

UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES COMO
ESTRATÉGIA PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT
HÍDRICO EM MILHO

RENAN RAMOS DA ROSA

Magister Scientiae

RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL
2026

RENAN RAMOS DA ROSA

**FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES COMO ESTRATÉGIA
PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM
MILHO**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

**RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL
2026**

Universidade de Rio Verde
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

R696f Rosa, Renan Ramos da

Fungos micorrízicos arbusculares como estratégia para mitigação dos efeitos do déficit hídrico em milho. / Renan Ramos da Rosa. – 2025.
44 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Rosa.

Coorientadora: Profa. Dra. Juliana Silva Rodrigues Cabral.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV,
Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Produção
Vegetal, 2026.

Inclui índice de tabelas e figuras.

1. *Zea mays*. 2. Déficit hídrico. 3. Micorriza. 4. Fotoproteção. 5.
Adaptação ambiental. I. Rosa, Marcio. II. Cabral, Juliana Silva Rodrigues.
III. Título.

CDD: 631.847

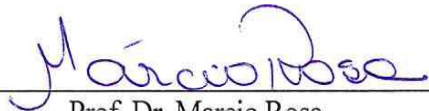
Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

RENAN RAMOS DA ROSA

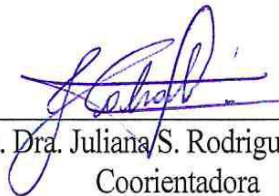
“FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAÇÃO
DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM MILHO”

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

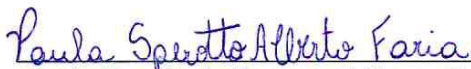
APROVAÇÃO: 23 de janeiro de 2026



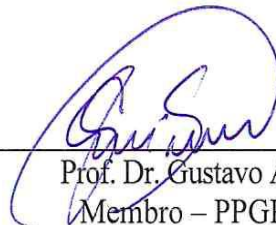
Prof. Dr. Marcio Rosa
Presidente da Banca Examinadora
Membro – PPGPV/UniRV



Profa. Dra. Juliana S. Rodrigues Cabral
Coorientadora
Membro – IF/Goiano



Profa. Dra. Paula Sperotto Alberto Faria
Membro Externo – IFGoiano



Prof. Dr. Gustavo André Simon
Membro – PPGPV/UniRV



Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão
Membro - PPGPV/UniRV

DEDICATÓRIA

A minha esposa Camila Villagran, companheira incansável em cada etapa desta jornada. Seu amor, apoio e paciência foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Nos momentos desafiadores, encontrei em você força e motivação para seguir em frente.

EPÍGRAFE

*“O único lugar onde o sucesso vem antes
do trabalho é no dicionário”.*

(Stubby Currence)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força e sempre me abençoar.

A minha família, pelos ensinamentos, apoio incondicional e incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

A minha esposa Camila Villagran, que esteve ao meu lado, durante toda esta trajetória, sempre me apoiando e motivando a superar os desafios. Sua presença foi fundamental, mostrando que vale a pena persistir e continuar estudando.

À Universidade de Rio Verde (UniRV) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV), minha sincera gratidão pela oportunidade de realizar esta formação de mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa que viabilizou este estudo.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Márcio Rosa e Prof^a. Dr^a. Juliana Silva Rodrigues Cabral, pela disposição, ensinamentos e pela confiança depositada em mim para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em participar da banca e pelas valiosas contribuições para a melhoria deste estudo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela dedicação e apoio, durante todo o curso, e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão!

BIOGRAFIA

RENAN RAMOS DA ROSA, filho de Elisa Catarina Ramos da Rosa e Honório Renato Dalosto da Rosa, nasceu em Uruguaiana, Rio Grande do Sul, em 1º de novembro de 1992. Graduado em Administração de Empresas pela Faculdade Educacional da Lapa, no ano de 2019, iniciou sua graduação em Agronomia na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), no campus Itaqui – RS, em 2018. Em 2022, transferiu-se para a Universidade de Rio Verde (UniRV), onde concluiu o curso em 2023, em 2021, concluiu a pós-graduação em Agronegócio pela Faculdade Dom Alberto.

No ano de 2024, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) da UniRV, em nível de Mestrado (*Stricto sensu*), com ênfase em Grandes Culturas. Sob à orientação do Prof. Dr. Márcio Rosa e coorientação da Prof^a. Dr^a. Juliana Silva Rodrigues Cabral, trabalhando com foco na ação de fungos micorrízicos arbusculares, visando buscar estratégias para mitigar os efeitos da seca na produção agrícola, desenvolvendo o trabalho Fungos Micorrízicos Arbusculares como estratégia para mitigação do déficit hídrico em milho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Cultura do milho (<i>Zea mays</i> L.).....	2
2.2 Déficit hídrico e seus danos as plantas.....	3
2.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares e a mitigação dos efeitos do déficit hídrico.....	4
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1 Material vegetal e condições de crescimento.....	6
3.2 Indução da restrição hídrica.....	7
3.3 Delineamento experimental.....	8
3.4 Avaliações fisiológicas.....	9
3.5 Características morfológicas.....	9
3.6 Colonização Micorrízica.....	10
3.7 Densidade de esporos.....	10
3.8 Dependência micorrízica.....	10
3.9 Análise estatística.....	11
4 RESULTADOS.....	11
5 DISCUSSÃO.....	21
6 CONCLUSÕES.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Análise de solo antes da instalação do experimento, em Rio Verde, GO..	6
TABELA 2	Dependência micorrízica (%) de plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos sob diferentes regimes hídricos.....	18

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 Fluxograma experimental da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) associada ao déficit hídrico em plantas de milho. Estádios de imposição dos déficits hídricos em plantas de milho e período das avaliações. A) Semeadura; B) Início do 1º Déficit hídrico no estágio V3 (21 dias após a semeadura); C) As plantas foram irrigadas após 8 dias de déficit hídrico; D) Início do 2º Déficit hídrico no estágio V8 (55 dias após a semeadura) e ao final foram realizadas as análises fisiológicas, potencial hídrico e pigmentos; E) Após 12 dias de déficit hídrico as plantas foram irrigadas por 24h; F) Avaliação de densidade de esporos, taxa de colonização micorrízica e análises morfológicas após 24h da irrigação. WW-FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW-FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW+FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); DW+FMA (plantas sob déficit hídrico na presença de FMA)..... 8
- FIGURA 2 Potencial hídrico (A), colonização micorrízica (B), taxa fotossintética (C), taxa transpiratória (D), condutância estomática (E), concentrações internas e externa de CO₂ (F) e densidade de esporos (G) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)(n = 4)..... 12
- FIGURA 3 Colonização micorrízica em raízes de milho sob diferentes regimes hídricos e identificação de estruturas de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA (A), plantas sob déficit hídrico com FMA (B), plantas irrigadas na ausência de FMA (C) e plantas irrigadas com FMA (D)..... 13
- FIGURA 4 Eficiência do uso da água (WUE) (A), eficiência intrínseca do uso da água (WUEi) (B) e taxa de carboxilação (C) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)(n = 4)..... 14

FIGURA 5	Rendimento quântico efetivo do fotossistema II [Φ PSII] (A), taxa relativa de transporte de elétrons [ETR] (B), quenching não fotoquímico [NPQ] (C), coeficiente de extinção fotoquímica (qP) (D) e extinção não fotoquímica (qN) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)(n = 4).....	15
FIGURA 6	Índice de clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e razão Cla/C1b (D) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)(n = 4).....	16
FIGURA 7	Comprimento médio de parte aérea (A), diâmetro médio de colmo (B), matéria seca de parte aérea (C), matéria seca de raiz (D) e matéria seca total (E) de plantas de milho em presença e ausência de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)(n = 4).....	17
FIGURA 8	Análise de componentes principais de primeira e segunda dimensão de plantas de milho em presença e ausência de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. WW – FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW – FMA (plantas com déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); DW + FMA (plantas com déficit hídrico na presença de FMA).....	19
FIGURA 9	Diagrama de path analysis demonstrando efeitos diretos (variável–matéria seco total/ setas azuis, linha contínua) e indiretos (variável–variável/ setas vermelhas, linha tracejada) entre variáveis e matéria seca total (Total) de plantas de milho em presença e ausência de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. A) WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); B) DW - FMA (plantas com déficit hídrico na ausência de FMA); C) WW + FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); D) DW + FMA (plantas com déficit hídrico na presença de FMA).....	20

RESUMO

ROSA, R. R. UniRV - Universidade de Rio Verde, janeiro de 2026. **Fungos Micorrízicos Arbusculares como estratégia para mitigação dos efeitos do déficit hídrico em milho.** Dissertação de Mestrado em Produção Vegetal. Universidade de Rio Verde. 44p. 2026.

O déficit hídrico caracteriza-se pela disponibilidade de água no solo não ser suficiente para atender às necessidades fisiológicas das plantas, tendo um impacto significativo no crescimento e desenvolvimento destas. A cultura do milho necessita de grandes quantidades de água para suprir suas necessidades fisiológicas. A utilização de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na agricultura tem mostrado resultados promissores. Esses fungos melhoram o transporte de água no solo e aumentam o comprimento específico das raízes, permitindo maior exploração do solo e sobrevivência prolongada em condições de seca. Com isto, objetivou-se com este trabalho analisar os mecanismos de proteção fisiológicos e morfológicos mediados pela presença e ausência da inoculação de FMA em híbrido de milho submetido a ciclos de déficit hídrico, em solo não esterilizado. Sementes de milho foram germinadas em vasos de nove litros contendo solo sob condições naturais de luz. As plantas foram irrigadas com 80% do teor de água da capacidade de campo (CC) desde a emergência até o estágio V3 (três folhas completamente desenvolvidas) sendo submetidas ao primeiro ciclo de déficit hídrico, por oito dias, seguido de reirrigação a 80% de CC. No estágio V8 (oito folhas completamente desenvolvidas), um segundo ciclo de déficit hídrico foi imposto, por doze dias, fase em que foram realizadas as análises fisiológicas e potencial hídrico, sendo que após a reirrigação para 80% da CC foram realizadas as análises: morfológicas, densidade de esporos e colonização micorrízica. A inoculação com FMA atenuou os efeitos dos ciclos de déficit hídrico, mantendo: o potencial hídrico foliar (Ψ_w), taxa fotossintética (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s). Essa resposta foi associada ao aumento da dissipação não-fotoquímica (NPQ), coeficiente de quenching não-fotoquímico (qN) e taxa de transporte de elétrons (ETR), com maior alocação de biomassa radicular, indicando ativação de mecanismos de proteção. A dependência micorrízica com os ciclos de déficit foi alta (48,2%) indicando interação funcional planta-FMA adaptativa ao ambiente. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que, a associação simbiótica entre o milho e os fungos micorrízicos arbusculares, sob ciclos de déficit hídrico, promoveu a ativação de mecanismos de proteção em diferentes níveis. A inoculação com FMA mostrou-se uma estratégia eficaz para aumentar a tolerância das plantas de milho ao déficit hídrico, contribuindo para a manutenção do crescimento vegetal e do acúmulo de biomassa.

Palavras-chave: *Zea mays*. Déficit Hídrico. Micorriza. Fotoproteção. Adaptação ambiental.

ABSTRACT

ROSA, R. R. UniRV - University of Rio Verde, January 2026. **Arbuscular Mycorrhizal Fungi as a Strategy for Mitigating the Effects of Water Deficit in Corn**. Dissertation in Plant Production. University of Rio Verde. 44p. 2026.

Water deficit is characterized by insufficient water availability in the soil to meet the physiological needs of plants, having a significant impact on their growth and development. Corn requires large amounts of water to meet its physiological needs. The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in agriculture has shown promising results. These fungi improve water transport in the soil and increase the specific root length, allowing for greater soil exploration and prolonged survival under drought conditions. This study aimed to analyze the physiological and morphological protection mechanisms mediated by the presence and absence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation in a maize hybrid subjected to water deficit cycles in non-sterilized soil. Maize seeds were germinated in nine-liter pots containing soil under natural light conditions. The plants were irrigated with 80% of the field capacity (FC) water content from emergence until the V3 stage (three fully developed leaves), being subjected to the first water deficit cycle for eight days, followed by re-irrigation at 80% FC. At the V8 stage (eight fully developed leaves), a second water deficit cycle was imposed for twelve days, during which physiological and water potential analyses were performed. After re-irrigation to 80% FC, the following analyses were performed: morphological, spore density, and mycorrhizal colonization. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) attenuated the effects of water deficit cycles, maintaining: leaf water potential (Ψ_w), photosynthetic rate (A), transpiration (E), and stomatal conductance (gs). This response was associated with increased non-photochemical dissipation (NPQ), non-photochemical quenching coefficient (qN), and electron transport rate (ETR), with greater allocation of root biomass, indicating activation of protective mechanisms. Mycorrhizal dependence on deficit cycles was high (48.2%), indicating a functional plant-AMF interaction adaptive to the environment. Based on the results obtained, it was concluded that the symbiotic association between maize and arbuscular mycorrhizal fungi, under water deficit cycles, promoted the activation of protective mechanisms at different levels. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) proved to be an effective strategy for increasing the tolerance of maize plants to water deficit, contributing to the maintenance of plant growth and biomass accumulation.

Keywords: *Zea mays*. Water deficit. Mycorrhiza. Photoprotection. Environmental adaptation.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, caracterizadas pelo aumento da temperatura e alterações nos padrões de precipitação, intensificam os desafios enfrentados na produção de alimentos, pois, secas prolongadas e mais frequentes devem se tornar comuns nos próximos anos, comprometendo a produtividade agrícola (IPCC, 2023; Yuan *et al.*, 2024).

A cultura do milho (*Zea mays* L.) possui elevada demanda hídrica, tornando-a sensível a redução na disponibilidade de água no solo. O déficit hídrico compromete processos fisiológicos e morfológicos essenciais, refletindo em reduções de produtividade e qualidade dos grãos (Laskari *et al.*, 2022; Simpkins, 2020). Diante desse cenário, estratégias de manejo têm sido direcionadas à mitigação dos efeitos da seca, incluindo o uso de híbridos mais tolerantes e a aplicação de produtos biológicos capazes de aprimorar o desempenho das plantas sob estresse (Azrai *et al.*, 2024; Kaushal; Wani, 2016; Sheoran *et al.*, 2022).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), estabelecem associação simbiótica com as raízes das plantas, caracterizada pela troca de recursos, em que a planta fornece ao fungo os carboidratos fotossintéticos e lipídeos, que ele não consegue produzir, em troca, os FMA favorecem a expansão do sistema radicular, por meio de uma rede de hifas que amplia a capacidade de exploração do solo, facilitando a absorção de nutrientes e água (Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024; Wilkes, 2021). Essa capacidade de ramificação contribui para a retenção hídrica do solo, como também atua como um regulador do balanço hídrico da planta (Abdalla *et al.*, 2023; Folli-Pereira *et al.*, 2012).

A simbiose planta-fungo exerce influência sobre processos fisiológicos e bioquímicos, promovendo maior resiliência das plantas em condições de seca (Tang *et al.*, 2022). Em condição hídrica favorável, plantas micorrizadas mantêm taxas elevadas de fotossíntese e trocas gasosas sob estresse, preservando o aparato fotossintético (Wang *et al.*, 2020). A simbiose também auxilia protegendo os centros de reação do fotossistema II contra danos foto-oxidativos (Huang *et al.*, 2024; Abdelaal; Alaskar; Hafez, 2024) induz a atividade de enzimas antioxidantes, reduzindo o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROS) e prevenindo o estresse oxidativo em tecidos fotossintéticos (Khan *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2019).

Diante do cenário desafiador imposto pelas mudanças climáticas e da importância do milho para a economia brasileira e mundial, objetivou-se com este trabalho analisar os mecanismos fisiológicos e morfológicos de proteção mediados pela presença e ausência da inoculação de FMA em híbrido de milho submetidas a ciclos de déficit hídrico, em solo não esterilizado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do milho (*Zea mays* L.)

Na agricultura brasileira, o milho é de suma importância devido a sua versatilidade, sendo utilizado tanto no consumo humano quanto na alimentação animal, além de suas aplicações nas indústrias alimentícia e de biocombustíveis. Economicamente, a gramínea é o segundo grão mais cultivado e exportado no Brasil, apenas atrás da soja, sendo fundamental na produção de ração animal, suportando a cadeia produtiva da carne, um dos principais segmentos do comércio exterior brasileiro. Assim, o cultivo e exportação da soja contribuem para o agronegócio brasileiro, desempenhando papel vital na economia e balança comercial do país (Artuzo *et al.*, 2019, Yuan *et al.*, 2024; Azrai *et al.*, 2024).

O milho (*Zea mays* L.), uma gramínea da família Poaceae, tem potencial produtivo devido a sua alta eficiência fotossintética, permitindo a conversão eficaz dos fotoassimilados em biomassa. A morfologia da cultura inclui um colmo com folhas alternadas e largas, além de um sistema radicular fasciculado que atinge até 3 metros de profundidade, com maior parte das raízes concentradas nos primeiros 30 cm, que contribui para sua baixa tolerância à seca (Magalhães; Durães; 2006; Almeida, 2024).

Devido ao seu alto potencial produtivo, o milho necessita de grandes quantidades de água para suprir suas necessidades fisiológicas, com a demanda hídrica ao longo de seu ciclo podendo exceder 600 mm (Cruz *et al.*, 2010). A baixa disponibilidade de água no solo ou a alta demanda evaporativa desencadeiam mecanismos fisiológicos, bioquímicos e moleculares que permitem a cultura tolerar essas limitações, ajustando seu crescimento e desenvolvimento para atenuar as reduções na produtividade final. A seca reduz a taxa de crescimento, biomassa, além de atrasar a floração do milho (Guimarães; Rocha; Paternian, 2019).

A ocorrência de déficit hídrico no milho pode ocasionar danos em todas as fases de desenvolvimento da cultura. A fenologia do milho é caracterizada por duas fases: vegetativo e reprodutivo (Magalhães; Durães, 2006). Na fase vegetativa, o déficit hídrico reduz a massa vegetativa e afeta a capacidade fotossintética do milho (Li *et al.*, 2025; Laskari *et al.*, 2022), resultando em menor altura das plantas e diâmetro dos colmos (Guimarães; Rocha; Paternian, 2019). Segundo Dao *et al.* (2014), a redução na altura das plantas devido ao déficit hídrico pode chegar a 25%. No reprodutivo, que abrange as fases críticas da pré-floração ao início do enchimento de grãos, o déficit hídrico pode causar significativa redução no rendimento

(Simpkins, 2020; Sheoran *et al.*, 2022). Magalhães *et al.* (2002), destacam que dois dias de estresse hídrico durante o florescimento podem diminuir o rendimento em mais de 20%, enquanto quatro a oito dias pode resultar em redução superior a 50%.

No vegetativo, caracterizado por folhas completamente expandidas, ocorre a definição dos componentes produtivos. No estágio V3, com o desenvolvimento de três folhas completamente expandidas, ocorre a definição do número de folhas e espigas que a planta irá produzir, estabelecendo assim seu potencial produtivo. Já no estágio V8, com oito folhas desenvolvidas, define-se o número de fileiras de grãos por espiga. (Magalhães; Durães; Paiva, 1995). Segundo Sheoran *et al.* (2022), a restrição hídrica pode exercer influência direta sobre os componentes de produtividade do milho, impactando a produtividade final da cultura. Deste modo, as oscilações nas safras de milho das principais regiões produtoras do Brasil estão associadas à disponibilidade de água, sobretudo no período crítico da cultura (Yuan *et al.*, 2024; Bergonci *et al.*, 2001; Bergamaschi *et al.*, 2004).

2.2 Déficit hídrico e seus danos as plantas

O déficit hídrico é um estresse abiótico, caracterizado pela disponibilidade de água no solo não ser suficiente para atender às necessidades fisiológicas das plantas, tendo um impacto significativo no crescimento e desenvolvimento das plantas (Cao *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

A produção agrícola em ambientes com pouca disponibilidade hídrica é afetada de maneira direta (Yuan *et al.*, 2024). De acordo com estudos da FAO (2017), a variabilidade climática e a ocorrência de secas são responsáveis por grandes variações na produção anual de grãos, levando a flutuações nos preços e na disponibilidade de alimentos. Como exemplo, o cultivo do milho em períodos de secas severas pode causar reduções de até 50% na produção (Simpkins, 2020; Magalhães *et al.*, 2002).

O déficit hídrico se intensificou nas últimas décadas restringindo a produtividade agrícola mundial (Yuan *et al.*, 2024). O aquecimento global, tem acentuado a frequência e severidade das secas. As mudanças climáticas globais estão associadas ao aumento das temperaturas e alterações dos padrões de precipitação, o que leva a períodos de seca mais prolongados e severos. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), espera-se que o aquecimento global continue a agravar as condições de seca, afetando negativamente a agricultura e a segurança alimentar mundial.

A falta de água afeta a fisiologia das plantas, iniciando com o fechamento dos

estômatos para reduzir a perda de água, por transpiração, o que limita a entrada de dióxido de carbono necessário para a fotossíntese, reduzindo a taxa fotossintética (Pacheco; Lazzarini; Alvarenga, 2021; Li *et al.*, 2025). Além disso, diminui a turgidez celular, prejudicando o crescimento, atenua a capacidade das plantas de absorverem nutrientes do solo (Kumar *et al.*, 2024), e induz a produção de espécies reativas de oxigênio (EROS), que podem causar danos nas plantas como: peroxidação lipídica, deterioração das membranas, degradação de proteínas, lipídios e ácidos nucleicos (Kumar *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2025).

A limitação estomática, juntamente com a diminuição dos teores de clorofila, agravam a redução da fotossíntese, enquanto a superprodução de EROS acelera a senescência foliar e abscisão das folhas para conservar água (Sheoran *et al.*, 2022; Laskari *et al.*, 2022). Essas condições resultam em uma redução significativa na produção de biomassa e rendimento das culturas (Sheoran *et al.*, 2022).

2.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares e a mitigação dos efeitos do déficit hídrico

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) estabelecem uma relação mutualística com as raízes de 80% das plantas. Esses fungos são caracterizados pela formação de estruturas ramificadas chamadas arbúsculos nas células das raízes das plantas hospedeiras, que são os principais locais de troca de metabólitos (Wilkes, 2021; Wang *et al.*, 2024). Os FMA têm grande capacidade de ramificação, explorando o solo e realizando a absorção de água e nutrientes. As hifas dos FMA atuam como extensões das raízes das plantas, fornecendo água e nutrientes através dos arbúsculos. Em troca, os carboidratos fotossintéticos, que os fungos não conseguem produzir, são fornecidos pelas plantas (Melloni *et al.*, 2020; Wang, *et al.*, 2024; Wilkes, 2021).

A utilização de FMA na agricultura tem mostrado resultados promissores, pois eles aumentam a absorção de nutrientes pelas plantas, melhoram a resistência a doenças, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e pesticidas, a tolerância a estresses, e estimulam o crescimento das raízes (Begum *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024). Além disso, a utilização desses fungos pode contribuir para a melhoria da estrutura do solo e redução da erosão. Diversos estudos têm demonstrado que a aplicação de fungos micorrízicos arbusculares em cultivos de espécies de interesse agrônômico resulta em aumento da produtividade das plantas (Frew, 2023; Santana *et al.*, 2023; Reyes-Ramirez *et al.*, 2025).

A interação entre os FMA e plantas hospedeiras é um processo complexo que envolve várias mudanças bioquímicas e fisiológicas. Quando as raízes das plantas são colonizadas por

estes fungos, há uma modificação na arquitetura radicular, promovendo maior exploração do solo (Frew, 2023), e com isto, absorção de água e nutrientes, especialmente em condições de estresse, como a seca. Essa relação simbiótica é especialmente vantajosa para as plantas, em ambientes desfavoráveis, em que a disponibilidade de recursos é limitada (Wang *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2025).

Os FMA dependem dos açúcares das plantas, ao mesmo tempo que oferecem benefícios como: a ligação das partículas do solo formando agregados, aumento da biomassa, melhoria da capacidade de retenção de água, eficiência do uso da água, aumento da ingestão de fósforo, zinco e outros nutrientes, tolerância à seca e à salinidade, sequestro de carbono no solo e proteção contra nematóides e outros insetos predadores, favorecendo o crescimento e desenvolvimento das plantas (Wilkes, 2021; Wang *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025).

Nas plantas, o gradiente de pressão formado entre folhas e atmosfera ocasiona perda de água, este processo é influenciado diretamente pela disponibilidade hídrica do solo. Portanto, à medida que o teor de água no solo diminui, a absorção de água pelas raízes torna-se mais difícil (Li *et al.*, 2025). Sendo assim, os FMA podem ser usados como alternativa das plantas para tolerar a restrição hídrica, visto que prolongam o sistema radicular, maximizando a absorção de água e nutrientes (Tang *et al.*, 2022), além de atuarem como reguladores do balanço hídrico das plantas, aumentando sua capacidade de absorver e reter água em condições de escassez hídrica (Abdalla *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024).

Estes fungos melhoram o transporte de água no solo e aumentam o comprimento específico das raízes, permitindo maior exploração do solo e sobrevivência prolongada em condições de seca. Além disso, influenciam positivamente a fisiologia vegetal, melhorando a fotossíntese e atividades antioxidantes, promovendo a manutenção da turgidez celular e integridade das membranas (Chandrasekaran, 2024; Santana *et al.*, 2023). Além de aumentarem a produção de osmólitos e enzimas antioxidantes, reduzindo os danos celulares causados pelo estresse hídrico (Smith; Read, 2008). Essas melhorias fisiológicas e bioquímicas contribuem para a redução da senescência foliar e abscisão das folhas, permitindo que as plantas mantenham maior capacidade fotossintética e crescimento sob condições adversas (Santana *et al.*, 2023).

Os efeitos dos FMA na restrição hídrica e nutrição mineral das plantas são bem documentados, porém, ainda há uma lacuna significativa na compreensão do impacto desses fungos nas características fotossintéticas das plantas e tolerância a escassez hídrica. Estudos que investiguem como os FMA influenciam as trocas gasosas são essenciais para elucidar os

mecanismos subjacentes aos efeitos benéficos da simbiose micorrízica no crescimento e desenvolvimento das plantas. Compreender plenamente essa relação simbiótica pode proporcionar novos direcionamentos para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes (Abdalla *et al.*, 2023; Chandrasekaran, 2024).

A compreensão dos mecanismos de interação entre os fungos micorrízicos arbusculares, as plantas hospedeiras, e as respostas fisiológicas desta simbiose em períodos de seca é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficientes de manejo e uso desses microrganismos

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material vegetal e condições de crescimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e as análises realizadas no Laboratório de Microbiologia do Solo da Universidade de Rio Verde – Campus Rio Verde (17°47'15"S 50°57'53"W). No dia 08/06/2023, sementes de milho do híbrido P3707VYH, foram cultivadas em vasos de nove litros contendo solo de área agrícola local (Latossolo Vermelho). Durante o experimento, a umidade relativa do ar manteve-se em média a 50,88% e temperatura média de 24,15 °C.

O solo utilizado foi coletado e uma amostra encaminhada para análise química (Tabela 1). Após a análise, procedeu-se a calagem com calcário Filler (100% PRNT) que foi incorporado ao solo nos vasos (7 g por vaso) e em seguida foram transferidos para casa de vegetação. O calcário reagiu por 20 dias, permitindo que a saturação por bases atingisse o nível recomendado, para a cultura de milho (60%).

TABELA 1 - Análise de solo antes da instalação do experimento, em Rio Verde, GO

Ca	Mg	Ca+Mg	Al	H+Al	K	K	P (mel)	pH	M.O.	
-----cmol _c dm ⁻³ -----					-----mg dm ⁻³ -----			CaCl ₂	g Kg ⁻¹	
4,09	1,65	5,74	0,05	6,44	0,60	235,0	1,71	4,75	37,05	
Fe	Mn	Cu	Zn	CTC	SB	V%	m%	Argila	Silte	Areia
-----mg dm ⁻³ -----				cmol _c dm ⁻³		Sat. Base	Sat. Al	-----%-----		
65,5	157,3	4,1	8,8	12,78	6,34	49,64	21,58	42,70	13,69	43,62

Os vasos foram adubados com 20 g de superfosfato triplo e 2,17 g de ureia. Duas semanas após o plantio, realizou-se adubação de cobertura com 7,24 g de ureia e 4,3 g de cloreto de potássio por vaso (dividida em duas partes: 1ª adubação de cobertura nas primeiras folhas e 2ª adubação entre V3-V4).

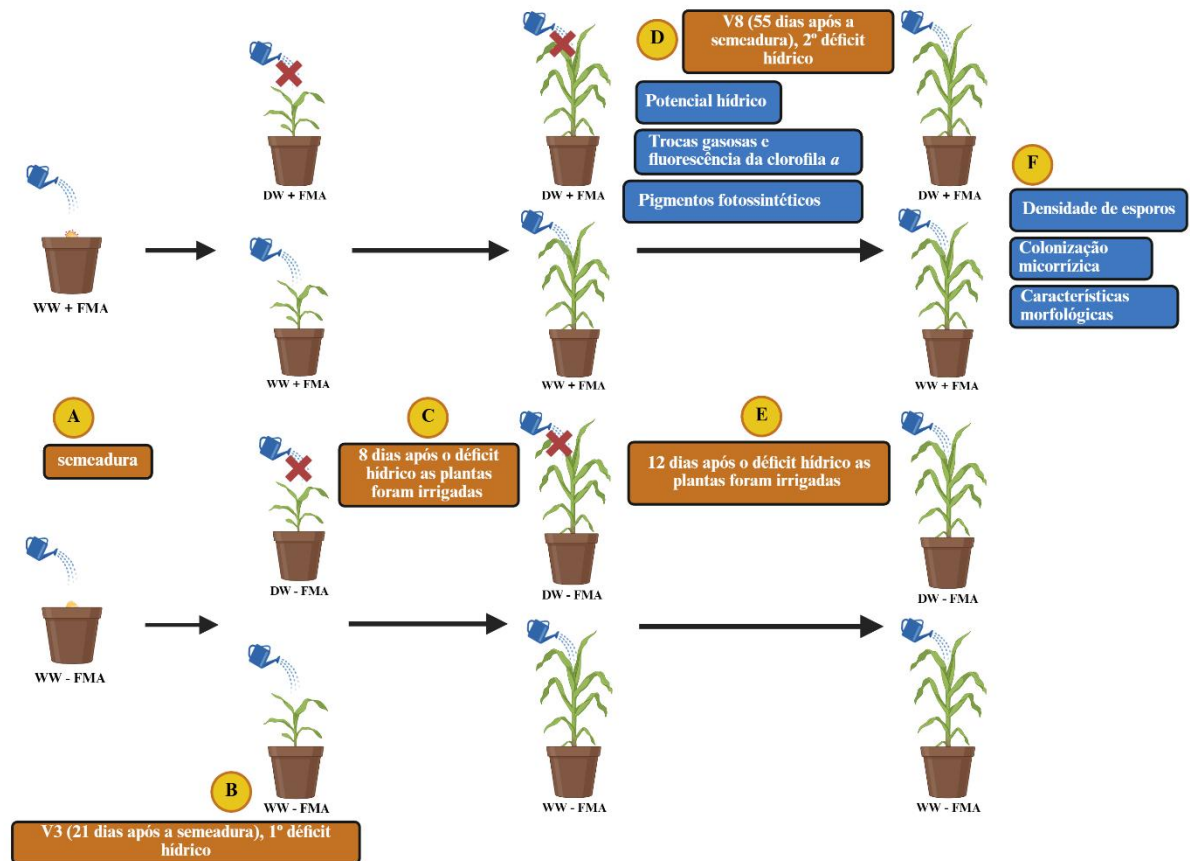
A inoculação com fungo micorrízico arbuscular ocorreu no momento da semeadura, via tratamento de sementes, utilizando dosagem de 20 mL ha⁻¹ (22.500 propágulos mL⁻¹), com a mistura de quatro espécies: *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus aggregatus*, *Rhizophagus intraradices* e *Entrophospora etunicata*.

3.2 Indução da restrição hídrica

Cada vaso foi pesado e preenchido com a mesma quantidade de solo (9kg de solo por vaso). O controle do conteúdo de água no solo foi realizado através do método de sonda FDR, utilizando sensores de irrigação do modelo 10 HS (METER Group, Inc. USA).

As plantas foram irrigadas com 80% do teor de água da capacidade de campo (CC) desde a emergência até o estágio V3 (três folhas completamente desenvolvidas). No estágio V3, foram submetidas ao primeiro ciclo de déficit hídrico por oito dias, seguido de reirrigação a 80% de CC.

No estágio V8 (oito folhas completamente desenvolvidas), um segundo ciclo de déficit hídrico foi imposto por doze dias, fase em que foram realizadas as análises fisiológicas e após a reirrigação para 80% da CC ocorreram: as análises morfológicas, densidade de esporos e colonização micorrízica (Figura 1).



(Figura criada com Biorender)

FIGURA 1 – Fluxograma experimental da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) associada ao déficit hídrico em plantas de milho. Estádios de imposição dos déficits hídricos em plantas de milho e período das avaliações. A) Semeadura; B) Início do 1º Déficit hídrico no estágio V3 (21 dias após a semeadura); C) As plantas foram irrigadas após 8 dias de déficit hídrico; D) Início do 2º Déficit hídrico no estágio V8 (55 dias após a semeadura) e ao final foram realizadas as análises fisiológicas, potencial hídrico e pigmentos; E) Após 12 dias de déficit hídrico as plantas foram irrigadas por 24h; F) Avaliação de densidade de esporos, taxa de colonização micorrízica e análises morfológicas após 24h da irrigação. WW-FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW-FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW+FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); DW+FMA (plantas sob déficit hídrico na presença de FMA).

3.3 Delineamento experimental

O experimento foi disposto em delineamento inteiramente casualizado com 4 repetições por tratamento. Os tratamentos consistiram em: 1) plantas irrigadas na ausência de FMA (WW-FMA); DW-FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW+FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); DW+FMA (plantas sob déficit hídrico na presença de FMA). Cada repetição constituiu de um vaso contendo duas plantas.

3.4 Avaliações fisiológicas

As avaliações de trocas gasosas foram realizadas utilizando o sistema de determinações da concentração de gases no infravermelho (IRGA) modelo Li-6800 (Li-Cor – NE, USA). Parâmetros como taxa fotossintética líquida (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e taxa transpiratória (E , $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) foram determinadas em todos os tratamentos. A densidade de fluxo de fótons fotossintéticos aplicada na câmara de medição foi de $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. As medições foram realizadas no período das 8h até 11h.

O potencial hídrico (Ψ_w) foi medido na antemanhã utilizando bomba de Scholander. Para isso, folhas completamente expandidas foram coletadas e inseridas na câmara da bomba, sendo uma pressão aplicada até ocorrer a exsudação pelo corte feito, no pecíolo da folha, permitindo a leitura da pressão necessária para o deslocamento da água (Scholander et al., 1965).

Os índices de clorofilas foram determinados, por meio do medidor portátil, ClorofiLOG CFL 1030® (Falker®, RS, Brasil) sendo obtido o índice de clorofilas totais expressos no índice Clorofilog.

As medições de fluorescência da clorofila foram realizadas utilizando o fluorômetro acoplado ao IRGA LI 6800, às 4h da manhã, após a exposição das folhas ao escuro, por 40 minutos, em temperatura ambiente, para medição da fluorescência mínima (F_o) e a fluorescência máxima (F_m). Dessa forma, foi obtido parâmetro como o rendimento quântico máximo de PSII, calculado por F_v / F_m ($F_v = F_m - F_o$), enquanto o rendimento quântico real de PSII foi calculado por $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F) / F_m'$. E, em estado de adaptação à luz, o quenching não-fotoquímico (q_N) foi calculado por $q_N = 1 - (F_m' - F_o) / (F_m - F_o)$. A taxa de transporte de elétrons (ETR) foi calculada como $\text{ETR} = \Phi_{\text{PSII}} \times \text{PAR} \times \text{Aleaf} \times 0,5$ (Bilger; Schreiber; Bock, 1995), em que PAR é a densidade de fluxo de fótons, Aleaf corresponde à fração da luz incidente, que é absorvida pelas folhas, e 0,5 é a fração da energia de excitação que se presume ser distribuída igualmente entre o PSII e o PSI (Laisk; Loreto, 1996).

3.5 Características morfológicas

Aos 67 dias após semeadura, foram avaliados o comprimento médio da parte aérea, diâmetro médio de colmo, massa seca de parte aérea e raiz. A massa seca foi obtida após secagem do material vegetal em estufa a 65°C com circulação de ar forçada até a obtenção de massa constante.

3.6 Colonização Micorrízica

Frações de aproximadamente 1g de raízes das plantas de cada tratamento foram separadas e conservadas em solução alcoólica 50%. Para estimativa da colonização radicular por FMA, as raízes foram despigmentadas pelo método de Koskey e Gemma (1989), modificado. Pesa-se 0,4 g das raízes, sendo imersas em KOH (10%), e levadas para estufa a 90 °C, por 60 minutos.

Após retirada da estufa, as raízes foram lavadas com água destilada e transferidas para uma solução de HCl (5%) por 5 minutos, em estufa a 90 °C. Posteriormente retira-se o HCl e adiciona o corante azul de tripano (0,05%), levadas novamente para estufa a 90 °C, por 15 minutos, após são lavadas para com água destilada e adicionado lactoglicerol (Phillips; Heyman, 1970). Foram confeccionadas placas com graduação de 1 cm, cada repetição contendo dez fragmentos das raízes, para visualização através da lupa óptica (4x) e determinação da porcentagem de colonização (Mcgonigle *et al.* 1990).

3.7 Densidade de esporos

Foi determinada com o solo de cada vaso utilizando a técnica de peneiramento úmido (Gerdemann; Nicholson, 1963). Para a extração de esporos foi coletado amostras de 100g de solo e posteriormente misturá-las com água no becker e triturando, logo após, a amostra foi colocada no tubo tipo falcon com água na centrífuga à 3000 rpm durante 3 minutos, depois a água foi dispensada e assim, adicionado uma solução de sacarose a 60% e recolocada na centrífuga por mais 2 minutos, em seguida, foi despejado o líquido que contém os esporos na peneira para a lavagem dessa amostra e armazená-la em um recipiente até a análise, procedimento utilizou placa canelada para a contagem do número de esporos através da lupa óptica (4x).

3.8 Dependência micorrízica

A dependência micorrízica relativa (DMR) foi calculada com a seguinte fórmula: matéria seca de planta micorrizada - matéria seca de planta não micorrizada/ matéria seca da planta micorrizada, multiplicado por 100 (Plenchette, Fortin; Furlan, 1983).

3.9 Análise estatística

A homogeneidade da variância foi verificada pelo teste de Bartlett. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey (5 % de probabilidade), utilizando o software SISVAR 11 (Ferreira, 2019).

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada no conjunto de dados usando os tratamentos de inoculação e déficit hídrico. Essas análises utilizaram os pacotes *FactoMineR* (Lê; Josse; Husson, 2008) e *factoextra* (Kassambara; Mundt, 2020) no software R (Team, 2016). Primeiramente, os dados foram dimensionados utilizando a função de escala e as análises foram realizadas utilizando a função PCA. Os autovalores foram avaliados para determinar o número de dimensões a serem avaliadas.

A path analysis foi conduzida como uma abordagem baseada em rede de correlações, construída separadamente para cada tratamento (WW-FMA, DW-FMA, WW+FMA e DW+FMA), considerando matéria seca total como variável resposta. As associações entre variáveis foram estimadas pelo coeficiente de correlação de Pearson e a significância estatística foi avaliada por teste bicaudal, reportando-se os respectivos p-valores em cada ligação do diagrama.

As ligações entre cada variável e matéria seca total foram interpretadas como efeitos diretos, enquanto as correlações entre variáveis explicativas foram usadas para representar efeitos indiretos (i.e., co-variação entre traços) dentro da rede, com interpretação de “caminhos” dependente de hipótese biológica prévia e sem inferência causal estrita (Grace, 2006; Kline, 2016). Para reduzir a complexidade visual, as conexões indiretas foram exibidas apenas quando $|r|$ excedeu um limiar predefinido ($r \geq 0,65$), mantendo-se no gráfico as associações mais fortes e interpretáveis. Os diagramas foram confeccionados em Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024), com rotulagem explícita dos valores de p em cada aresta.

4 RESULTADOS

O potencial hídrico (Ψ_w) ($F_{3,12} = 40,72$, $p < 0,0001$) das plantas de milho irrigadas foi superior (-0,05 MPa), não havendo diferença entre plantas inoculadas e não inoculadas com FMA, nesta condição. Contudo sob déficit hídrico, plantas associadas aos FMA mantiveram Ψ_w de -0,21 MPa, valor mais elevado que -0,34 MPa obtidos em plantas não inoculadas (Figura 2a).

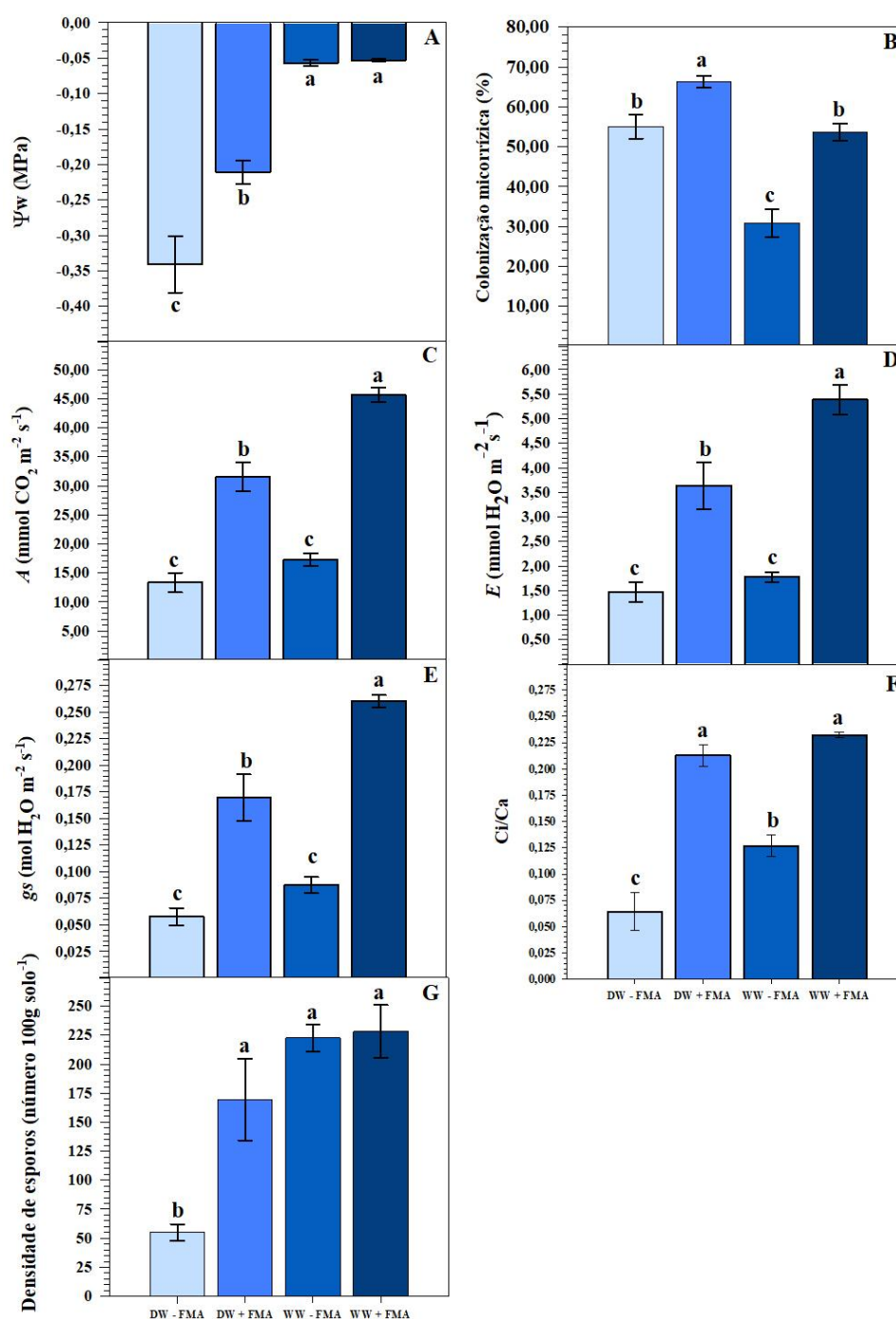


FIGURA 2 - Potencial hídrico (A), colonização micorrízica (B), taxa fotossintética (C), taxa transpiratória (D), condutância estomática (E), concentrações interna e externa de CO_2 (F) e densidade de esporos (G) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey. WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW - FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas com FMA); DW + FMA (plantas sob déficit hídrico com FMA).

Para a colonização micorrízica ($F_{3,12} = 31,15$, $p < 0,0001$) (Figuras 2b e 3), observou-se uma modulação pela condição hídrica, na qual a maior taxa (66%) foi obtida nas plantas inoculadas sob déficit hídrico (DW + FMA) (Figura 3 a e b). Os tratamentos DW - FMA (55%) e WW + FMA (53%) (Figura 3c) não apresentaram diferença entre si. A menor colonização (30%) ocorreu em plantas irrigadas sem inoculação WW + FMA.

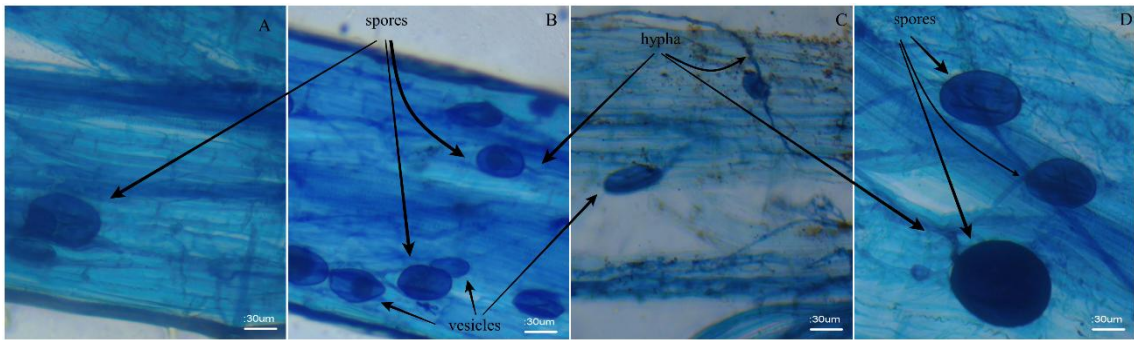


FIGURA 3 - Colonização micorrízica em raízes de milho sob diferentes regimes hídricos e identificação de estruturas de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA (A), plantas sob déficit hídrico com FMA (B), plantas irrigadas na ausência de FMA (C) e plantas irrigadas com FMA (D).

A taxa fotossintética líquida (A) ($F_{3,12} = 73,45$, $p < 0,0001$) foi maior em plantas inoculadas com FMA na condição irrigada ($45,70 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). As plantas inoculadas quando submetidas ao déficit hídrico exibiram valores médios de A de $31,57 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Em contrapartida, plantas não inoculadas tiveram taxas fotossintéticas baixas, na condição irrigada ($17,26 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ou sob déficit hídrico ($13,34 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 2c). A taxa transpiratória (E) ($F_{3,12} = 35,74$, $p < 0,0001$) (Figura 2d) e condutância estomática (g_s) ($F_{3,12} = 52,78$, $p < 0,0001$) (Figura 2e) tiveram comportamento semelhante, os maiores valores médios foram obtidos em plantas irrigadas inoculadas com FMA ($E = 5,38 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $g_s = 0,26 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Plantas submetidas ao déficit hídrico tiveram valores médios maiores quando inoculadas ($E = 3,63 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $g_s = 0,16 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) do que quando não inoculadas ($E = 1,46 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $g_s = 0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

A razão concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) ($F_{3,12} = 44,63$, $p < 0,0001$) teve menores valores médios em plantas submetidas ao déficit hídrico sem inoculação (0,06). Maiores valores foram observados em plantas inoculadas submetidas ao déficit hídrico (0,21) e irrigadas (0,23) (Figura 2f). A densidade de esporos ($F_{3,12} = 13,32$, $p = 0,0004$) no solo foi menor na condição DW - FMA (55 esporos por 100g de solo^{-1}) (Figura 2g).

A eficiência no uso da água, A/E ($F_{3,12} = 18,67, p < 0,0001$) (WUE) (Figura 4a) e a eficiência intrínseca, A/gs (iWUE) ($F_{3,12} = 24,39, p < 0,0001$) (figura 4b) tiveram maiores valores em plantas inoculadas com FMA submetidas a déficit hídrico ($11,16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ e $235,58 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, respectivamente). Na taxa máxima de carboxilação ($V_{c\text{max}}$) ($F_{3,12} = 17,55, p = 0,0001$) (Figura 4c) os tratamentos WW + FMA ($0,70 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e DW - FMA ($0,55 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) tiveram os maiores valores médios, enquanto DW + FMA ($0,36 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e WW - FMA ($0,31 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) obtiveram os menores valores médios.

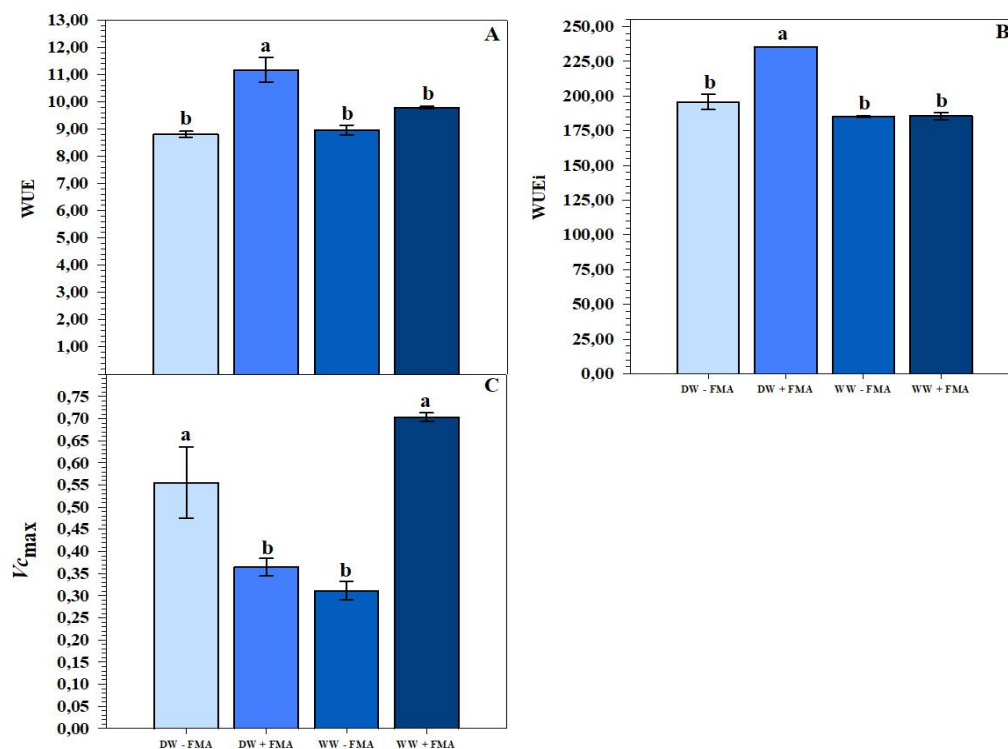


FIGURA 4 - Eficiência do uso da água (WUE) (A), eficiência intrínseca do uso da água (WUEi) (B) e taxa de carboxilação (C) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey. WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW - FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas com FMA); DW + FMA (plantas sob déficit hídrico com FMA).

O rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ΦPSII) ($F_{3,12} = 36,09, p < 0,0001$) e a taxa de transporte de elétrons (ETR) ($F_{3,12} = 36,09, p < 0,0001$) tiveram comportamento semelhantes (Figuras 5a e 5b), com menores valores médios obtidos no DW - FMA ($\Phi\text{PSII} = 0,08$; $\text{ETR} = 72,97 \mu\text{mol elétrons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e WW - FMA ($\Phi\text{PSII} = 0,10$; $\text{ETR} = 90,43 \mu\text{mol}$

elétrons $m^{-2} s^{-1}$).

Para o *quenching* não-fotoquímico (NPQ) ($F_{3,12} = 23,11, p < 0,0001$) (Figura 5c), a maior dissipação de energia (2,30) foi obtida no tratamento DW + FMA, enquanto menores valores de dissipação ocorreram no WW - FMA (1,52). De forma similar, o coeficiente de *quenching* fotoquímico (qP) ($F_{3,12} = 21,73, p < 0,0001$), que reflete a proporção de centros de reação do PSII disponíveis para a fotoquímica, foi maior WW + FMA (0,56) (Figura 5d). Enquanto o coeficiente de *quenching* não-fotoquímico (qN) ($F_{3,12} = 17,58, p = 0,0001$) foi menor no WW - FMA (0,77) (Figura 5e).

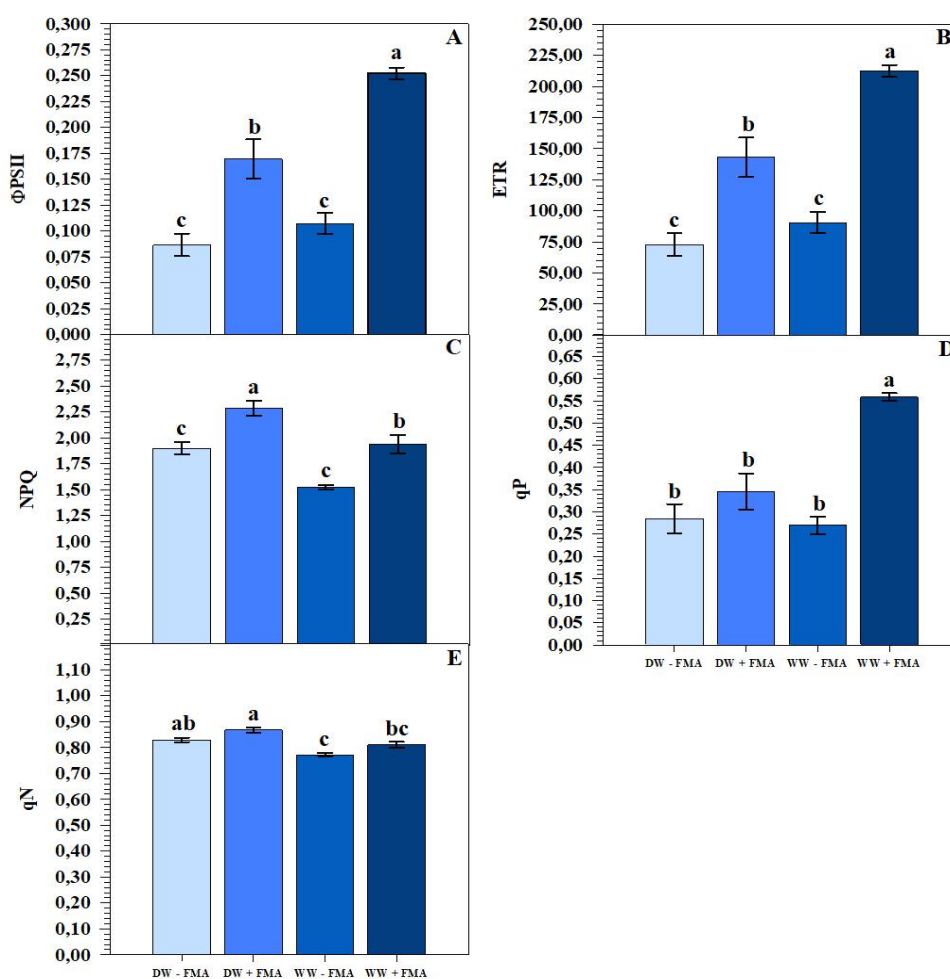


FIGURA 5 – Rendimento quântico efetivo do fotossistema II [Φ PSII] (A), taxa relativa de transporte de elétrons [ETR] (B), *quenching* não fotoquímico [NPQ] (C), coeficiente de extinção fotoquímica (qP) (D) e extinção não fotoquímica (qN) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey. WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW - FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas com FMA); DW + FMA (plantas sob déficit hídrico com FMA)

Os índices de clorofila *a* ($F_{3,12} = 9,16, p = 0,002$) (26,64), *b* ($F_{3,12} = 15,11, p < 0,0002$) (6,4) e total ($F_{3,12} = 9,46, p < 0,002$) (33,04) foram menores em DW-FMA (Figura 6a, b e c). Maiores índices de clorofila *a* (Figura 6a) e total (Figura 6c) foram obtidos no DW + FMA (36,11 e 44,38, respectivamente) e WW + FMA (41,92 e 55,77, respectivamente). Enquanto para clorofila *b* (Figura 6b) maiores índices ocorreram no WW + FMA (13,94) e para relação *a/b* (Figura 6d) no DW + FMA (4,54).

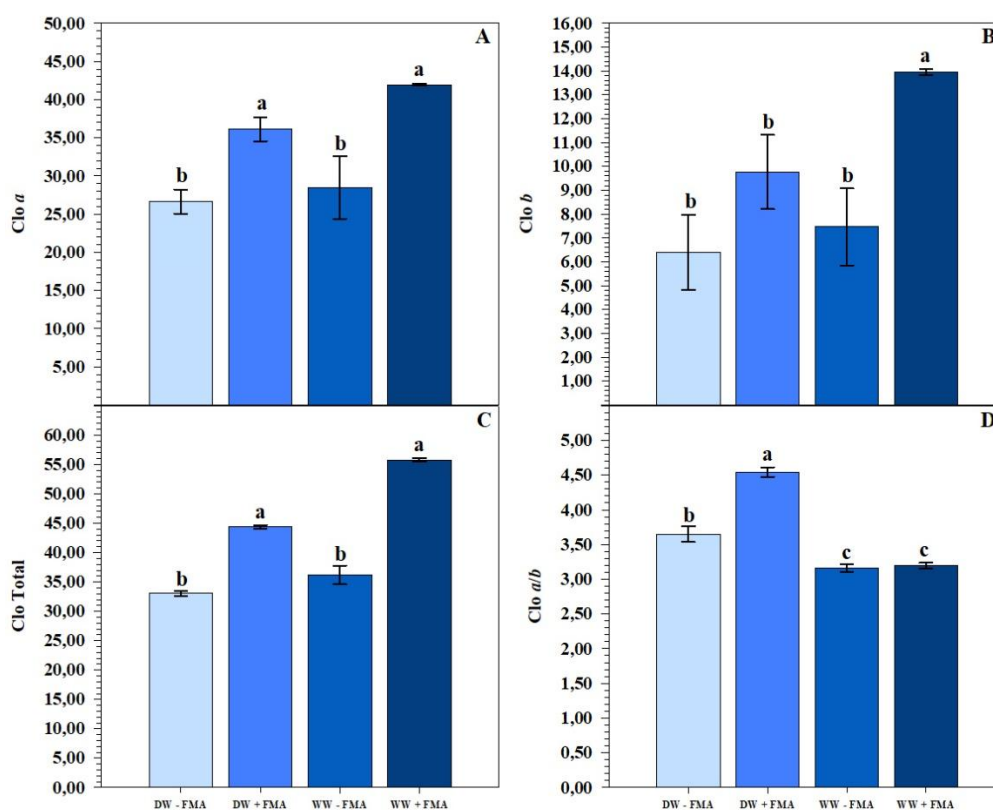


FIGURA 6 – Índice de clorofila *a* (A), clorofila *b* (B), clorofila total (C) e razão *Cla/Clb* (D) em plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey. WW – FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW – FMA (plantas sob déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas com FMA); DW + FMA (plantas sob déficit hídrico com FMA).

Plantas submetidas ao déficit hídrico sem inoculação tiveram menores valores de altura de plantas ($F_{3,12} = 4588,01, p < 0,0001$) (45,0 cm planta^{-1}), diâmetro de caule ($F_{3,12} = 14,74, p < 0,0002$) (1,62 cm planta^{-1}), matéria seca de parte aérea ($F_{3,12} = 2842,061, p < 0,0001$) (20,21 g planta^{-1}), de raiz ($F_{3,12} = 75,98, p < 0,0001$) (21,13 g planta^{-1}) e total ($F_{3,12} = 224,89, p < 0,0001$) (41,22 g planta^{-1}) (Figura 7).

Plantas irrigadas com a inoculação de FMA tiveram maiores valores médios de comprimento médio de altura ($105,55 \text{ cm planta}^{-1}$) (Figura 7a), enquanto as não inoculadas tiveram maior valor médio de matéria seca de parte aérea ($86,87 \text{ g planta}^{-1}$) (Figura 7c). Para matéria seca de raízes e total plantas irrigadas com (110,92 g planta^{-1} , 194,57 g planta^{-1} , respectivamente) e sem inoculação (105,69 g planta^{-1} , 182,24 g planta^{-1} , respectivamente) tiveram os maiores valores (Figura 7d e Figura 7e).

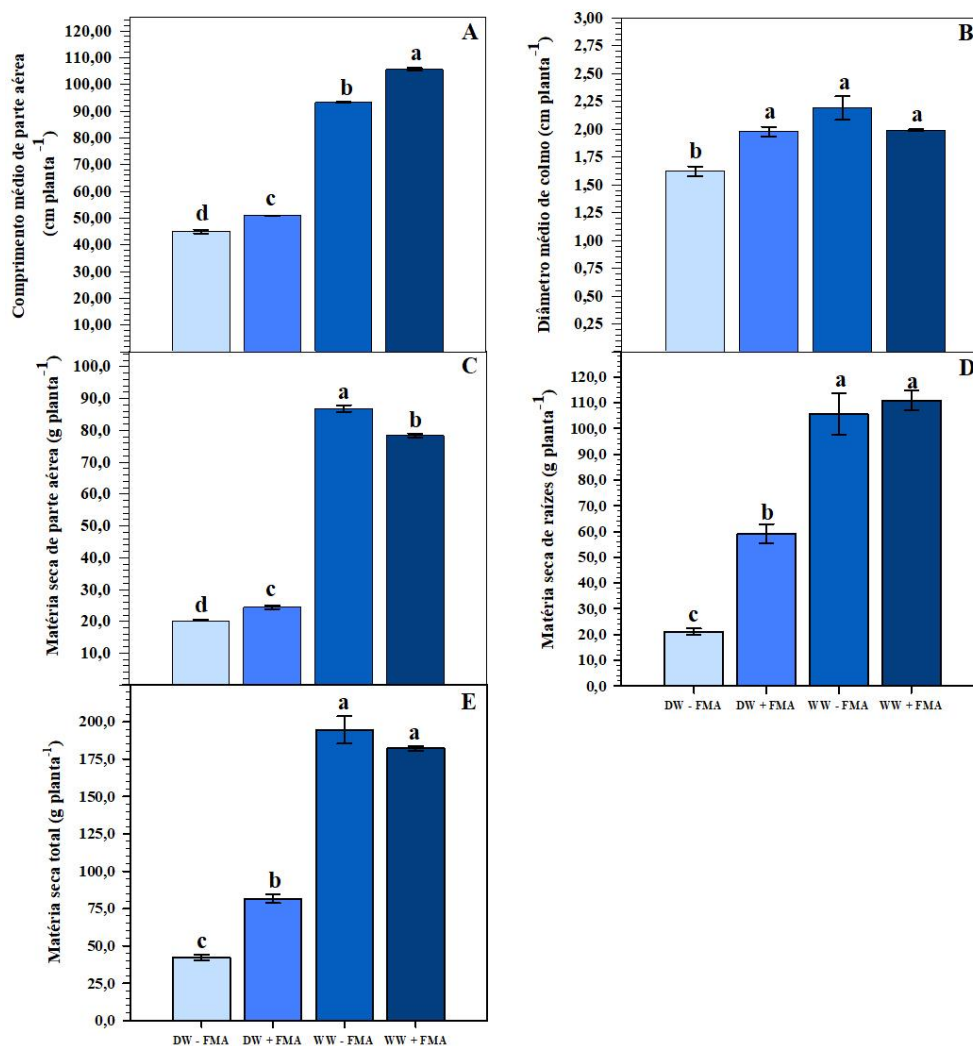


FIGURA 7 – Comprimento médio de parte aérea (A), diâmetro médio de colmo (B), matéria seca de parte aérea (C), matéria seca de raiz (D) e matéria seca total (E) de plantas de milho em presença e ausência de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. As barras representam o erro padrão da média (SEM)($n = 4$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey. WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW - FMA (plantas com déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); DW + FMA (plantas com déficit hídrico na presença de FMA).

Em condições irrigadas, as plantas tiveram dependência micorrízica negativa (-6,8%). Por outro lado, em condições de déficit hídrico, a dependência micorrízica aumentou para 48,2% (Tabela 2).

TABELA 2 – Dependência micorrízica (%) de plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos sob diferentes regimes hídricos

Tratamentos	Dependência micorrízica (DM %) ¹
WW + FMA	- 6,7645
DW + FMA	48,2477

¹DM= [(peso seco de plantas inoculadas – peso seco de plantas não inoculadas) /peso seco de plantas inoculadas] x 100. WW = Plantas irrigadas; DW= plantas sob déficit hídrico.

Na análise de componentes principais, os dois primeiros (Dim1 e Dim2) foram suficientes para explicar 77,9% da variação total dos dados (Figura 8).

O primeiro componente (Dim1), 42.1% da variação, separou os tratamentos com base no regime hídrico. À direita no gráfico (escores positivos em Dim1), agruparam-se os tratamentos irrigados (WW + FMA e WW - FMA), que foram correlacionados com as variáveis de alto crescimento e atividade fisiológica, como altura de planta (Altura), matéria seca da parte aérea (PA), diâmetro do colmo (Diâmetro), taxa fotossintética (*A*) e potencial hídrico (Ψ_w). À esquerda (escores negativos em Dim1), posicionaram-se os tratamentos sob déficit hídrico.

O segundo componente (Dim2), explicando 35,8% da variação, discriminou o efeito da inoculação. O tratamento DW + FMA (quadrante superior esquerdo) formou grupo distinto, caracterizado pela sua correlação com as variáveis de aclimação e proteção, como a razão raiz/parte aérea (R:PA), NPQ, qN e colonização micorrízica (Colon). Em contraste, o tratamento DW - FMA (quadrante inferior esquerdo) isolou-se dos demais, caracterizando-se pelos menores valores na maioria das variáveis de crescimento e fisiologia, confirmando ser a condição de maior estresse para as plantas.

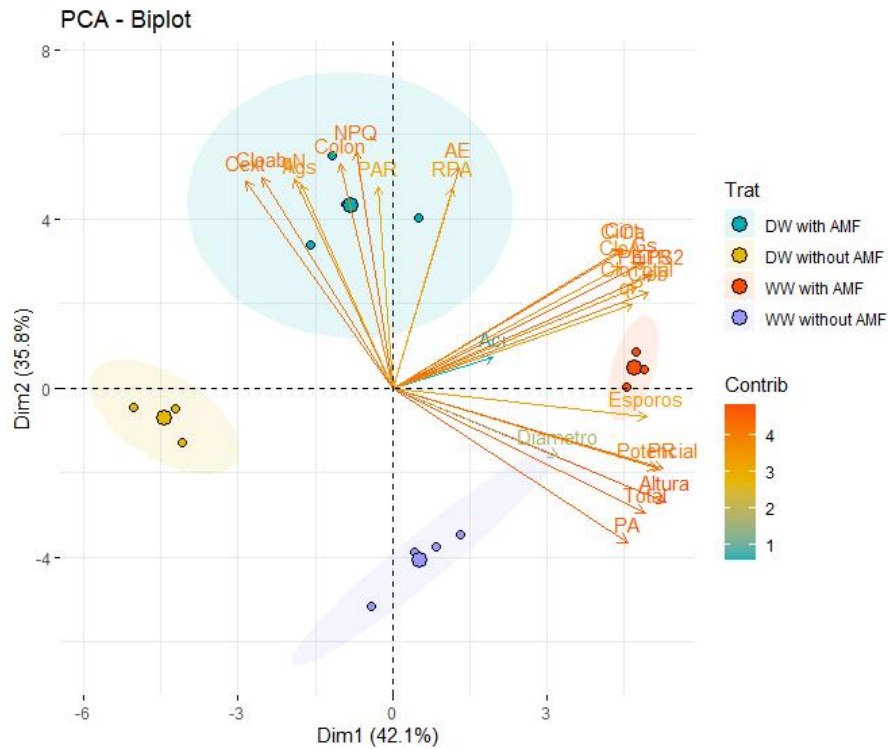


FIGURA 8 – Análise de componentes principais de primeira e segunda dimensão de plantas de milho em presença e ausência de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); DW - FMA (plantas com déficit hídrico na ausência de FMA); WW + FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); DW + FMA (plantas com déficit hídrico na presença de FMA).

A *path analysis* demonstra as variáveis de maior correlação com a matéria seca total de plantas como resposta final. A linha contínua azul demonstra o efeito direto (variável → matéria seca total) e vermelha tracejada o efeito indireto (variável → variável → matéria seca total) (Figura 9).

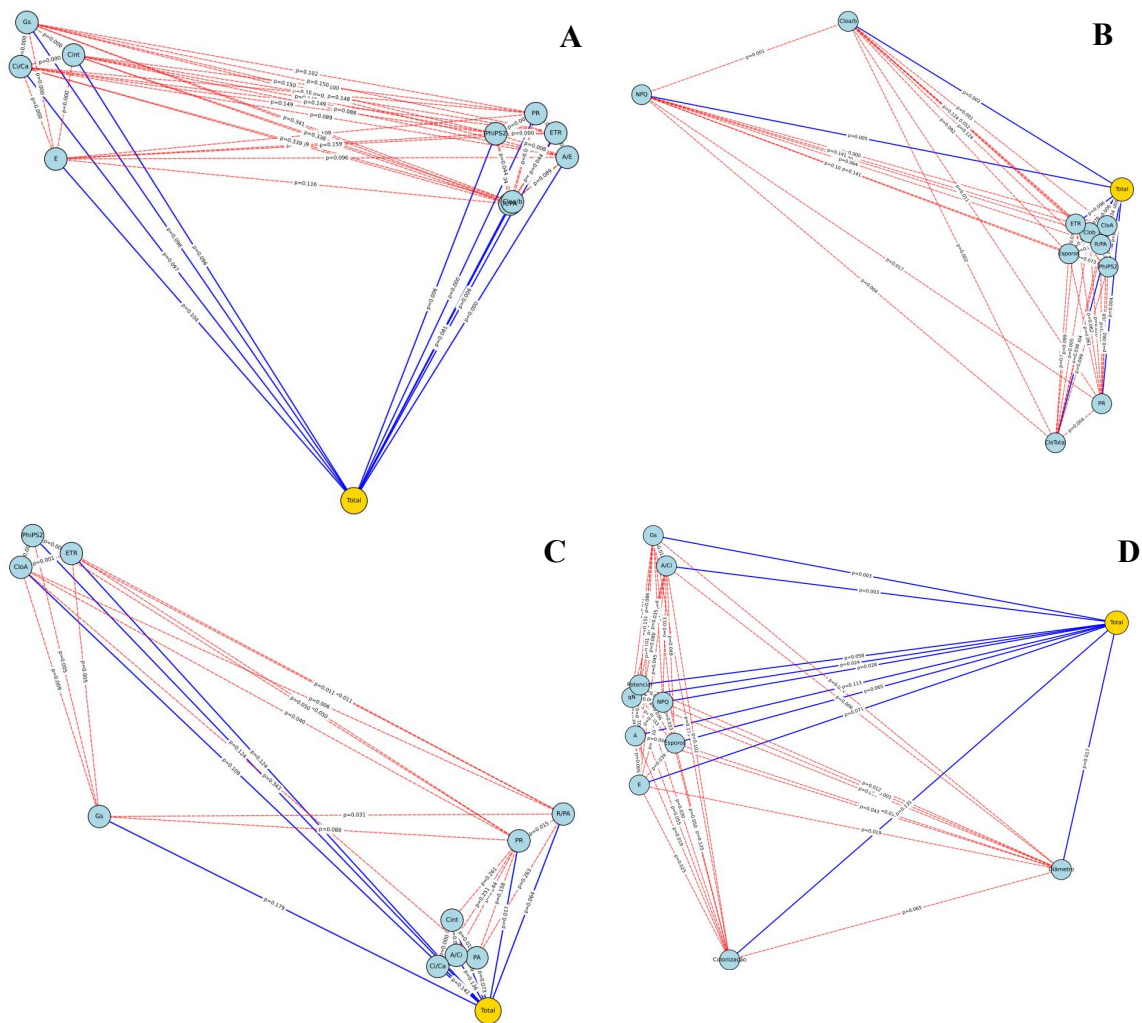


FIGURA 9 – Diagrama de path analysis demonstrando efeitos diretos (variável–matéria seco total/ setas azuis, linha contínua) e indiretos (variável–variável/ setas vermelhas, linha tracejada) entre variáveis e matéria seca total (Total) de plantas de milho em presença e ausência de inoculação de fungos micorrízicos arbusculares submetidas a ciclos de déficit hídrico. A) WW - FMA (plantas irrigadas na ausência de FMA); B) DW - FMA (plantas com déficit hídrico na ausência de FMA); C) WW + FMA (plantas irrigadas na presença de FMA); D) DW + FMA (plantas com déficit hídrico na presença de FMA).

No tratamento DW – FMA, peso seco de raiz ($p < 0,0001$), WUE ($p < 0,0001$), PhiPS2 (Φ PSII) ($p = 0,006$) e ETR ($p = 0,006$) obtiveram correlação positiva com matéria seca total. Em relação aos efeitos indiretos, ocorreu alta correlação entre PhiPS2 e ETR, e Ci/Ca e gs (Figura 9a). Em DW+AMF, clorofila total ($p < 0,0001$), peso seco de raiz ($p = 0,003$) e clorofila a ($p = 0,005$) tiveram correlação positiva com matéria seca total. De forma indireta, pigmentos e sistemas de fotoproteção (NPQ \rightarrow Clorofila a e b, Clorofila a \rightarrow b, Clorofila a/b \rightarrow NPQ) e variáveis fotoquímicas (ETR \rightarrow PhiPS2) estão fortemente ligados (Figura 9b)

Peso seco de raiz ($p = 0,017$) e parte aérea ($p = 0,073$) tiveram as maiores correlações com a matéria seca total no tratamento WW – FMA. Enquanto como efeitos indiretos, variáveis de fluorescência e eficiência fotoquímica (ETR \rightarrow PhiPS2) e eficiência de uso de carbono (V_{cmax} e C_i/C_a) tiveram alta correlação (Figura 9c). Para WW + FMA, diâmetro de colo ($p = 0,017$) teve alta correlação com matéria seca total. Nos efeitos indiretos, qN e NPQ, e Ψ_w e E se correlacionaram fortemente (Figura 9d).

5 DISCUSSÃO

A simbiose planta - fungo micorrízico arbuscular (formando a micorriza) durante ciclos de seca, através de mecanismos de proteção, atua em dois níveis: 1) aumento imediato da aquisição de água e nutrientes e 2) *priming* molecular e fisiológico, que acelera a ativação de defesas fotoquímicas e antioxidantes, resultando em maior tolerância de plantas de milho (Chandrasekaran, 2022; Oliveira *et al.*, 2022; Tavares *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025).

Para a formação da simbiose em condições de seca, a planta busca estabelecer uma interação com o fungo, por meio de uma quimiotaxia atraente (Hao *et al.*, 2019; Chareesri *et al.*, 2020; Tavares *et al.*, 2025), criando-se uma dependência funcional planta-FMA adaptativa ao ambiente (Tabela 2), estimulando a produção de esporos de FMA (Figura 2g) no solo e colonização das raízes (com presença de hifas, esporos, vesículas e arbúsculos) (Figura 2b e 3b), favorecendo a resiliência da planta hospedeira (Bahadur *et al.*, 2019).

O aumento da absorção de água proporcionada pela simbiose, ocorre devido à presença das hifas do fungo (Figura 3b) que favorecerem maior comprimento das raízes de milho (Figuras 7d) e volume de solo explorado durante ciclos de seca. Com isto, modifica a condutividade hidráulica radicular (Wahab *et al.*, 2023), melhora o potencial hídrico (Figura 2a), permite às plantas micorrizadas manterem a turgidez celular, proporcionando a abertura das células-guarda e, conseqüentemente, maior condutância estomática e transpiração (Figura 2d e 2e) (Begum *et al.*, 2019a; Cao *et al.*, 2024; Reyes-Ramirez *et al.*, 2025; Tang *et al.*, 2022).

Essa abertura estomática permite a entrada de CO₂, contribuindo diretamente para maiores taxas fotossintéticas em plantas inoculadas (Figura 2c) (Wang *et al.*, 2020). Em espécies C₄, como o milho, a manutenção de alta concentração interna de CO₂ aumenta a saturação da PEPcase, maximizando o ganho de carbono mesmo sob limitação hídrica (Almeida, 2024).

A regulação hídrica combinada à manutenção da taxa fotossintética proporciona melhor desempenho fisiológico de plantas de milho inoculadas submetidas a ciclos de déficit hídrico, alcançando maior eficiência do uso da água (WUE) e intrínseca (iWUE) (Figura 4a e 4b), e demonstra que a simbiose otimiza tanto a absorção de água quanto a assimilação de carbono em relação à água perdida (Chandrasekaran, 2024; Abdelaal; Alaskar; Hafez, 2024; Cruz, 2019).

Com incidência severa de seca (Tavares *et al.*, 2025) e/ou ocorrência de ciclos de déficit hídrico, os FMA modulam de forma rápida e integrada os mecanismos de defesa das plantas, em que as respostas fotoprotetoras e redutoras de dano oxidativo são ativadas prontamente em plantas inoculadas (Figura 9b) (Oliveira *et al.*, 2022). A presença das hifas dos fungos e extensão do volume de solo explorado, conseqüentemente, melhora a condutância do solo-raiz e absorção de água (1º nível dos mecanismos de proteção da simbiose) atrasa a severidade do déficit hídrico, dando tempo para que mecanismos fotoprotetores e bioquímicos sejam ativados (2º nível dos mecanismos de proteção da simbiose) (Abdalla, 2023; Chandrasekaran, 2024). A correlação de variáveis (Figura 8), com agrupamento distinto, associadas a aclimação e proteção fotossintética (NPQ, qN e pigmentos fotossintéticos) reforça a importância da inoculação de FMA para plantas de milho submetidas a ciclos de déficit hídrico (DW + FMA).

A ativação dos mecanismos de proteção fotoquímica em plantas de milho inoculadas com FMA e submetidas a ciclos de déficit hídrico, inicia-se com o aumento da dissipação de energia não-fotoquímica (NPQ) (Figura 5c) e coeficiente de extinção não-fotoquímica (qN) (Figura 5e). Essa regulação fotoprotetora nas plantas de milho integra-se a manutenção do aparato fotossintético (clorofila *a* e *b*), balanço entre os pigmentos fotossintéticos (Figura 6) e transporte de elétrons (ETR) (Figura 5b), mantendo a fotossíntese funcional e com maior capacidade de dissipação do excesso de energia (Figura 9b). Além, da forte ligação ETR → PhiPS2 (ΦPSII) (Figura 9b) demonstrar sistema fotoquímico funcional, em que a inoculação com FMA ajuda a manter a eficiência de transporte de elétrons, enquanto ajustes no balanço de pigmentos e NPQ definem se essa energia é utilizada na fotossíntese ou dissipada (Ruban, 2020; Begum *et al.*, 2019b).

Essa resposta fotoprotetora integrada em plantas de milho inoculadas, com FMA submetidas a ciclos de déficit hídrico, previne danos foto-oxidativos, sendo acompanhada por maiores valores de ΦPSII e ETR (Figura 5) demonstrando manutenção dos centros de reação fotossintéticos, mesmo quando a energia luminosa exceda a capacidade de uso fotossintético (Almeida, 2024; Huang *et al.*, 2024; Santana *et al.*, 2023). A inoculação de FMA em outras

culturas sob seca evidência a manutenção da eficiência de Φ PSII e maior NPQ como mecanismo de tolerância (Huang *et al.*, 2024; Hu; Xie; Chen, 2020), sendo um mecanismo dinâmico de dissipação de energia que protege o PSII durante períodos de excesso de excitação luminosa (Begum *et al.*, 2019a; Almeida, 2024).

Com esses mecanismos de proteção integrados em diferentes níveis, plantas de milho inoculadas com FMA e submetidas a ciclos de déficit hídrico têm maior matéria seca total de plantas, evidenciando que os ganhos fisiológicos são convertidos em crescimento e produção de biomassa, em comparação a plantas sob a mesma condição não inoculadas (Figura 7e). A razão C_i/C_a (Figura 2f), parâmetro indicativo da disponibilidade interna de CO_2 , é superior nas plantas de milho inoculadas em condições de déficit hídrico e irrigado, demonstrando que a simbiose micorrízica em condições adversas reduz a perda de assimilação de carbono. Essa associação permite uma troca gasosa mais eficiente, refletida nas maiores taxas de transpiração e fotossíntese (Figura 2) (Pacheco; Lazzarini; Alvarenga, 2021; Wang *et al.*, 2020), reforçando que, em ambientes limitantes, os benefícios da simbiose superam os custos metabólicos (Smith; Read, 2008; Frew, 2023).

Na ausência de inoculação e condição irrigada, o carbono fixado é direcionado preferencialmente à estruturas de reserva, como o colmo (Figura 7b) em plantas de milho, enquanto na presença de FMA, parte do carbono é destinado à manutenção do simbionte e desenvolvimento de tecidos fotossintéticos, como folhas, com isto, indicando diferenças na alocação do carbono de acordo com a condição ambiental e biota do solo (Smith; Read, 2008; Frew, 2023). Em condições de seca, a inoculação favorece o crescimento radicular (Figura 7d). Essa alocação de recursos faz parte dos mecanismos de proteção adaptativos (1º nível) que ocorrem com a inoculação de FMA (Figura 9b) (Folli-Pereira *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2022).

Diante das perspectivas de aumento da frequência e intensidade dos períodos de seca, o uso estratégico de FMA em híbridos de milho representa uma alternativa biotecnológica promissora para ativação de mecanismos de proteção em diferentes níveis, melhorando a absorção e eficiência do uso da água, mantendo as taxas fotossintéticas e otimização da alocação de recursos, configurando-se como ferramenta essencial, para aumento da tolerância das plantas, sustentabilidade e segurança alimentar com a manutenção da produtividade frente às mudanças climáticas.

6 CONCLUSÕES

Diante da pesquisa realizada e da condução do experimento chegou às seguintes conclusões:

A associação simbiótica entre milho e fungos micorrízicos arbusculares sob ciclos de déficit hídrico promove a ativação de mecanismos de proteção das plantas em diferentes níveis.

Plantas de milho inoculadas com FMA sob ciclos de déficit hídrico, possuem: maior peso seco de raízes, potencial hídrico foliar, uso eficiente da água, mantêm a integridade do aparato fotossintético, dissipação controlada de energia e elevadas taxas de fotossíntese, transpiração e condutância estomática.

Sob ciclos de restrição hídrica, ocorre maior colonização micorrízica, dependência micorrízica funcional adaptativa e funcionalidade da simbiose.

A inoculação com FMA mostra-se uma estratégia eficaz para aumentar a tolerância de plantas de milho a ciclos de déficit hídrico mantendo o crescimento das plantas e acúmulo de biomassa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M. *et al.* The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in improving plant water status under drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, n. 16, p. 4808-4824, 2 set. 2023. Disponível em: doi.org/10.1093/jxb/erad249. Acesso em: 17 dez. 2025.

ABDELAAL, K.; ALASKAR, A.; HAFEZ, Y. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological, bio-chemical and yield characters of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) under drought stress conditions. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1119, 2024. Disponível em: doi.org/10.1186/s12870-024-05824-9. Acesso em: 17 dez. 2025.

ALMEIDA, R. L. de. **Photosynthesis and photoprotection in C4 species**. 2024. 1 recurso online (126 p.) Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP. Disponível em: [20.500.12733/27830](https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1456407). Acesso em: 17 dez. 2025. Disponível em: <https://www.repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1456407>. Acesso em: 17 dez. 2025.

ARTUZO, F. D. *et al.* O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. **Revista em agronegócio e meio ambiente**, v. 12, n. 2, p. 515-540, 2019. Disponível em: Acesso em: 17 dez. 2025.

AVILA, R. *et al.* Drought-tolerant maize genotypes invest in root system and maintain high harvest index during water stress. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 3, p. 450-460, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n3p450-460>. Acesso em: 17 dez. 2025.

AZRAI, M. *et al.* Global drought tolerant maize research and development: Analysis and visualization of cutting-edge scientific technologies. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101323, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101323>. Acesso em: 17 dez. 2025.

BAHADUR, A. *et al.* Mechanistic Insights into Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Drought Stress Tolerance in Plants. **Int J Mol Sci**. V. 27, ed. 20, p. 4199, 2019. Disponível em: doi: 10.3390/ijms20174199. PMID: 31461957; PMCID: PMC6747277. Acesso em: 17 dez. 2025.

BERGAMASCHI, H. *et al.* Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 831-839, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000900001>. Acesso em: 17 dez. 2025.

BERGONCI, J. I. *et al.* Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 949-956, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000700004>. Acesso em: 17 dez. 2025.

BEGUM, N. *et al.* Improved Drought Tolerance by AMF Inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. **Plants**, v. 8, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants8120579>. Acesso em: 17 dez. 2025.

BEGUM, N. *et al.* Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. **Frontiers in plant science**, v. 10, n. 1068, 2019b. Disponível em: doi: 10.3389/fpls.2019.0106. Acesso em: 17 dez. 2025.

BILGER, W.; SCHREIBER, U.; BOCK, M. Determination of the quantum efficiency of photosystem II and of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. **Oecologia** 102:425–432, 1995. Disponível em: doi: 10.1007/BF00341354. Acesso em: 17 dez. 2025.

CAO, Y. *et al.* An Integrated Framework for Drought Stress in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 17, p. 9347, 2024. Disponível em: doi.org/10.3390/ijms25179347. Acesso em: 17 dez. 2025.

CHANDRASEKARAN, M. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in refining plant photosynthesis and water status under drought stress: a meta-analysis. **Plant, Soil and Environment**, 2024. Disponível em: doi: 10.17221/27/2024-pse. Acesso em: 17 dez. 2025.

CHAREESRI, A. *et al.* Increased arbuscular mycorrhizal fungal colonization reduces yield loss of rice (*Oryza sativa* L.) under drought. **Mycorrhiza**. V. 30, p. 315-328, 2020. Disponível em: doi: 10.1007/s00572-020-00953-z. Acesso em: 17 dez. 2025.

CRUZ, J. C. Cultivo do Milho. **Embrapa Milho e Sorgo Sistemas de Produção**, v. 2, Versão Eletrônica - 6ª edição, 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/27037/1/Plantio.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2025.

CRUZ, R. de S. **Crescimento e respostas fisiológicas de coffea arabica inoculado com fungos micorrízicos arbusculares e adubado com fosfato de liberação lenta**. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.25186/cs.v15i.1641>. Acesso em: 17 dez. 2025.

DAO, A. *et al.* Heterotic relationship between INERA, CIMMYT and IITA maize inbred lines under drought and well-watered conditions. **Maydica**, v. 59, p. 201–210, 2014. Disponível em: file:///C:/Users/Admin/Downloads/mamoriello,+Journal+manager,+59_201.pdf. Acesso em: 17 dez. 2025.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um sistema de análise computadorizada para projetos do tipo split plot de efeitos fixos. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>. Acesso em: 17 dez. 2025.

FOLLI-PEREIRA, M. da S. *et al.* Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1663-1679, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600001>. Acesso em: 17 dez. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (FAO). **Tracking adaptation in agricultural sectors: Climate change adaptation indicators**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ai8145e.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

FREW, A. Water availability alters the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi and determines plant mycorrhizal benefit. **Plants, People, Planet**, v. 5, ed. 5, 2023. Disponível em: [doi:10.1002/ppp3.10372](https://doi.org/10.1002/ppp3.10372). Acesso em: 17 dez. 2025.

GERDEMANN, J.W.; NICOLSON, T.H. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transaction of British Mycological Society**, v. 6, p. 234-244, 1963. Disponível em: <https://www.scielo.sa.cr/scieloOrg/php/reflinks.php?refpid=S0034-7744201400040002700017&lng=pt&pid=S0034-77442014000400027>. Acesso em: 17 dez. 2025.

GRACE, J. B. **Structural Equation Modeling and Natural Systems**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511617799>. Acesso em: 17 dez. 2025.

GUIMARÃES, P. S. *et al.* Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, Joacaba, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019. Disponível em: <https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/evidencia/article/view/20201>. Acesso em: 23 nov. 2025.

HAO, Z., *et al.* Fungo micorrízico arbuscular melhora a simbiose entre mudas de *Rhizobium e Glycyrrhiza* sob estresse hídrico. **Agronomy**, v. 9, ed.10, p. 572, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy9100572>. Acesso em: 17 dez. 2025.

HU, Y. *et al.* Arbuscular mycorrhiza improved drought tolerance of maize seedlings by altering photosystem II efficiency and the levels of key metabolites. **Chem. Biol. Technol. Agric.**, v. 7, p. 20, 2020. Disponível em: doi.org/10.1186/s40538-020-00186-4. Acesso em: 17 dez. 2025.

HUANG, C. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi reduce photosystem damage caused by water stress in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. **PLoS ONE**, v. 19, n. 4, p. e0294394, 2024. Disponível em: doi.org/10.1371/journal.pone.0294394. Acesso em: 17 dez. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report**: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. **R Package Version**, v. 1, p. 337–354, 2020. Disponível em: <https://rpkgs.datanovia.com/factoextra/index.html>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KAUSHAL, M.; WANI, S. P. Plant-growth-promoting rhizobacteria: Drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands. **Annals of Microbiology**, v. 66, n. 1, p. 35-42, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13213-015-1112-3>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KHAN, Y. *et al.* Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Abiotic Stress Tolerance: Emerging Roles in Nutrient Exchange, Antioxidant Defence, and Hormonal Crosstalk. **Plant Stress**, p. 101068, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101068>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KLINE, R. B. **Principles and Practice of Structural Equation Modeling** (4th ed.). The Guilford Press, New York, NY, USA, 2016.

KOSKEY, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycological Research**, 92:486-505, 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9). Acesso em: 17 dez. 2025.

KUMAR, S. *et al.* Drought stress mitigation through bioengineering and biostimulants: evidence of antioxidant induction. **Physiologia Plantarum**, 2024. Disponível em: [doi: 10.1016/j.crmicr.2024.100285](https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100285). Acesso em: 17 dez. 2025.

LAISK, A.; LORETO, F. Determining photosynthetic parameters from leaf CO₂ exchange and chlorophyll fluorescence. **Plant Physiology**, 110:903–912, 1996. Disponível em: [doi: 10.1104/pp.110.3.903](https://doi.org/10.1104/pp.110.3.903). Acesso em: 17 dez. 2025.

LASKARI, M. *et al.* Water stress effects on the morphological, physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.), and on environmental cost. **Agronomy**, v. 12, n. 10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102386>. Acesso em: 17 dez. 2025.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. Facto MineR: an R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1–18, 2008. Disponível em: doi: 10.18637/jss.v025.i01. Acesso em: 17 dez. 2025.

LI, H. *et al.* Drought-Induced Coordination of Photosynthesis, Stomata, and Hydraulics in Maize Leaves Between Sensitive and Tolerant Varieties. **Physiologia Plantarum**, v. 177, n. 5, p. e70487, 2025. Disponível em: doi.org/10.1111/pp1.70487. Acesso em: 17 dez. 2025.

LI, J. *et al.* Arbuscular Mycorrhizal Fungi Alleviate Drought Stress in C3 (*Leymus chinensis*) and C4 (*Hemarthria altissima*) Grasses via Altering Antioxidant Enzyme Activities and Photosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00499. Acesso em: 17 dez. 2025.

LIU, X. *et al.* Exogenous myristate promotes the colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in tomato. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023, p. 1250684. Disponível em: doi.org/10.3389/fpls.2023.1250684. Acesso em: 17 dez. 2025.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Sete Lagoas. circular técnica n 76, 2006. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/490408. Acesso em: 17 dez. 2025.

MAGALHÃES, P. C. *et al.* Fisiologia do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Sete Lagoas. circular técnica n 22, 2002. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/486995. Acesso em: 17 dez. 2025.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F.O.M.; PAIVA, E. Fisiologia da planta de milho. Sete Lagoas: **EMBRAPA-CNPMS**, 1995. 27 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 20). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/475778. Acesso em: 17 dez. 2025.

MELLONI, R. *et al.* Formação de micorriza em variedades de oliveira (*Olea europaea* L.) com potencial de cultivo em Minas Gerais. **Ciência Florestal**. v. 30, n. 4, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5902/1980509838781. Acesso em: 17 dez. 2025.

OLIVEIRA, T. C. *et al.* The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants. **Scientific Reports**, v. 12, p. 1–15, 2022. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-022-13059-7. Acesso em: 17 dez. 2025.

McGONIGLE, T. P. *et al.* A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, v. 115, n. 3, p. 495-501, 1990. Disponível em: doi: 10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x. Acesso em: 17 dez. 2025.

PACHECO, F.; LAZZARINI, L.; ALVARENGA, I. Metabolismo relacionado com a fisiologia dos estômatos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 18, n. 36, 2021. Disponível em: doi: 10.18677/EnciBio_2021B14. Acesso em: 17 dez. 2025.

- PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 55, n. 1, p. 158-161. 1970. Disponível em: [https://indexfungorum.org/Publications/TBMS/55/55\(1\)158-161.pdf](https://indexfungorum.org/Publications/TBMS/55/55(1)158-161.pdf). Acesso em: 17 dez. 2025.
- PLENCHETTE, C.; FORTIN, J.A.; FURLAN, V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. **Plant and Soil**, v.70, p.199-209, 1983. Disponível em: 10.1007/BF02374780. Acesso em: 17 dez. 2025.
- REYES-RAMIREZ, A. et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the physiology and mineral content of maize crop. **Agroecosistemas Tropicales e Subtropicales**, v. 28, n. 3, set. 2025. Disponível em: <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/6152>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- RUBAN, A. V. Light harvesting control in plants. **FEBS letters**, v. 592, n. 18, p. 3030-3039, 2018. Disponível em: 10.1002/1873-3468.13799. Acesso em: 17 dez. 2025.
- SANTANA, L. R. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi associated with maize plants during hydric deficit improve recovery and protect photosynthetic apparatus. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1519, 2023. Disponível em: doi.org/10.1038/s41598-023-28744-4. Acesso em: 17 dez. 2025.
- SCHOLANDER, P. E. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v. 148, n. 3668, p. 339-46, 1965. Disponível em: [doi: 10.1126/science.148.3668.339](https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339). Acesso em: 17 dez. 2025.
- SHEORAN, S. . *et al.* Recent Advances for Drought Stress Tolerance in Maize (*Zea mays* L.): Present Status and Future Prospects. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.872566>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- SIMPKINS, G. Corn sensitivity to drought. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 625, 2020. Disponível em: doi.org/10.1038/s43017-020-00117-9. Acesso em: 17 dez. 2025.
- SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. 3rd ed. Califórnia: Academic Press. p. 605, 2008.
- TANG, H. *et al.* The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- TAVARES, G.G. *et al.* Morpho-physiological traits of soybean plants in symbiosis with *Gigaspora* sp. and submitted to water restriction. **Scientific Reports**, v. 15, n. 7133, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92024-6>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- TEAM, R. C. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for **Statistical Computing**, 2016. Disponível em: <http://www.r-project.org>. Acesso em: 17 nov. 2025.

WAHAB, A. *et al.* Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, and Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic and Biotic Stresses. **Plants**, v. 12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12173102>. Acesso em: 17 dez. 2025.

WANG, H. *et al.* Arbuscular Mycorrhizas Regulate Photosynthetic Capacity and Antioxidant Defense Systems to Mediate Salt Tolerance in Maize. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1430, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants911430>. Acesso em: 17 dez. 2025.

WANG, Q. *et al.* The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant abiotic stress. **Frontiers in Microbiology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1323881>. Acesso em: 17 dez. 2025.

WILKES, T. I. Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Agriculture. **Encyclopedia**, v. 1, ed. 4, 2021.

YANG, X.; WANG, Z.; LI, J.; STRUIK, P.; JIANG, S.; JIN, K.; MU, H. How do arbuscular mycorrhizal fungi enhance drought resistance of *Leymus chinensis*?. **BMC Plant Biology**, v. 25, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06412-1>. Acesso em: 17 dez. 2025.

YUAN, X. *et al.* Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. **Agronomy**, Basel, v. 14, n. 7, p. 1360, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>. Acesso em: 17 dez. 2025.