruiz-Lozano, J. M., & Aroca, R. (2017). Plant Aquaporins and Mycorrhizae: Their Regulation and Involvement in Plant Physiology and Performance. In F. Chaumont & S. Tyerman (Eds.), *Plant Aquaporins* (pp. 333–353). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49395-4_15

Ruiz-Lozano, J., Porcel, R., Bárzana, G., Azcón, R., & Aroca, R. (2012). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis to Plant Drought Tolerance: State of the Art. In *Plant Responses to Drought Stress* (pp. 335–362). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_13

Ruiz-Lozano, Juan Manuel, Porcel, R., & Aroca, R. (2008). Evaluation of the Possible Participation of Drought-induced Genes in the Enhanced Tolerance of Arbuscular Mycorrhizal Plants to Water Deficit. *Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, Eco-Function, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics (Third Edition)*, October 2016, 1–797. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78826-3>

Ruth, B., Khalvati, M., & Schmidhalter, U. (2011). Quantification of mycorrhizal

water uptake via high-resolution on-line water content sensors. *Plant and Soil*, 342(1–2), 459–468. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0709-3>

Saath, K. C. de O., & Fachinello, A. L. (2018). Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 56(2), 195–212. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>

Salehi, A., Tasdighi, H., & Gholamhoseini, M. (2016). Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(10), 886–891. <https://doi.org/10.1016/J.APJTb.2016.08.009>

Santos, D. dos, Guimarães, V. F., Klein, J., Fioreze, S. L., & Macedo Junior, E. K. (2012). Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(8), 836–842. <http://www.agriambi.com.br>

Santos, R. F., & Carlesso, R. (1998). Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2(3), 287–294. <http://www.agriambi.com.br/revista/v2n3/287.pdf>

Scalon, S. de P. Q., Mussury, R. M., Euzébio, V. L. de M., Kodama, F. M., & Kissmann, C. (2011). ESTRESSE HÍDRICO NO METABOLISMO E CRESCIMENTO INICIAL DE MUDAS DE MUTAMBO (*Guazuma ulmifolia* Lam.). *Ciência Florestal*, 21(4), 655–662. <https://doi.org/10.5902/198050984510>

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2010.02.004>

Shabbir, R. N., Waraich, E. A., Ali, H., Nawaz, F., Ashraf, M. Y., Ahmad, R., Awan, M. I., Ahmad, S., Irfan, M., Hussain, S., & Ahmad, Z. (2016). Supplemental exogenous NPK application alters biochemical processes to improve yield and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2651–2662. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5452-0>

Silva, A. D. O., Jaenisch, B. R., Ciampitti, I. A., & Lollato, R. P. (2021). Wheat nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake dynamics under different management practices. *Agronomy Journal*, 113(3), 2752–2769. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20637>

Silva, C. F. da, Araújo, J. L. S. de, Silva, E. M. R. da, Pereira, M. G., Schiavo, J. A., Freitas, M. S. M. de, Saggin-Junior, O. J., & Martins, M. A. (2014). Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38(2), 423–431. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200007>

Silva, E. R., Oliveira, J. N., Rubio, C. P., Lyra, G. A. de, & Steiner, F. (2018). Épocas de semeadura do trigo para a região Centro-Sul Mato-Grossense. *JOURNAL OF NEOTROPICAL AGRICULTURE*, 5(1), 23–27. <http://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/1762/2044>

Silva, F. A., De Freitas, F. C. L., Rocha, P. R. R., Cunha, J. L. X., Dombroski, J. L. D., Coelho, M. E. H., & De Lima, M. F. P. (2015). Milho para ensilagem cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional sob efeito de veranico. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(1), 327–340. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n1p327>

Silva, M. S. e, Soares Sobrinho, J., Albrecht, J. C., Chagas, H. J., Caierão, E., Moresco, É. R., Castro, R. L. de, Nascimento Junior, A. do, Eichelberger, L., Guarienti, E. M., Miranda, M. Z. de, Maciel, J. L. N., Santana, F. M., Ribeiro Júnior, W. Q., & Scheeren, P. L. (2015). BRS 404 - Nova cultivar de trigo de sequeiro para o Cerrado brasileiro. *REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE*, 8.; *SEMINÁRIO TÉCNICO DO TRIGO*, 9., 2014, Canela; *REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE*, 9.; *SEMINÁRIO TÉCNICO DO TRIGO*, 10., 3.

Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press.

Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy* (11th ed.). USDA — Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050915.pdf

Sousa, C. N. A. de, & Caierão, E. (2014). *Cultivares de trigo indicadas para cultivo no Brasil e instituições criadoras 1922 a 2014 Cultivares de Trigo* (2nd ed.). Embrapa Trigo. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1012761/1/2014Cultivaresdetri go1922.pdf>

Sousa, D. M. G. de, & Lobato, E. (2004). *Cerrado Correção do solo e adubação* (D. M. G. de Sousa & E. Lobato (eds.); 2nd ed.). Embrapa Informação Tecnológica.

Souza, M. de, & Ramalho, M. A. P. (2001). Controle genético e tolerância ao estresse de calor em populações híbridas e em cultivares de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36(10), 1245–1253. <http://www.scielo.br/pdf/pab/v36n10/6748.pdf>

Symanczik, S., Lehmann, M. F., Wiemken, A., Boller, T., & Courty, P.-E. (2018). Effects of two contrasted arbuscular mycorrhizal fungal isolates on nutrient uptake by *Sorghum bicolor* under drought. *Mycorrhiza* 2018 28:8, 28(8), 779–785. <https://doi.org/10.1007/S00572-018-0853-9>

Taiz, L., & Zeiger, E. (2013). *Fisiologia vegetal* (5th ed.). Porto Alegre.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal* (6th ed.). Artmed. <https://www.saraiva.com.br/fisiologia-e-desenvolvimento-vegetal-6-ed-2017-9404479.html>

Takeiti, C. Y. (2015). *Trigo*. http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CO NT000girlwnqt02wx5ok05vadr1qrnof0m.html

Thirkell, T. J., Pastok, D., & Field, K. J. (2020). Carbon for nutrient exchange between arbuscular mycorrhizal fungi and wheat varies according to cultivar and changes in atmospheric carbon dioxide concentration. *Global Change Biology*,

26(3), 1725–1738. <https://doi.org/10.1111/GCB.14851>

Tran, B. T. T., Watts-Williams, S. J., & Cavagnaro, T. R. (2019). Impact of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and nutrition of fifteen crop and pasture plant species. *Functional Plant Biology*, 46(8), 732–742. <https://doi.org/10.1071/FP18327>

Truber, P. V., & Fernandes, C. (2014). Arbuscular mycorrhizal fungal communities and soil aggregation as affected by cultivation of various crops during the sugarcane fallow period. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38(2), 415–422. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200006>

USDA. (2021). *United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service*. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/statsByCommodity>

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

Verma, J. P., Yadav, J., Tiwari, K. N., Lavakush, & Sing, V. (2010). Impact of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Crop Production. *Nternational Journal of Agricultural Research*, 5(11), 954–983. <http://docsdrive.com/pdfs/academicjournals/ijar/2010/954-983.pdf>

Verslues, P. E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J., & Zhu, J.-K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 45(4), 523–539. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2005.02593.x>

Vílchez, J. I., García-Fontana, C., Román-Naranjo, D., González-López, J., & Manzanera, M. (2016). Plant Drought Tolerance Enhancement by Trehalose Production of Desiccation-Tolerant Microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1577. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01577>

Wada, Y., Wisser, D., Eisner, S., Flörke, M., Gerten, D., Haddeland, I., Hanasaki, N., Masaki, Y., Portmann, F. T., Stacke, T., Tessler, Z., & Schewe, J. (2013). Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4626–4632. [https://doi.org/10.1002/GRL.50686@10.1002/\(ISSN\)1944-8007.GRLCMIP5](https://doi.org/10.1002/GRL.50686@10.1002/(ISSN)1944-8007.GRLCMIP5)

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.

Wang, J., Mao, H., Zhao, H., Huang, D., & Wang, Z. (2012). Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. *Field Crops Research*, 135, 89–96. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2012.07.010>

Waraich, E. A., Ahmad, R., & Ehsanullah, M. Y. A. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 764–777. https://www.cropj.com/waraich_5_6_2011_764_777.pdf

- Woolet, J., & Whitman, T. (2020). Pyrogenic organic matter effects on soil bacterial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, *141*, 107678. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2019.107678>
- Worku, T., Khare, D., & Tripathi, S. K. (2019). Spatiotemporal trend analysis of rainfall and temperature, and its implications for crop production. *Journal of Water and Climate Change*, *10*(4), 799–817. <https://doi.org/10.2166/WCC.2018.064>
- Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, *161*(9), 575–586.
- Wright, Sara F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, *61*(9), 575–586. <https://doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>
- Wu, Q.-S., Srivastava, A. K., & Zou, Y.-N. (2013). AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae*, *164*, 77–87. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2013.09.010>
- Wu, Q.-S., & Zou, Y.-N. (2009). Mycorrhizal influence on nutrient uptake of citrus exposed to drought stress. *The Philippine Agriculturist Scientist*, *92*, 33–38. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PH2010000129>
- Wu, Q.-S., & Zou, Y.-N. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Drought Stress in Plants. In *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (pp. 25–41). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_2
- Yooyongwech, S., Samphumphuang, T., Tisarum, R., Theerawitaya, C., & Cha-um, S. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved water deficit tolerance in two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. *Scientia Horticulturae*, *198*, 107–117. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2015.11.002>
- Zhang, fei, He, J.-D., NI, Q.-D., WU, Q.-S., & ZOU, Y.-N. (2018). Enhancement of Drought Tolerance in Trifoliolate Orange by Mycorrhiza: Changes in Root Sucrose and Proline Metabolisms. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *46*(1), 270–276. <https://www.notulaebotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/10983/8095>
- Zhang, B., Zhang, H., Wang, H., Wang, P., Wu, Y., & Wang, M. (2018). Effect of Phosphorus Additions and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Inoculation on the Growth, Physiology, and Phosphorus Uptake of Wheat Under Two Water Regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *49*(7), 862–874. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435798>
- Zhang, F., Zou, Y.-N., & Wu, Q.-S. (2018). Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in citrus under drought stress. *Scientia Horticulturae*, *229*, 132–136. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2017.10.038>
- Zhang, M., O'Connor, P. J., Zhang, J., & Ye, X. (2021). Linking soil nutrient cycling and microbial community with vegetation cover in riparian zone. *Geoderma*, *384*,

114801. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114801>

Zhu, Y., Lv, G. C., Chen, Y. L., Gong, X. F., Peng, Y. N., Wang, Z. Y., Ren, A. T., & Xiong, Y. C. (2017). Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi with plastic mulching in rainfed wheat: A promising farming strategy. *Field Crops Research*, 204, 229–241. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2016.11.005>

Zilli, M., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Valin, H., Mosnier, A., Leclère, D., Havlík, P., Kraxner, F., Lopes, M. A., & Ramos, F. M. (2020). The impact of climate change on Brazil's agriculture. *Science of The Total Environment*, 740, 139384. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139384>