



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCÊNCIAS**

IZABELLE SENA CORRÊA BIBIANO

**INTERAÇÃO ENTRE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E MUDAS DE
JATOBÁ (*Hymenaea courbaril* L.) SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO**

**SANTARÉM – PA
2024**

IZABELLE SENA CORRÊA BIBIANO

**INTERAÇÃO ENTRE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E MUDAS DE
JATOBÁ (*Hymenaea courbaril* L.) SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biociências da Universidade Federal do Oeste do Pará, como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Dávia Marciana Talgatti
Coorientador: Prof. Dr. Túlio Silva Lara

SANTARÉM – PA
2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

B581i Bibiano, Isabelle Sena Corrêa
Interação entre fungos micorrízios arbusculares e mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) submetidas ao déficit hídrico./ Isabelle Sena Corrêa Bibiano. -Santarém, 2024.
59 p. : il.
Inclui bibliografias.

Orientadora: Dávia Marciana Talgatti.

Coorientador: Túlio Silva Lara.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica, Programa de Pós-Graduação em Biociências.

1. FMA - Fungos Micorrízicos Arbusculares. 2. Espécie florestal 3. Estresse hídrico. 4. Simbiose. 5. Amazônia. I. Talgatti, Dávia Marciana, *orient.* II. Lara, Túlio Silva, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 571.295

Bibliotecária - Documentalista: Cátia Alvarez – CRB/2 843



Universidade Federal do Oeste do Pará
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCÊNCIAS

ATA N° 1

Aos vinte e oito dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14h30min, em reunião virtual, via Google Meet, instalou-se a banca examinadora de dissertação de mestrado da aluna IZABELLE SENA CORREA BIBIANO. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. ELCIO MEIRA DA FONSECA JUNIOR, IBEF-Ufopa, examinador externo, Dr. RENATO DA SILVA BANDEIRA, PPG-Biociências-Ufopa, examinador interno, e Dra. DÁVIA MARCIANA TALGATTI, PPG Biociências-Ufopa, presidente da banca e orientadora, também esteve presente o Dr. TULIO SILVA LARA, coorientador da dissertação. Deu-se início a abertura dos trabalhos, por parte da professora Dávia Marciana Talgatti, presidente da banca, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou a candidata que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada **INTERAÇÃO ENTRE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E MUDAS DE JATOBÁ (*Hymenaea courbaril* L.) SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO**, marcando um tempo de 40 minutos para a apresentação. Concluída a exposição, a Profa. Dávia Marciana Talgatti, presidente, passou a palavra ao examinador externo, Prof. ELCIO MEIRA DA FONSECA JUNIOR, para arguir a candidata, e, em seguida, o examinador interno, Prof. RENATO DA SILVA BANDEIRA para que fizesse o mesmo; após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido aprovada a candidata, conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Oeste do Pará. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora. Conforme o regimento interno do programa a candidata não terá o título se não cumprir as exigências apontadas pela banca e se não cumprir as demais exigências contidas no Regimento do PPG Biociências.

Documento assinado digitalmente
ELCIO MEIRA DA FONSECA JUNIOR
Data: 28/02/2024 14:37:56-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. ELCIO MEIRA DA FONSECA JUNIOR, UFOPA

Examinador Externo ao Programa

Documento assinado digitalmente
RENATO DA SILVA BANDEIRA
Data: 01/03/2024 10:03:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. RENATO DA SILVA BANDEIRA, UFOPA

Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
DAVIA MARCIANA TALGATTI
Data: 28/02/2024 17:11:55-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. DAVIA MARCIANA TALGATTI, UFOPA

Presidente

Documento assinado digitalmente
IZABELLE SENA CORREA BIBIANO
Data: 01/03/2024 10:25:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

IZABELLE SENA CORRÊA BIBIANO

Mestranda

Aos meus pais, Elisangela e Domingos.
Por todo incentivo, amor, dedicação e por acreditar no meu potencial

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela vida e seus ensinamentos;

Aos meus pais, Elisangela Sena e Domingos Moreira, por acreditarem e incentivarem sempre a continuar. Obrigada por tudo e por tanto!

Aos meus irmãos Alisson e Lucas, por todo carinho e apoio!

À minha esposa, Ananda Pacheco por estar comigo nas melhores e piores fases da vida, por me acalmar e ser o meu lar, obrigada!

À minha orientadora, Dr. Dávia Marciana Talgatti, pela oportunidade, confiança e orientação, muito obrigada!

Ao meu co-orientador, Dr. Túlio Silva Lara, pela confiança, respeito e paciência nos ensinamentos. Meus sinceros agradecimentos!

Ao Laboratório de Fisiologia Vegetal e Crescimento de Plantas (LaFV), pela disponibilização do espaço e equipamento para realização da pesquisa, assim como membros do grupo de Pesquisa LaFV, Ludyanne Sousa, Frank Farias, Iago Lima, Rita de Cássia e Andria Pereira.

Ao laboratório de Algas e Plantas da Amazônia (LAPAM) e equipe, pelo acolhimento e carinho durante a pesquisa.

À graduanda de Biologia, Letícia Silva, por estar presente nas etapas do projeto e momentos de descontração, muito obrigada!

Ao Dr. Marcos Dione, obrigada pelas questões relacionadas aos FMA, e pelas boas risadas.

Ao Laboratório de Sementes Florestais, pelo auxílio nas coletas de sementes deste estudo e pela amizade, em especial, ao Prof. Dr. Everton Almeida e Anselmo Araujo, muito obrigada!

Aos amigos, Luana Brandão, Vanessa Peleja, Euler Paixão, Daniely Moreira e Vaneska Silva pelos momentos de descontração e conselhos.

À Universidade Federal do Oeste do Pará, ao Programa de Pós-Graduação em Biociências pela realização do curso.

À FAPESPA pela bolsa concedida durante o período do curso.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a finalização deste trabalho.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.
(Marthin Luther King)

RESUMO

A espécie nativa *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) possui ampla ocorrência na Amazônia, sua madeira é apreciada pela indústria madeireira e, pelos povos e comunidades tradicionais que utilizam a casca, frutos, sementes, seiva e as folhas como medicinais. Contudo, fatores climáticos, como períodos de estiagem mais prolongados e frequentes são possíveis ameaças para o desenvolvimento inicial dessa espécie. No entanto, diversos estudos demonstram que a relação simbiótica dos Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) com as plantas promove um aumento na tolerância dos vegetais a diferentes estresses, como o déficit hídrico. A pesquisa tem como objetivo avaliar parâmetros fisiológicos e bioquímicos de mudas de *Hymenaea courbaril* L. inoculadas com FMA em diferentes regimes hídricos. O estudo foi executado no viveiro florestal da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) na Unidade Santana. As sementes foram colocadas para germinar em tubetes contendo substrato comercial e colocadas para germinar em sombreamento a 70% no viveiro. As plântulas foram transplantadas para vasos de 5 litros e preenchidas com substrato comercial autoclavado. Os tratamentos consistiram em: 1. condição ideal de irrigação (80% da capacidade de campo), 2. déficit hídrico moderado (50% da capacidade de campo) e 3. déficit hídrico severo (25% da capacidade de campo); na presença e ausência dos FMA; totalizando 6 tratamentos, 8 repetições e, 48 vasos. Dessa forma, metades dos vasos foram inoculados com FMA, e a outra metade não. Foram realizadas as análises de crescimento, altura, diâmetro do coleto, número de folhas, área foliar, comprimento da raiz, volume da raiz; além de análises sobre a simbiose como densidade de esporos, porcentagem de colonização da raiz, além de análises fisiológicas e bioquímicas. Os dados coletados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk e as médias agrupadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As mudas de *H. courbaril* apresentaram mudanças no crescimento e no metabolismo bioquímico na presença dos FMA, as concentrações de clorofilas e carotenóides não foram influenciadas, e os fungos promovem benefícios no crescimento, nutrição e reservas de carboidratos na planta, provando que as micorrizas podem ser usadas para aumentar a tolerância das plantas de jatobá sob déficit hídrico. Conclui-se que as plantas com micorrizas, observou-se maior crescimento inicial, melhor absorção de fósforo, tendência no aumento as reservas de carboidratos e osmorregulação pode ser controlado pela prolina e aminoácidos.

Palavras-chave: FMA, espécie florestal, estresse hídrico, simbiose, Amazônia.

ABSTRACT

The native species *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) has a wide occurrence in the Amazon, its wood is appreciated by the timber industry and by traditional peoples and communities that use the bark, fruits, seeds, sap and leaves as medicines. However, climatic factors, such as longer and more frequent dry periods, are possible threats to the initial development of this species. However, several studies demonstrate that the symbiotic relationship between Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and plants promotes an increase in plant tolerance to different stresses, such as water deficit. The research aims to evaluate physiological and biochemical parameters of *Hymenaea courbaril* L. seedlings inoculated with AMF in different water regimes. The study was carried out in the forestry nursery of the Federal University of Western Pará (UFOPA) in the Santana Unit. The seeds were placed to germinate in tubes containing commercial substrate and placed to germinate in 70% shade in the nursery. The seedlings were transplanted into 5-liter pots and filled with autoclaved commercial substrate. The treatments consisted of: 1. ideal irrigation condition (80% of field capacity), 2. moderate water deficit (50% of field capacity) and 3. severe water deficit (25% of field capacity); in the presence and absence of the FMA; totaling 6 treatments, 8 replications and 48 pots. In this way, half of the pots were inoculated with AMF, and the other half were not. Analyzes of growth, height, stem diameter, number of leaves, leaf area, root length, root volume were carried out; in addition to analyzes on symbiosis such as spore density, percentage of root colonization, as well as physiological and biochemical analyses. The collected data were subjected to the Shapiro-Wilk test and the means grouped using the Tukey test at 5% probability. The *H. courbaril* seedlings showed changes in growth and biochemical metabolism in the presence of AMF, the concentrations of chlorophylls and carotenoids were not influenced, and the fungi promote benefits in growth, nutrition and carbohydrate reserves in the plant, proving that mycorrhizae can be used to increase the tolerance of Jatobá plants under water deficit. It is concluded that plants with mycorrhizae have greater initial growth, better phosphorus absorption, a tendency to increase carbohydrate reserves and osmoregulation can be controlled by proline and amino acids.

Keywords: AMF, forest species, water stress, symbiosis, Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 -	Mapa de ocorrência de <i>Hymenaea courbaril</i> L.	15
Figura 2 -	Croqui da área experimental com a distribuição dos tratamentos.....	22
Figura 3 -	Altura observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	27
Figura 4 -	Número de folhas observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	28
Figura 5 -	Área foliar observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	29
Figura 6 -	Diâmetro do coleto observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	29
Figura 7 -	Comprimento radicular observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA...	30
Figura 8 -	Volume das raízes observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA...	31
Figura 9 -	Biomassa da folha, caule e raiz observado em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	32
Figura 10	Figura 10: Proteína do solo relacionado a glomalina (PSRG-FE) em plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	35
Figura 11 -	Açúcar solúveis totais em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	39
Figura 12 -	Açúcar redutor em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA..	40
Figura 13 -	Concentração de sacarose em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	41
Figura 14 -	Concentração de amido em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	43
Figura 15 -	Concentração de amônio em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	44
Figura 16 -	Concentração de Nitrato em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	45
Figura 17 -	Concentração de aminoácidos solúveis totais em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	48
Figura 18 -	Concentração de Prolina em folhas e raízes de plantas de <i>H. courbaril</i> submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA.....	49

LISTA DE TABELA

Tabela 1 -	Atributos químicos do solo utilizados como substrato no experimento.....	22
Tabela 2 -	Teores de macronutrientes (g.kg-1) e de micronutrientes (mg.kg-1) na matéria seca da parte aérea de plantas de jatobá (<i>H. courbaril</i>), na presença e na ausência de FMA sob diferentes regimes hídrico.....	34
Tabela 3 -	Determinação dos teores de clorofilas e carotenóides em folhas de plantas de jatobá (<i>H. courbaril</i>), na presença e na ausência de FMA sob diferentes regimes hídrico.....	36
Tabela 4 -	Determinação da taxa de transpiração, conteúdo relativo de água em folhas de plantas de jatobá (<i>H. courbaril</i>), na presença e na ausência de FMA sob diferentes regimes hídricos.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	Adenosina Trifosfato
AST	Açúcares Solúveis Totais
AR	Açúcares Redutores
ANR	Açúcares Não Redutores
DNS	Ácido Dinitrosalicílico
CF	Com Fungo
CRA	Conteúdo Relativo De Água
CO ₂	Gás Carbônico
CT	Condutividade Total
CTC	Capacidade De Troca Catiônica
Cc	Capacidade de Campo
FMA	Fungos Micorrízicos Arbusculares
MSF	Matéria Seca Das Folhas,
MSC	Matéria Seca Dos Caules,
MSR	Matéria Seca Das Raízes
MST	Matéria Seca Total
MOS	Matéria Orgânica do Solo
SB	Soma das Bases
SF	Sem Fungo
Ufopa	Universidade Federal do Oeste do Pará
V	Saturação por Bases

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
REVISÃO DE LITERATURA	16
Caracterização ecofisiológica da <i>Hymenaea courbaril</i> L.....	16
Mudanças Climáticas e estresse hídrico	17
Efeito do FMA sob déficit hídrico	20
OBJETIVO GERAL	21
Objetivos específicos.....	21
MATERIAL E MÉTODOS	21
Área de estudo	21
Clima	22
Obtenção do inóculo	22
Preparo do Material Vegetal	22
Delineamento Experimental e análise dos dados	23
Análise de crescimento inicial.....	24
Extrato de macro e micromoléculas	24
Parâmetros hídricos foliares.....	25
Conteúdo relativo de água.....	25
Taxa de extravasamento de eletrólitos do tecido foliar	26
Taxa de transpiração residual e cuticular	26
Glomalina	27
Análise de dados	27
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
Avaliação do crescimento inicial.....	27
Análise nutricional	34
Proteína do solo relacionado a glomalina (PSRG-FE)	35
Relações hídricas.....	37
Avaliações Bioquímicas	39
Açúcares solúveis totais (AST)	39
Açúcar redutor (AR).....	40
Sacarose	41
Amido	43
Amônio.....	44
Nitrato.....	45

Aminoácido solúveis totais	46
Proteínas solúveis totais	48
Prolina	49
CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	51

INTRODUÇÃO GERAL

As árvores nativas da Amazônia Brasileira, como o jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), têm atraído a atenção dos pesquisadores devido às suas excepcionais características, que as tornam adequadas para ambientes condições adversas como solo com poucos nutrientes, pouca água, baixa luminosidade e presença de pragas. Esses fatores podem causar estresse nas plantas, afetando seu crescimento e desenvolvimento. Isso tem uma grande importância tanto no contexto da silvicultura quanto do desenvolvimento econômico e social. Devido a essas características, essa espécie tem ganhado reconhecimento significativo na comunidade científica nacional, especialmente por suas estratégias adaptativas que oferecem percepções valiosas para diversas áreas de estudo, incluindo fisiologia e bioquímica vegetal, biotecnologia e melhoramento genético de plantas (Carvalho, 1994; Paiva, 2003).

Os efeitos das mudanças climáticas no desenvolvimento dos vegetais está cada vez mais preocupante, pois já podem ser observadas as irregularidades dos padrões sazonais e temporais da precipitação pluviométrica (Batista de Jesus et al., 2021). No Brasil, espera-se que nas décadas seguintes, estas mudanças proporcionem períodos mais prolongados de dias secos, especificamente na região Amazônica, com temperaturas elevadas e extremos de precipitação (Marengo, 2014).

O déficit hídrico ocorre quando há falta de água no solo, de modo a não poder ser absorvida pelas raízes da planta, desencadeando prejuízos ao desenvolvimento do vegetal (Juhos, et al., 2023). Este efeito ocasiona mudanças na anatomia, fisiologia e bioquímica das plantas, com intensidade, podendo variar do tipo da planta e período de duração (Araújo et al., 2010). Neste contexto, a aplicação de FMA (Fungos Micorrízicos Arbusculares) têm se mostrado importante mitigador de estresses sofridos pelas plantas, e por decorrência disto os FMA são considerados ferramentas úteis, promissoras na recuperação de áreas degradadas, pois possuem diminuto custo. Esta simbiose FMA-planta pode ser observada em várias espécies vegetais (Cavalcante et al., 2009).

Trabalhos utilizando FMA submetidas a diferentes agentes estressores, podem disponibilizar informações importantes a respeito da presença desses fungos e as espécies vegetais que suportam o efeito de perturbação do habitat em decorrência desta associação. Isso ocorre porque as plantas que estabelecem simbiose com esses fungos demonstram maior tolerância a períodos de déficit hídrico,

Considerada uma espécie secundária tardia (Lima et al. 2011), isto é, intermediária na sucessão ecológica, tolerante à sombra em estágio juvenil, e caracterizada uma planta semi-decídua, heliófita ou esciófita, seletiva xerófita, particularidade de floresta latifoliada que ocorre também em mata ciliar (SMAC, 2013). As espécies denominadas como secundárias tardias crescem no sub-bosque em condições de sombra leve ou densa, sendo capazes de permanecer por toda a vida, ou então crescer até atingir o dossel ou a condição de emergente (Gandolfi et al. 1995).

O fruto possui grande valor econômico, principalmente pela extração do mesocarpo farináceo, utilizado como fonte de alimentação para animais, e para o homem, apresentando elevado valor energético e rico em potássio (Shanley et al., 2005). A espécie possui vasta importância no aspecto socioambiental, utilizada para plantios em áreas degradadas para recomposição vegetal, fixadora e armazenadora de carbono (Lorenzi, 2016). É usada como fitoterápico no tratamento de queimaduras, bronquites, gripes, cistites, infecções de bexiga, fungos e vermes, a partir dos extratos retirados da casca (Barros, 1982; EMBRAPA, 2004; Oliveira; Menezes; Castro, 2020).

A madeira é robusta e abundantemente utilizada na construção de estruturas externas, tem a habilidade de se desenvolver em ambientes com diferentes características edafoclimáticas (Nascimento et al., 2011). Sua exploração e procura é intensa devido ao seu tamanho (altura e diâmetro do caule) e às boas características físicas de sua madeira como a durabilidade (Lacerda et al., 2008), tornando-se grandemente utilizado em construção civil e em indústria moveleira (Tiago et al., 2018).

Mudanças Climáticas e estresse hídrico

O Brasil está entre os maiores emissores de gases de efeito estufa do mundo (na 7ª posição), com a vasta biodiversidade de floresta tropical, tendo também a maior reserva de água doce do mundo, com o total de 12% (Kalil & Checco 2020). Entretanto, os impactos das mudanças climáticas e os eventos hidrológicos já fazem parte da realidade brasileira (Marengo, 2008). Segundo a ANA (2019), em 2018 cerca de 1 milhão de brasileiros foram atingidos pelas inundações e quase 43 milhões afetados pela seca. Compreender tal obstáculo é uma atribuição que necessita de visão estratégica e multidisciplinar.

Por conseguinte, estudos acerca do uso e manejo dos recursos hídricos, recuperação de áreas degradadas com espécies nativas, com potencial econômico e com visão ecológica são fundamentais, e precisam ser abordadas nas gestões tomando medidas de adaptação (Karlsson et al., 2016), deve-se levar em conta que as mudanças climáticas podem alterar o balanço hídrico das bacias hidrográficas (Chen et al., 2020), desencadeando períodos de restrições hídrica.

Para qualquer ser vivo a água é fundamental e de extrema importância acima do que qualquer outro fator ambiental, sendo crucial para a perpetuação, existência e sobrevivência de todas as formas de vida (Cairo, 1995; Pimentel, 2004). É o principal constituinte dos vegetais, com 50% da produção de massa fresca nas plantas lenhosas e aproximadamente 80% a 95% nas plantas herbáceas, tornando-se indispensável para o pleno funcionamento do transporte de solutos e gases, como reagente no metabolismo vegetal, na turgescência de células e tecidos, transformando-se, portanto, responsável pela forma e estrutura dos órgãos, sendo essencial para o crescimento (Figueiro et al., 2004, Nogueira et al., 2005).

A seca é um dos principais fatores causadores de estresse nas plantas, podendo ser quase permanente em áreas desérticas, sazonal em áreas com estações definidas de chuva ou eventual como climas úmidos (Kramer 1980, Araújo Filho, 2002). Conforme Taiz et. al (2021), com a redução da água no solo as plantas mais tolerantes podem realizar ajustamento osmótico para continuar absorvendo água. A falta de água no solo, pode debilitar as funções vitais como estimular reações adaptativas que preparem as plantas a sobreviverem em períodos prolongados de déficit hídrico (Silva et al., 2002).

Cada espécie possui seu próprio grau de tolerância e suas adaptações específicas, o que lhes confere vantagens para sobreviver em ambientes com escassez de água (Castelar et al., 2023). A capacidade das plantas de se ajustarem a essas condições é fundamental para sua sobrevivência nos diferentes habitats (Teixeira-Santos et al., 2020).

A tolerância a estresses abióticos é bastante complexa em função das interações intrínsecas entre os fatores de estresse e os diversos fenômenos bioquímicos, moleculares e fisiológicos que atingem o crescimento e desenvolvimento das plantas (Jaleel et al., 2009).

As plantas quando sujeitas às condições de déficit hídrico, podem apresentar alterações em todos os níveis morfofisiológicos (Bento et al., 2016). O déficit de água

geralmente provoca expansão foliar mais lenta e o fechamento mais destacado dos estômatos, assim como dificuldades para o suprimento de nutrientes. Ocasionalmente ocasiona redução tanto nas divisões celulares como no alongamento celular que atinge o crescimento das plantas, assim como a sua morte em decorrência da incapacidade do vegetal reverter as suas atividades fisiológicas depois de uma deficiência severa (Epstein e Bloom, 2004; Coelho Filho et al., 2011).

Parâmetros têm sido estudados para examinar o resultado de espécies vegetais ao estresse hídrico, com destaque para o conteúdo relativo de água, a transpiração, temperatura foliar e a concentração de prolina (Nogueira et al., 2001).

Algumas espécies quando expostas ao estresse hídrico, podem apresentar acúmulo de prolina, no qual apresenta mecanismo regulador da perda de água, mediante o aumento da osmolaridade celular (diminuição do potencial osmótico) (Bhaskara et al., 2015).

As diminuições diferenciais nas percentagens de acúmulo de matéria seca das raízes, caules e folhas, dependem do seu estágio de crescimento e sensibilidade relativa dos diversos órgãos, sendo na maioria das vezes, direcionada-se de uma maior taxa na distribuição de fotoassimilados para as raízes do que para a parte aérea, Hsiao (1973) explica que as raízes podem ser superiores à parte aérea em sua capacidade de crescer em diversas situações, em particular em situações de estresse hídrico, no qual tendem a crescer para áreas mais profundas do solo em busca de água. Isso promove maior capacidade das plantas manterem os seus potenciais hídricos foliares elevados, mesmo sob deficiência hídrica.

Com a exposição ao déficit hídrico moderado, a planta geralmente reduz o crescimento da parte aérea, antes mesmo que das raízes, resultando no estímulo na relação raiz com parte aérea (Bondada & Shutthanandan, 2012). Este déficit reduz o crescimento foliar antes da redução da taxa fotossintética, transformando em excesso de carboidratos para as raízes. Com a perda acentuada de água, reduz também o alongamento e a multiplicação das células, ocasionando em plantas menores, e conseqüentemente na redução da área foliar (Schurr, 1998).

Espera-se que algumas espécies quando expostas ao déficit hídrico, tenham características como baixas taxas de fotossíntese e crescimento, renovação de tecidos e menor capacidade de aquisição de recursos. Estes fatores certificam que plantas adquiram maior resistência para se desenvolver em ambientes extremos (Ramos et al., 2004).

Efeito do FMA sob déficit hídrico

O mutualismo é a interação ecológica entre dois organismos em que ocorrem benefícios para ambos (Bronstein et al., 2004; Bascompte, 2019). O mutualismo simbiótico é comum na natureza, e muitos microrganismos presentes no solo e na rizosfera se associam às plantas, desenvolvendo interações simbióticas. Alguns fungos, por exemplo, ajudam as plantas a sobreviver no ambiente (Alguacil et al., 2011; Jeffries et al., 2003).

Dentro deste grupo de fungos, temos os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA), inseridos no filo Glomeromycota, e que se constituem complexas associações designadas de micorrizas Arbusculares, que caracterizam pela constituição de estruturas intra e extrarradiculares (Porcel; Aroca; Ruiz-lozano, 2012) em sua maioria são simbiontes obrigatórios e possuem reconhecimento no papel dos ecossistemas, pelos benefícios oferecidos às plantas associadas e serem também determinantes da biodiversidade vegetal, na diversidade ecossistêmica e da produtividade (Van der heijden et al., 2008), e contribuindo, ainda, para o condicionamento físico total da planta (Bonfante & Desirò, 2015).

Após a germinação dos esporos, acontece a produção de hifas, e em seguida, estruturas como os apressórios, as hifas extrarradiculares elevam a área radicular das plantas, favorecendo maior absorção de água e nutrientes, de preferência o fósforo (P) e nitrogênio (N), elementos essenciais no crescimento e desenvolvimento vegetal (Rizvi et al., 2015; Rivero et al., 2015; Hart et al., 2016). Estas hifas, são capazes também de colaborar para agregação das partículas do solo, em decorrência da liberação de uma glicoproteína denominada glomalina (Silva et al., 2016). Posteriormente, as hifas formam os arbúsculos, que são estruturas importantes, em que são responsáveis pela simbiose apropriadamente dita. É por meio dos arbúsculos que ocorrem as transferências de nutrientes do fungo para a planta (Jalonen et al., 2013) e com gasto de energia são transferidos fotoassimilados da planta para o fungo (Van der heijden et al., 2015). Conseqüentemente, dependendo desta interação, pode acontecer a promoção do crescimento vegetativo (Gerlach et al., 2015; Holste et al., 2016).

O FMA beneficia a planta na absorção de nutrientes minerais (em especial o fósforo) com a colaboração das hifas (Porcel; Aroca; Ruiz-lozano, 2012). Alguns

estudos constataram que a absorção de água pela micorriza é realizada por meio da absorção de fósforo (P) (Wu & Zou, 2017).

Ocorre a melhora do ajustamento osmótico por osmorreguladores, como açúcares solúveis e acumulação de prolina livre (Fei zhang et al., 2018; Yooyongwech et al., 2016), carboidratos não estruturais e íons de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ (Wu et al., 2013).

As Associação mutualísticas -simbiose- como as do FMA, deve ser observada em estudos mais detalhados e profundos, tendo em vista que a simbiose micorriza proporciona mecanismos que ajudam a suportar o estresse ocasionado pelo déficit hídrico (Al-karaki et al., 2004; Khalvati et al., 2005; Rapparini & Peñuelas, 2013; J. Ruiz-lozano et al., 2012).

OBJETIVO GERAL

Avaliar parâmetros fisiológicos, metabólicos e de crescimento de mudas de *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) em associação com Fungos Micorrízicos Arbusculares, em diferentes condições regimes hídricos.

Objetivos específicos

Em diferentes condições de déficit hídrico, na presença e na ausência de FMA, em mudas de *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) em associação com Fungos Micorrízicos Arbusculares, em diferentes condições de regimes hídricos.

- Avaliar o crescimento inicial;
- Quantificar os carboidratos sacarose e amido;
- Quantificar alguns compostos nitrogenados;
- Avaliar parâmetros hídricos foliares (conteúdo relativo de água, taxa de extravasamento de eletrólitos do tecido foliar);
- Avaliar o teor de nutrientes minerais (macronutrientes e micronutrientes) .

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O experimento foi realizado no viveiro florestal da Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), unidade Santana, localizada no município de Santarém, com as coordenadas geográficas: 2°25'19"S 54°44'33"W, sob um Latossolo Amarelo de textura média, argilosa a muito argilosa de textura indiscriminada (IDESP, 2014).

Clima

Segundo o sistema de Köppen, a região possui o clima Ami, ou seja, tropical úmido ou subúmido com variação anual de temperatura sendo quente e úmida, com variação anual de 25 a 28 °C, com precipitação anual entre 1900 e 2400 mm (Álvares et al., 2013).

Obtenção do inóculo

Os fungos micorrízicos arbusculares utilizados neste estudo foram obtidos do solo rizosférico de uma área de Savana Amazônica, na região de Alter do Chão, na cidade de Santarém no oeste do Pará nas seguintes coordenadas 2°28'1" S e 54°49'41" W. O solo da área é composto por latossolo, ácido, bem drenado, deficiência de fósforo e com intemperismo intenso e alto teor de óxido de ferro e alumínio, possuindo assim baixa fertilidade natural (Santos et al., 2018).

Preparo do Material Vegetal

Os frutos de jatobá foram coletados diretamente no solo de 10 árvores matrizes da Ufopa-Tapajós, Ufopa-Santana e Floresta Nacional do Tapajós. Após a coleta, foi realizada a remoção manual da polpa (mesocarpo interno), e triagem das sementes com eliminação daquelas com quaisquer tipos de deformação ou injúria. Para acelerar a germinação das sementes, foi realizado pré-tratamento utilizando ácido sulfúrico (H₂PO₄) para a quebra de dormência como sugerido por Freitas et al., (2013). A semeadura ocorreu em tubetes com substrato comercial autoclavada, sob sombrite 50% por dois meses para aclimatação no Viveiro de Produção de Mudanças do IBEF da Ufopa. A irrigação ocorreu diariamente até o estabelecimento da plântula. O solo utilizado como substrato foi esterilizado em autoclave e avaliado por suas propriedades químicas e granulométrica conforme a Tabela 1 (Teixeira et al., 2017).

Tabela 1. Atributos químicos do solo utilizado como substrato no experimento

M.O	P	K	Análises químicas			SB	m	V
			Ca	H + Al	CTC (t)			
%	mgdm ⁻³		cmolc dm ⁻³			%		
6,2	9	0,12	1,5	13,1	4,20	2,1	49,8	13,9

Granulometria

Areia total	Silte	Argila
g kg ⁻¹		
422	150	438

Fonte: Autores (2024). Em onde: SB: soma das bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V: saturação por bases; MOS: matéria orgânica do solo.

Delineamento Experimental e análise dos dados

No experimento foi utilizada a organização bifatorial com delineamento inteiramente casualizado. O primeiro fator contendo apenas o regime hídrico seguiu, com alterações definidas com outros estudos anteriores: 25% da capacidade de campo (Cc) simulando condição de déficit hídrico severo; 50% Cc simulando déficit hídrico moderado; e 80% Cc simulando uma condição adequada. E o segundo fator foi determinado pela presença ou ausência do inoculo nas plantas, possuindo dois níveis: SF = Sem Fungo, e CF = Com Fungo. Com isto, a combinação dos fatores resultou em 6 variações experimentais (2 x 3) com cada uma dessas variações com oito repetições, totalizando 48 vasos.

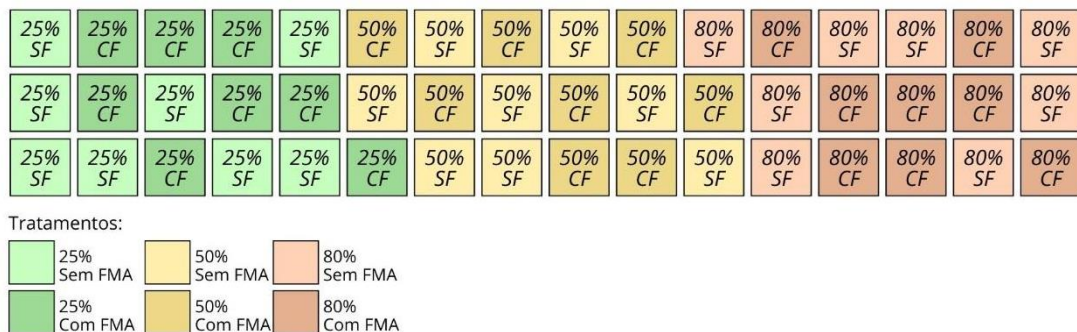


Figura 2: Croqui da área experimental com a distribuição dos tratamentos: porcentagem da capacidade de campo (25, 50 e 80%), com ou sem FMA.

Após o estabelecimento das plântulas, estas foram transplantadas para os vasos com capacidade de 5 L em ambiente controlado com irrigação diária para manter a capacidade inicial 80%. Cada repetição do grupo das plantas micorrizas recebeu 150 g de inóculo fúngico de acordo com a densidade de esporos sugerida por Sousa et al., (2023). Após 30 dias da semeadura iniciou-se a implantação do déficit hídrico, sendo que a irrigação foi reduzida até atingir a capacidade de campo de 25%,

50% e 80%. Na sequência, iniciou-se as mensurações de crescimento a cada 20 dias, e se manteve as medições até o 120º dia.

Análise de crescimento inicial

As análises de crescimento das mudas de Jatobá ocorreram a partir do dia 30, onde foram mensurados a altura da parte aérea, diâmetro do coleto, número de folhas, área foliar, comprimento da raiz e volume da raiz. A área foliar real amostrada foi determinada digitalizando as respectivas imagens e em seguida calculando a área com o software ImageJ (Abràmoff et al., 2006). O fator foi então testado e validado através da análise de regressão, examinando a relação entre a área foliar estimada e a real em uma nova amostra da folha mais desenvolvida.

Ao final do experimento, as plantas foram separadas em partes (folhas, caules e raízes), sendo pesadas em balança analítica modelo Fa-2204-Bi Bioscale e acondicionados em sacos de papel e acondicionadas, em estufa de circulação forçada de ar a 70°C, até atingir o peso constante. Com os dados coletados, foram calculadas as alocações de biomassa para as folhas (MSF), caule (MSC) e raízes (MSR), assim como determinação na relação raiz/parte aérea (R/Pa), sendo aplicadas nas seguintes fórmulas (Benincasa, 1988):

$$MSF = \frac{MSF}{MST}, \quad MSC = \frac{MSC}{MST}, \quad MSR = \frac{MSR}{MST} e$$

$$R|Pa = \frac{MSR}{MSF + MSC}$$

Sendo, MSF= matéria seca das folhas, MSC= matéria seca dos caules, MSR= matéria seca das raízes e MST= matéria seca total.

Extrato de macro e micromoléculas

Após a secagem dos materiais, a parte aérea e a raiz foram trituradas em moinho de facas modelo CLB MF-Willey, onde foram utilizadas para análises bioquímicas. A massa seca (3g) foi misturada com 10 mL de tampão de fosfato em pH 7 para maceração, e posteriormente centrifugada a 5.000 RPM por 20 minutos, como proposto por Kim & Verpoote (2010). O sobrenadante foi coletado para análise dos seguintes compostos:

Os Carboidratos foram seguindo pelo método antrona (Yemm & Willis, 1945) para quantificar os açúcares solúveis totais (AST), açúcares não redutores (ANR) e amido. Os açúcares redutores (AR) foi realizada pelo método do ácido dinitrosalicílico (DNS) descrito por Miller (1959).

As proteínas totais foram quantificadas pelo método de Bradford (1976), e para a quantificação dos aminoácidos totais foi utilizado o ensaio da ninhidrina (Yemm e Cocking, 1955).

Para a extração e quantificação da prolina foi utilizado o método de Bates (1973).

Para a quantificação do nitrato e amônio foram utilizadas respectivamente as metodologias descritas por Cataldo et al. (1975) e Weatherburn (1967).

Determinação do conteúdo de clorofila e carotenóides

Os pigmentos foliares, clorofila *a* e *b* e carotenóides foram determinados conforme Lichtenthaler (1987), por espectrometria utilizando acetona pura como extrator, utilizando discos foliares (0,5 cm). As leituras de absorbância foram realizadas nos comprimentos de onda de 663,2, 646,8 e 470 nm, respectivamente no espectrofotômetro, e posteriormente calculando µg de clorofila/g de matéria fresca foliar, seguindo as equações:

$$\text{Clorofila } a: 12.25 \times A_{663,2} - 2,79 \times A_{646,8}$$

$$\text{Clorofila } b: 21.50 \times A_{646,8} - 5,10 \times A_{663,2}.$$

$$\text{Carotenóides: } (1000 \times A_{470} - 1,82 \times Ca - 85,02 \times Cb) / 198$$

Parâmetros hídricos foliares

Conteúdo relativo de água

O Conteúdo relativo de água (CRA) foi obtido a partir de leituras realizadas em folhas individuais, no qual foi retirada ao terceiro par de folhas (do ápice para a base) totalmente expandidas, coletadas entre 10 e 11 horas da manhã, envolvidas em papel alumínio e levadas em caixa térmica com gelo para o laboratório. O Conteúdo relativo de água da folha (FWC) foi determinado de acordo com Sairam & Srivastava (2002):

$$RWC (\%) = \frac{FW - DWSW - DW}{TW} \times 100$$

onde FW, DW e TW são peso fresco, seco e túrgido, respectivamente.

Sendo que, foram obtidos discos foliares de área conhecida e pesada a massa fresca. Logo após, os discos foram colocados em placa de Petri contendo água destilada e envolta de papel gemiteste por 24h para saturação. Após pesagem da massa saturada, foram secos em estufa com circulação forçada de ar, com temperatura 70°C por 48 horas, para determinação da massa seca.

Taxa de extravasamento de eletrólitos do tecido foliar

Conforme descrito por Leopold et al., (1981), foram coletados 15 discos foliares para cada repetição, inseridos em tubo falcon com 40 ml de água deionizada e realizada a 1° leitura (1° hora) com o medidor de condutividade livre (CL, $\mu\text{S}/\text{cm}$), usando o Medidor de Condutividade AK51, posteriormente foram mantidos imersos por 24h em pleno escuro, na temperatura ambiente e depois foi efetuado a 2° leitura. Em seguida, os frascos foram para o banho maria por 1h a 100°C, para assim medir a 3° leitura, a condutividade total (CT, $\mu\text{S}/\text{cm}$). A cada leitura, o sensor foi lavado com água destilada. Com a obtenção dos resultados, foi calculado a taxa de extravasamento de eletrólitos em porcentagem, de acordo com Vasquez-Tello et al., (1990).

A partir desses dados foram calculados o percentual de integridade relativa da membrana celular:

$$PAI(\%) = 1 - FCTC$$

Foi calculado também o percentual de integridade relativa da membrana celular:

$$PRI(\%) = \frac{PAI(\text{sem déficit hídrico})}{PAI(\text{com déficit hídrico})}$$

E o percentual de danos à membrana:

$$MD(\%) = 100 - PRI$$

Taxa de transpiração residual e cuticular

Os cálculos da transpiração residual e cuticular foram feitos seguindo o método de McCaig e Romagosa (1989). Retirou-se folhas juntamente com pecíolo, passando base (esmalte) para evitar a perda de água. Em seguida, foram pesadas logo após a excisão para se obter massa fresca. Essas folhas foram mantidas em ambiente controlado (50% umidade relativa e 25°C de temperatura, no escuro). Após duas horas, foi avaliada a medição sequencial de peso, a cada uma hora durante 12h. Os

cálculos foram considerados a fase linear da perda de água pela transpiração entre 120 e 360 minutos.

Glomalina

A quantificação da glomalina foi realizada pelo método Brandford (1976), modificado por Wright et al. (1996), usando como padrão a albumina de soro bovino. As concentrações de glomalina foram corrigidas para mg g^{-1} de solo, considerando-se o volume total de sobrenadante e o peso de solo seco.

Análise de dados

As análises estatísticas foram realizadas no programa SISVAR versão 5.8.92 (Ferreira, 2019), onde as variáveis dos tratamentos e entre os regimes hídricos foram submetidas ao teste de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do crescimento inicial

Não foi observado diferença estatística ($\leq 0,05$) ao comparar a altura da parte aérea entre todos os tratamentos e nem nas dentro das capacidades de campo (figura 3). O mesmo comportamento foi observado por Nascimento et al., (2011), que observou similaridades no crescimento de plantas de *H. courbaril* nas Capacidade de campo (Cc) de 50% e 80%. De acordo com Carvalho (2003), este atraso no crescimento da planta pode ser atribuído ao desenvolvimento vegetativo lento durante a fase inicial.

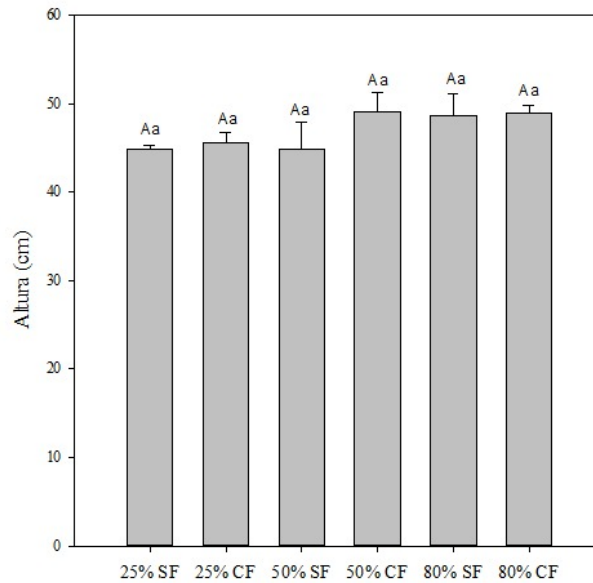


Figura 3: Altura observada em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Pode-se encontrar diferentes respostas ao crescimento da planta com a micorrização. De acordo com Ouledali et al. (2018), essas variações podem ser geneticamente determinadas pela espécie vegetal (dependência micorrízica) e também podem ser influenciadas pelas condições do solo, afetando a resposta e eficiência micorrízica (Schiavo et al., 2010).

O número de folhas não teve diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos e dentro dos regimes hídricos (figura 4). Na área foliar houve diferença estatística significativa, entre os tratamentos foi observado maior área foliar (21,6%) nas plantas 50% CF em comparação às plantas 50% SF (figura 5). E entre os regimes hídricos (figura 2b), houve diferença significativa ($\leq 0,05$) entre as plantas com e sem micorrizas, exceto 80% Cc, que não se diferiram estatisticamente. Este mesmo resultado foi observado por Zhu et al., (2017), que utilizou plantas de falsa-acácia (*Robinia pseudoacacia* L.), no experimento a maior área foliar observada foi quando ocorriam as micorrizas arbusculares. A maior área foliar ocorreu em virtude da maior absorção de nutriente e água (figura 5), esse fenômeno é observado principalmente em condições de déficit hídrico, permitindo que as plantas na presença de FMA, apresentam uma taxa fotossintética mais elevada, como provocado pelos maiores teores de carboidratos neste presente estudo.

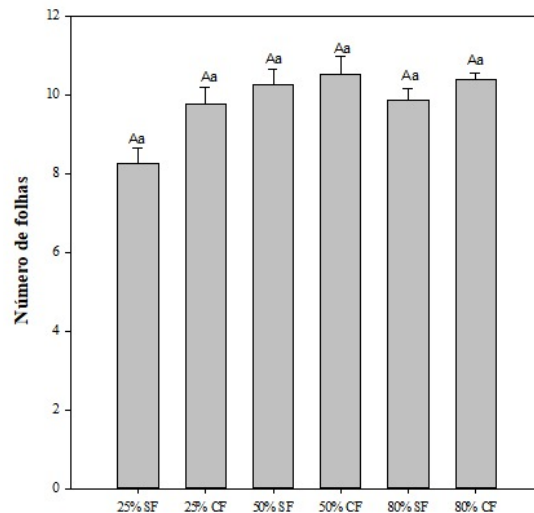


Figura 4: Número de folhas observada em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

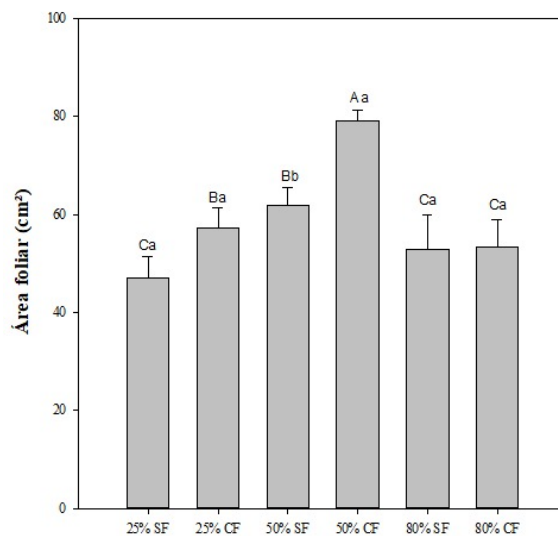


Figura 5: Área foliar observada em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Com relação ao diâmetro do caule, diferenças significativas ($\leq 0,05$) foram observadas entre os tratamentos com a presença e a ausência do FMA. Os tratamentos com a micorriza foram superiores com aproximadamente 15% em relação aos tratamentos sem FMA. Houve diferença significativa dentro das Cc, observando maior diâmetro em plantas com micorrizas (Figura 6). Novamente as plantas com AMF se destacam em crescimento no diâmetro do coleto, em virtude da melhor nutrição e hidratação.

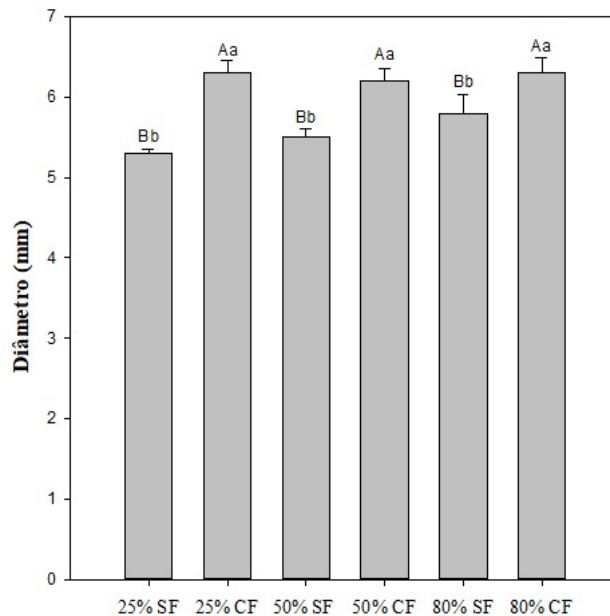


Figura 6: Diâmetro do coleto observado em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Em relação ao comprimento das raízes, foi observado diferenças estatísticas ($\leq 0,05$) ao comparar todos os tratamentos e dentro dos regimes hídricos (figura 7), constatando o aumento do comprimento das raízes nas plantas com o FMA e dos níveis de água presente no solo, sendo 12% maior nas plantas com a micorriza no regime hídrico de 50%, em comparação ao mesmo regime sem a micorriza.

Observou-se que as raízes do 80% CF são maiores que as das plantas sem micorrizas do mesmo regime hídrico, que mesmo com muita água presente no solo não obteve o mesmo resultado com as micorrizadas. Notando-se que os FMA podem ser sugerido como alternativa de resistência das plantas à ambientes semelhantes deste trabalho, esta associação simbiótica, onde os FMA estendem suas hifas para o solo, aumenta a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas, explicando este comportamento de maiores raízes em diferentes déficits hídrico, proporcionando maior crescimento as plantas com micorriza.

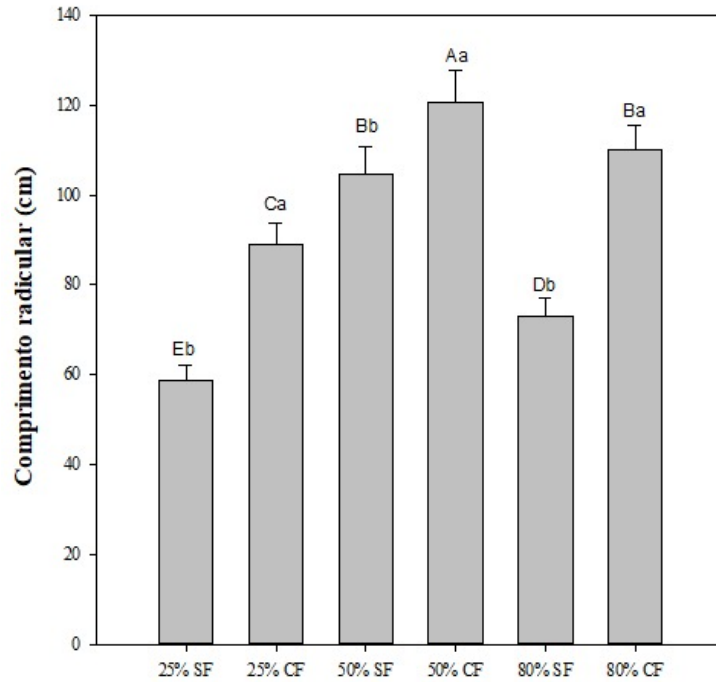


Figura 7: Comprimento radicular observado em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

No volume das raízes, foi observado diferenças estatísticas ($\leq 0,05$) ao comparar todos os tratamentos e dentro dos regimes hídricos. Ao comparar entre os tratamentos, foi observado que as plantas 80% CF foram superiores 13% as plantas 80% SF. E comparando dentre os regimes hídricos, apenas no 80% da Cc houve diferenças significativas (figura 8).

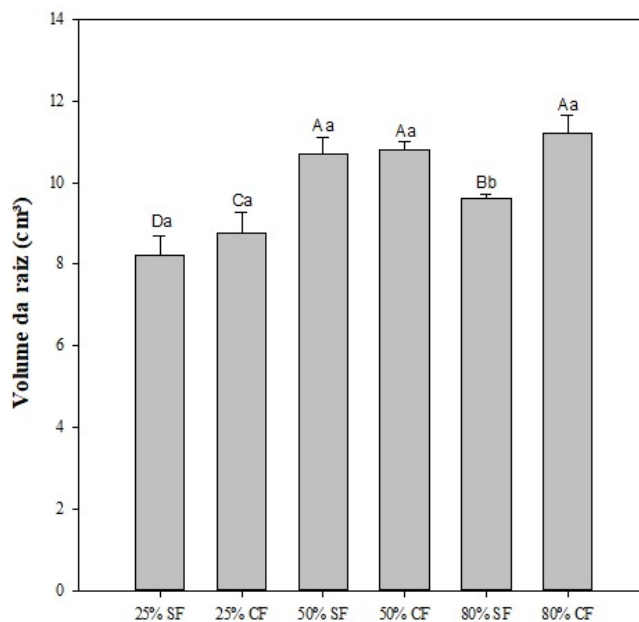


Figura 8: Volume das raízes observado em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

A concentração de fósforo (tabela 2) é maior nas plantas micorrízicas porque elas são mais eficientes na absorção de fósforo do que as plantas não micorrízicas (Siqueira et al., 1998), uma vez que as hifas dos FMAs ampliam a zona de exploração de fósforo no solo, aumentando o comprimento e o volume radicular (Correia et al., 2022; Peleja et al., 2022).

De acordo com Taiz & Zeiger (2004), o crescimento do sistema radicular é considerado uma estratégia adotada pelas plantas como segunda linha de defesa contra o déficit hídrico. Esse processo promove o crescimento preferencial das raízes em direção às áreas do solo que permanecem úmidas, resultando na proliferação de raízes mais profundas e, conseqüentemente, no aumento do sistema radicular. Os resultados do presente estudo, relacionados ao déficit hídrico e à massa seca das raízes, assemelham-se aos encontrados por Younis et al. (2000) ao investigar três cultivares de *Sorghum bicolor* submetidos ao estresse hídrico. Essas descobertas destacam a importância da adaptação das plantas a condições de escassez de água e mostram como diferentes espécies podem responder de maneiras semelhantes a esses desafios.

Em solos bem drenados, as raízes conseguem obter oxigênio para a respiração aeróbica diretamente do espaço gasoso do solo, uma vez que os poros preenchidos por gás permitem a difusão do O_2 para as camadas mais profundas do solo. No entanto, em solos inundados ou com drenagem deficiente, a água preenche os poros do solo, bloqueando a difusão de O_2 , como descrito por Taiz & Zeiger (2004). A falta de aeração adequada no solo leva a uma rápida diminuição nos níveis de oxigênio (Kozlowski, 1984), e, conseqüentemente, os processos aeróbicos são substituídos por processos anaeróbicos, resultando no acúmulo de gases (Jackson & Drew, 1984; Ponnamperuma, 1984) no solo. Esses gases se acumulam nas bases dos caules e raízes (Crawford, 1989). Sendo assim, a redução de O_2 no solo promove o aparecimento de distúrbios funcionais em toda a planta, afetando principalmente a absorção de água e de nutrientes pelas raízes (Glinski & Stepniewski, 1986).

Os FMA não tiveram efeito significativamente ($\leq 0,05$) na biomassa das plantas em relação à massa seca das folhas (MSF), caules (MSC) e raízes (MSR), nos diferentes tratamentos e entre os regimes hídrico, como evidenciado na figura 9.

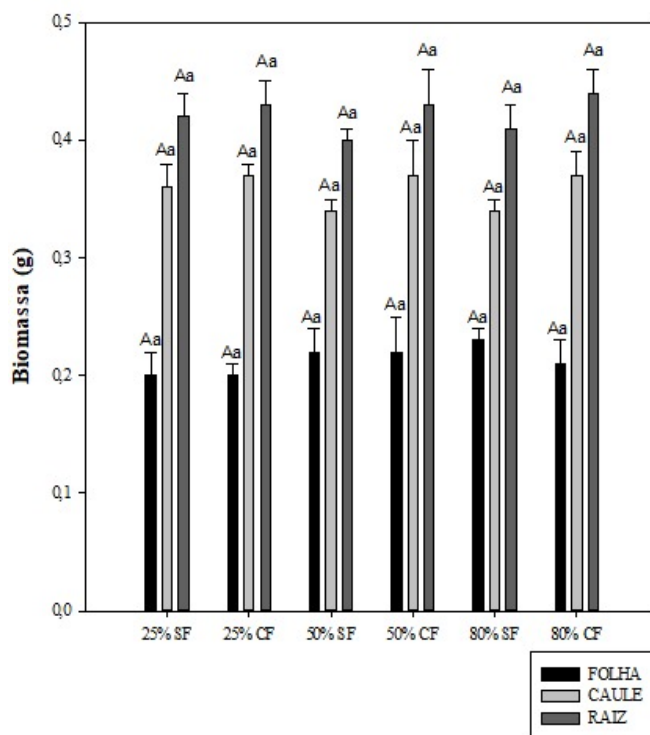


Figura 9: Biomassa da folha, caule e raiz observado em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

A presença de micorrizas não resultou em diferenças estatisticamente significativas na biomassa de plantas sujeitas ao déficit hídrico. Provavelmente, estes resultados estejam relacionados ao tempo do experimento. Acreditamos que necessitaria de mais tempo no experimento para haver diferença.

A estratégia das plantas em reduzir a área de transpiração para conservar água é um mecanismo adaptativo crucial em resposta ao estresse hídrico. Ao diminuir a expansão celular e, conseqüentemente, a área foliar, as plantas conseguem reduzir a perda de água por transpiração, o que ajuda a preservar a umidade em seus tecidos e no solo circundante por um período mais prolongado (Anjum et al., 2011).

No entanto, como mencionado, essa redução na taxa de transpiração também pode resultar em uma diminuição na assimilação fotossintética, o que pode ter impactos negativos na produção de biomassa e no crescimento da planta. A capacidade da planta para equilibrar a conservação de água com a manutenção da

atividade fotossintética é crucial para sua sobrevivência durante condições de estresse hídrico (Taiz et al., 2017).

Estes resultados destacam a complexidade das interações entre as plantas, os microrganismos do solo e o ambiente, e como essas interações podem variar em diferentes contextos e condições ambientais. É importante considerar que cada sistema planta-micorriza e as condições ambientais específicas podem resultar em respostas variadas, e mais pesquisas podem ser necessárias para compreender completamente os mecanismos subjacentes a essas observações.

Análise nutricional

Nos teores de nutrientes na massa seca da parte aérea, demonstrou diferença estatística ($\leq 0,05$) entre os tratamentos e entre os regimes hídricos (gráfico 2). Verificou-se que as plantas com FMA contêm maior concentração de P (macronutriente) e maior concentração de Mn (micronutriente), entre os regimes hídricos e nos tratamentos. E sem o FMA, o micronutriente Fe obteve maior concentração aos tratamentos em comparação aos tratamentos sem micorrizas.

Considerando os tratamentos, os teores de fósforo na parte aérea diferem significativamente entre os tratamentos com e sem micorriza ($\leq 0,05$), observa-se que a planta com micorriza utilizou do P no solo para a planta.

Tabela 2. Teores de macronutrientes (g.kg⁻¹) e de micronutrientes (mg.kg⁻¹) na matéria seca da parte aérea de plantas de jatobá (*H. courbaril*), na presença e na ausência de FMA sob diferentes regimes hídrico.

Nutrientes	25% SF	25% CF	50% SF	50% CF	80% SF	80% CF
N (g/Kg)	11,28 Aa	8,75 Aa	11,14 Aa	8,65 Aa	9,07 Aa	8,92 Aa
P (g/Kg)	0,03 Cb	0,15 Ba	0,04 Cb	0,12 Ba	0,09 Ba	0,37 Aa
K (g/Kg)	4,01 Aa	3,46 Aa	3,53 Aa	3,31 Aa	5,08 Aa	5,20 Aa
Ca (g/Kg)	4,28 Aa	4,35 Aa	4,35 Aa	4,50 Aa	4,50 Aa	4,83 Aa
Mg (g/Kg)	0,79 Aa	0,92 Aa	0,88 Aa	0,83 Aa	1,05 Aa	1,00 Aa
S (g/Kg)	0,46 Aa	0,45 Aa	0,45 Aa	0,48 Aa	0,53 Aa	0,47 Aa
B (mg/Kg)	12,47 Aa	13,62 Aa	11,83 Aa	10,75 Aa	12,55 Aa	12,55 Aa
Cu (mg/Kg)	0,22 Aa	0,07 Aa	0,05 Aa	0,00 Aa	0,11 Aa	0,26 Aa
Mn (mg/Kg)	159,75 Ba	117,24 Ca	166,75 Ba	161,25 Ba	155,40 Bb	214,11 Aa
Zn (mg/Kg)	0,93 Aa	0,37 Aa	5,54 Aa	3,01 Aa	9,70 Aa	5,80 Aa
Fe (mg/Kg)	150,43 Ba	107,99 Ca	210,45 Ba	260,92 Ba	340,64 Aa	178,03 Bb

Legenda: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Manganês (Mn) e Boro (B). As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos.

Resultados indicam que os microrganismos que foram utilizados neste trabalho, promoveram o crescimento das plantas, uma vez que, esta simbiose favoreceu a absorção de P. Sendo assim, a micorriza resultou no favorecimento nutricional para a planta (Bakhshandeh et al., 2019). Em decorrência disto, como as concentrações foram mais alta, em comparação com os tratamentos sem micorriza, pode-se deduzir que estes microrganismos tenham desenvolvido um processo de resistência sistemática, o que favorece a tolerância ao estresse hídrico (Bakhshandeh et al., 2019). Vários estudos já mostraram que a inoculação de FMAs favorece a absorção dos macronutrientes essenciais – como o fósforo - uma vez que a inoculação é capaz de regular o transporte desses nutrientes, aumentando sua absorção (Zhao et al., 2015; Wu et al., 2019).

Em relação a maior concentração de Fe nas plantas sem micorrizas (25% e 80%), o regime hídrico pode ter influenciado a capacidade das plantas para absorver e utilizar de forma eficiente o ferro presente no solo, levando ao aumento da concentração desse nutriente nas plantas, resultados semelhantes de Paula et al, (1983), em folhas de mandioca. As plantas não possuíam sintomas de excesso de ferro como descrito por Stein (2009), mas provavelmente em uma perspectiva futura poderia ocorrer tais danos, levando em conta o aumento do teor atual.

A simbiose micorrízica geralmente melhora a absorção de nutrientes pelas plantas, no entanto, em situações de estresse hídrico, as micorrizas podem não ser capazes de compensar completamente a redução na disponibilidade de ferro no solo. Além disso, o estresse hídrico pode influenciar a capacidade das plantas para absorver e utilizar eficientemente o ferro presente no solo, levando a uma diminuição da concentração desse nutriente nas plantas.

Proteína do solo relacionado a glomalina (PSRG-FE)

A umidade do solo e a influência do FMA influenciou positivamente o aumento dos teores dos atributos do solo avaliados, demonstrando diferenças estatística ($\leq 0,05$) entre os tratamentos e entre os regimes hídricos (figura 10). Verificou-se que as plantas com FMA contêm maior concentração de glomalina, entre os regimes hídricos e nos tratamentos.

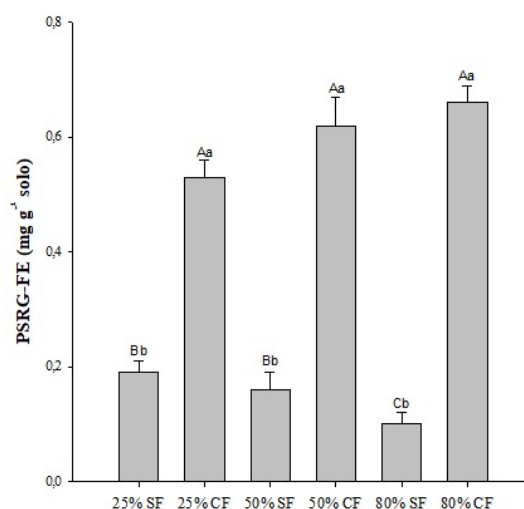


Figura 10: Proteína do solo relacionado a glomalina (PSRG-FE) em plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre todos os tratamentos e as letras minúsculas os tratamentos em cada regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

A sobrevivência e atividade dos microrganismos dependem da disponibilidade de água no solo. A restrição de água e a ausência de micorrizas resultaram na redução do teor de PSRG-FE no solo, os FMA produzem diferentes quantidades de glomalina e apenas alguns produzem PSRG, logo, esta comunidade diversa e abundante de FMA contribui para maiores concentrações de glomalina presente no solo (Hossain, 2021). Estudos como de Vlček & Pohanka (2020) demonstram que a presença de glomalina está associada à colonização das raízes pelas micorrizas arbusculares. Essa relação entre a presença de glomalina e as raízes colonizadas por FMA é um exemplo da influência dos microrganismos do solo na composição e nas propriedades do ambiente radicular das plantas.

Teor de pigmentos fotossintéticos

As concentrações de clorofila a, b, total e carotenoides nas folhas, não diferiram entre os tratamentos e entre os regimes hídricos ($\leq 0,05$) (tabela 3). Freire et al., (2009) em seus estudos com araçazeiros em condições submetidas a déficit hídrico, também não constataram diferença estatística significativa para a clorofila a, b, total e carotenóides. Os resultados obtidos estão em conformidade com Taiz e Zeiger (2004), os quais afirmam que os níveis de clorofila não são influenciados por condições ambientais como a escassez de água, mas sim pela exposição à luz e pela temperatura, uma vez que esses níveis são determinados geneticamente.

Tabela 3. Determinação dos teores de clorofilas e carotenoides em folhas de plantas de jatobá (*H. courbaril*), na presença e na ausência de FMA sob diferentes regimes hídrico.

Tratamentos	Clorofilas (ug/g MF)			Carotenóides (ug/g MF)	
	a	b	ab	a/b	
25% SF	1,33 Aa	0,73 Aa	2,06 Aa	1,82 Aa	0,69 Aa
25% CF	1,17 Aa	1,22 Aa	2,38 Aa	1,37 Aa	0,79 Aa
50% SF	1,25 Aa	0,71 Aa	1,96 Aa	1,75 Aa	0,72 Aa
50% CF	1,27 Aa	0,72 Aa	1,99 Aa	1,78 Aa	0,73 Aa
80% SF	1,04 Aa	0,62 Aa	1,66 Aa	1,67 Aa	0,68 Aa
80% CF	1,11 Aa	0,66 Aa	1,77 Aa	1,69 Aa	0,71 Aa

¹As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos.

Relações hídricas

Na taxa de transpiração foliar, foi observado maiores valores nas plantas com 80% CF ($\leq 0,05$). E entre os regimes hídricos, foi observado diferenças estatísticas ($\leq 0,05$) nas plantas com micorrizas com Cc 25% e 80% (5% e 8,2% respectivamente), superior as plantas sem micorrizas (tabela 4).

A redução da transpiração em plantas sob déficit hídrico é resultado do fechamento estomático.

Tabela 4. Determinação da taxa de transpiração, conteúdo relativo de água em folhas de plantas de jatobá (*H. courbaril*), na presença e na ausência de FMA sob diferentes regimes hídrico.

Tratamentos	Taxa transpiração (%)	Conteúdo relativo de água (%)	Extravasamento de eletrólitos ($\mu\text{s cm}^{-1}$)
25% SF	63,16 Bb	80,02 Bb	15,17 Aa
25% CF	66,29 Ba	84,98 Aa	10,88 Bb
50% SF	68,31 Ba	80,44 Bb	11,84 Ba
50% CF	68,9 Ba	84,24 Aa	10,12 Ba
80% SF	68,53 Bb	81,48 Bb	13,00 Ba
80% CF	74,14 Aa	88,09 Aa	13,60 Ba

¹As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos.

No conteúdo relativo de água, foi observado maiores valores nas plantas com micorrizas (25, 50 e 80%) ($\leq 0,05$). E entre os regimes hídricos, foi observado diferenças estatísticas ($\leq 0,05$) nas plantas com micorrizas com Cc 25%, 50% e 80% (6,2%, 4,7% e 8,1% respectivamente), superior as plantas sem micorrizas (tabela 4).

O conteúdo relativo de água nas folhas de plantas sob estresse hídrico geralmente diminui. Isso ocorre porque, quando as plantas enfrentam escassez de água, elas reduzem a quantidade de água em suas folhas como uma estratégia para conservar a umidade e sobreviver ao estresse. Essa redução no conteúdo de água nas folhas é uma adaptação das plantas para minimizar a perda de água por transpiração e manter a integridade celular, tornando uma ótima estratégia das plantas, principalmente com as micorrizas que auxiliam este metabolismo, como foi observado nas plantas com FMA.

O ajuste osmótico é um mecanismo importante para a conservação da hidratação celular em plantas sujeitas à seca, e o conteúdo relativo de água pode ser usado para refletir o efeito do ajuste osmótico nas folhas em condições de baixo potencial hídrico (Blum, 2005). Esse parâmetro tem sido amplamente utilizado como um marcador fisiológico eficaz para validar as condições experimentais em estudos envolvendo déficit hídrico (Blum, 2005; Rosales et al., 2012).

Foi observado maiores taxa de extravasamento de eletrólitos nas plantas com 25% SF ($\leq 0,05$). E entre os regimes hídricos, observou-se diferenças estatísticas ($\leq 0,05$) apenas nas plantas com 25% Cc (tabela 4). Em plantas sob estresse hídrico, o extravasamento de eletrólitos ocorre devido ao dano nas membranas celulares, resultante da desidratação e perda de eletrólitos e osmóticos. Isso provoca a liberação de íons como potássio e sódio das células para o meio externo. O aumento do extravasamento de eletrólitos pode ser utilizado como um indicador do nível de estresse ao qual as plantas estão submetidas.

Os estudos destacam que o papel desempenhado pelos FMA na manutenção das relações hídricas do hospedeiro pode oferecer uma estratégia bastante interessante para melhorar a tolerância das plantas à seca. Os efeitos fisiológicos benéficos associados à simbiose com FMA incluem a manutenção do potencial hídrico das folhas, do conteúdo relativo de água, da condutância estomática, da assimilação de CO₂ e da eficiência do fotossistema II (Augé, 2001; Bárzana et al., 2012). Diversos estudos têm demonstrado uma melhoria nas taxas de trocas gasosas (condutância estomática, transpiração e fotossíntese) em plantas micorrizadas sob condições de déficit hídrico, independentemente dos efeitos positivos sobre o crescimento e a qualidade nutricional (Augé, 2001; Ruiz-lozano, 2003; Sánchez-blanco et al., 2004; Lee et al., 2012).

Avaliações Bioquímicas

Açúcares solúveis totais (AST)

A concentração de açúcares solúveis totais (AST) nas folhas e raízes diferiu entre os tratamentos e entre os regimes hídricos. ($\leq 0,05$).

As maiores médias de concentrações foram observadas nos tratamentos 25% CF nas folhas, com diferença estatística de aproximadamente 53,5% entre os tratamentos (figura 11). Dentre os regimes hídricos, houve diferença significativa em todos os regimes nas folhas, observando que os tratamentos com micorrizas foram superiores com 31,5% e 28,9% (25% e 50% Cc, respectivamente) aos tratamentos sem micorriza, e o tratamento 80% SF foram superiores com 10,7% as plantas sem micorrizas.

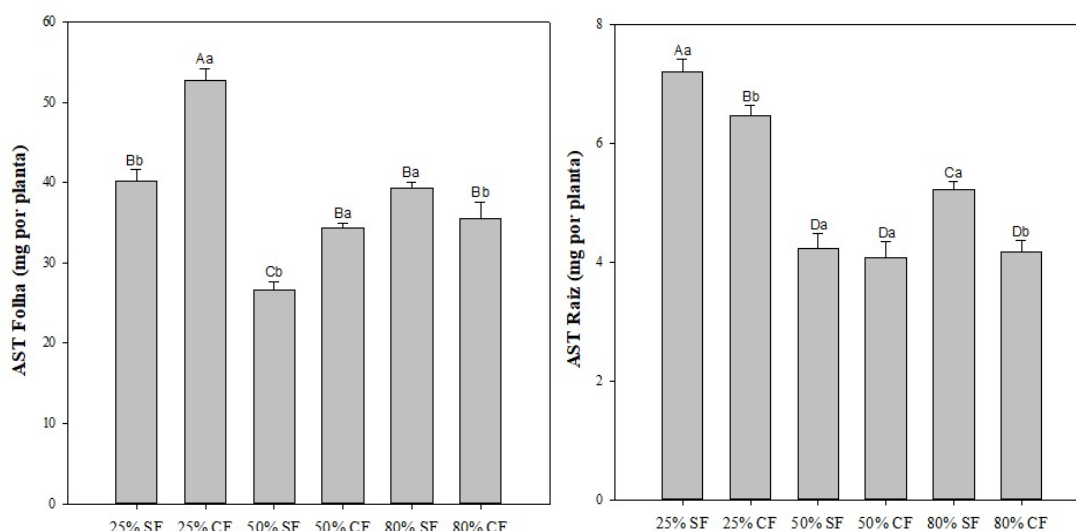


Figura 11. Açúcar solúveis totais em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Os açúcares solúveis nas folhas desempenham um papel crucial na regulação do potencial hídrico, ou seja, na capacidade das folhas de reter água, isto foi observado no conteúdo relativo de água (tabela 4). Esses açúcares podem atuar nesta proteção celular, como se visualizou na comparação da 25% Cc com e sem FMA. Quando há uma maior concentração de açúcares solúveis, isso tende a diminuir o potencial hídrico, o que significa que as folhas conseguem manter-se hidratadas mesmo em condições de estresse hídrico. Além disso, esses açúcares podem atuar na proteção celular, ajudando a manter a integridade das células e protegendo-as

contra danos causados por condições ambientais adversas. Correia et al., (2022), tiveram resultados semelhantes desta pesquisa - com as plantas com a Cc 25% e 50% - onde foram superiores torno de 45% as plantas sem FMA com as plantas de *H. serratifolius* submetidas com déficit hídrico grave e moderado.

Açúcar redutor (AR)

A concentração de açúcares redutores (Ars) nas folhas e raízes diferiu entre os tratamentos e entre os regimes hídricos ($\leq 0,05$). As maiores médias de concentrações de Ars foram observadas nos tratamentos 25% CF nas folhas e nas raízes das plantas (figura 12).

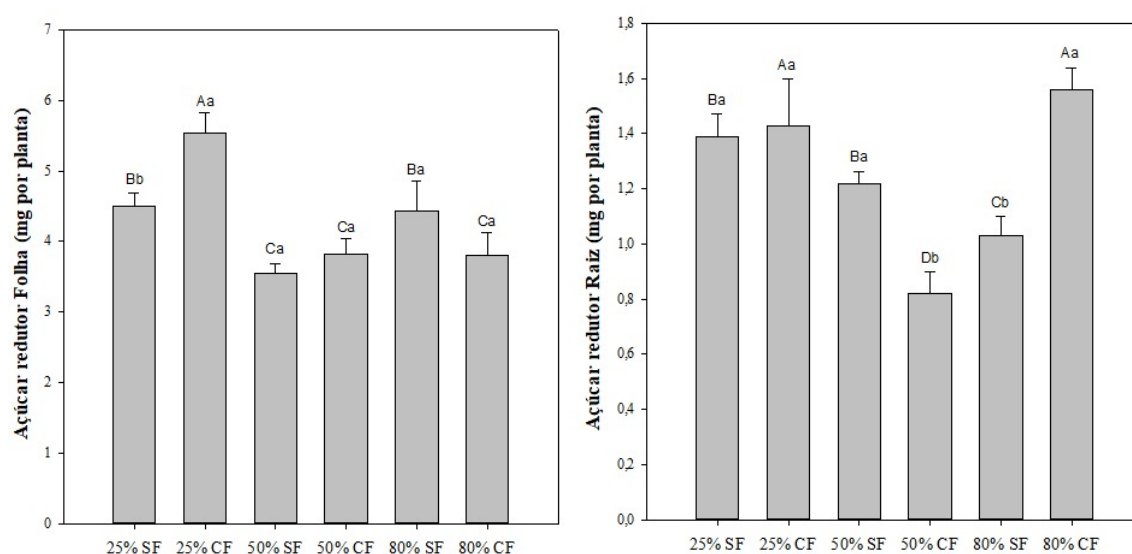


Figura 12. Açúcar redutor em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Dentre os regimes hídricos o tratamento com 25% da Cc, apenas nas folhas teve diferença estatística, o tratamento com a micorriza obteve 19% superior comparado ao sem micorriza, os demais não tiveram diferença estatística entre eles. Nas raízes, houve diferença em 50% e 80% da Cc havendo um aumento no incremento nas plantas 50% SF e 80% CF. Este resultado foi observado nos mesmos estudos de Wu et al. (2015), que relataram um aumento no incremento de níveis de AR nas folhas e raízes de *P. trifoliata* com micorriza.

A maior concentração de açúcar redutor nas folhas pode estar diretamente associada ao aumento da taxa de fotossíntese líquida, facilitada pelos FMA (Mohebi-

Anabat et al., 2015), esta capacidade fotossintética pode ajudar no aumento do teor de clorofila (tabela 3).

Em plantas submetidas a déficit hídrico, a presença de micorrizas pode desempenhar um papel importante na regulação dos níveis de açúcar redutor. Em condições de estresse hídrico, as micorrizas podem ajudar a melhorar a absorção de água pelas plantas, o que pode influenciar os níveis de açúcar redutor. Devido a isto, foi observado que as concentrações nas folhas e raízes com micorrizas obteve melhoria na absorção de água, auxiliando as plantas a manter níveis adequados de açúcares redutores, ajudando a mitigar os efeitos do estresse hídrico.

Sacarose

A concentração de sacarose nas folhas e raízes diferiu entre os tratamentos e entre os regimes hídricos. ($\leq 0,05$). As maiores médias de concentrações sacarose foram observadas nos tratamentos 80% CF nas folhas, com diferença estatística de aproximadamente 70% entre os tratamentos (figura 13). Dentre os regimes hídricos, houve diferença significativa em todos os regimes nas folhas, observando que os tratamentos com micorrizas foram superiores com 21,4%, 27,5% e 43,7% (25%, 50% e 80% Cc, respectivamente) aos tratamentos sem micorriza.

Em relação à concentração de sacarose nas raízes, as plantas com 50% CF apresentaram maiores médias entre os tratamentos, com aproximadamente 50% de diferença entre os demais. Entre os regimes hídricos, houve diferença estatística nas plantas de 50% CF, sendo superiores (50,5%) em comparação às plantas sem FMA. Ocorreu também diferenças nas plantas 80%SF com 34,7% mais eficientes com as sem micorrizas. O acúmulo de açúcares reduzidos - como a sacarose – exercem como osmoprotetores em condições sob estresse, como os déficit hídrico (Singh et al., 2015; Yang et al., 2019).

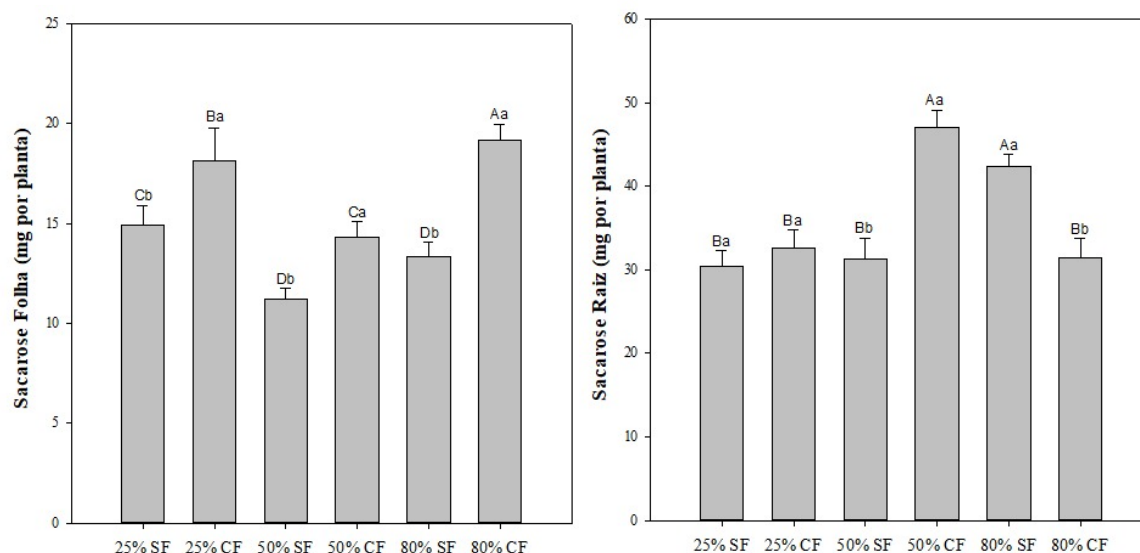


Figura 13. Concentração de sacarose em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Os resultados evidenciam que a concentração de sacarose nas raízes é superior à quantidade encontrada nas folhas, e que o déficit hídrico contribui para o acúmulo desse carboidrato. O aumento das concentrações de açúcares resulta principalmente da hidrólise do amido, a qual requer a atividade de enzimas hidrolíticas. As plantas que se recuperam do estresse e as sementes de muitas plantas superiores representam bons exemplos da ligação entre o acúmulo de carboidratos (especialmente sacarose) e a aquisição de tolerância ao estresse (Hoekstra et al., 2001).

A sacarose é um dissacarídeo composto por glicose e frutose, sendo uma fonte de energia para as plantas. Ela é produzida durante a fotossíntese e é transportada através do floema para ser utilizada em diferentes processos metabólicos, como o crescimento e armazenamento de energia. A sacarose é o principal açúcar transportado pelo floema, movendo-se das partes fonte, principalmente as folhas, para os drenos; em plantas com FMA, a raiz se torna um dreno significativo. Na raiz, a sacarose é transformada em glicose e frutose, sendo que a glicose pode ser direcionada para os fungos FMA, e ambas as moléculas podem atuar como osmólitos (Ozturk et al. 2021).

Amido

Nas concentrações de amido, observamos que nas folhas de jatobá os maiores teores de amido foram nas plantas de 25% CF com aproximadamente 14% superiores aos demais tratamentos. E entre os regimes hídricos, só foi observado diferenças estatísticas nas plantas de 25% da Cc, apresentando maior teor nas plantas com micorriza (figura 14).

Nas raízes, os tratamentos e entre os regimes hídricos não obteve diferenças estatísticas ($\leq 0,05$) nos teores de amido.

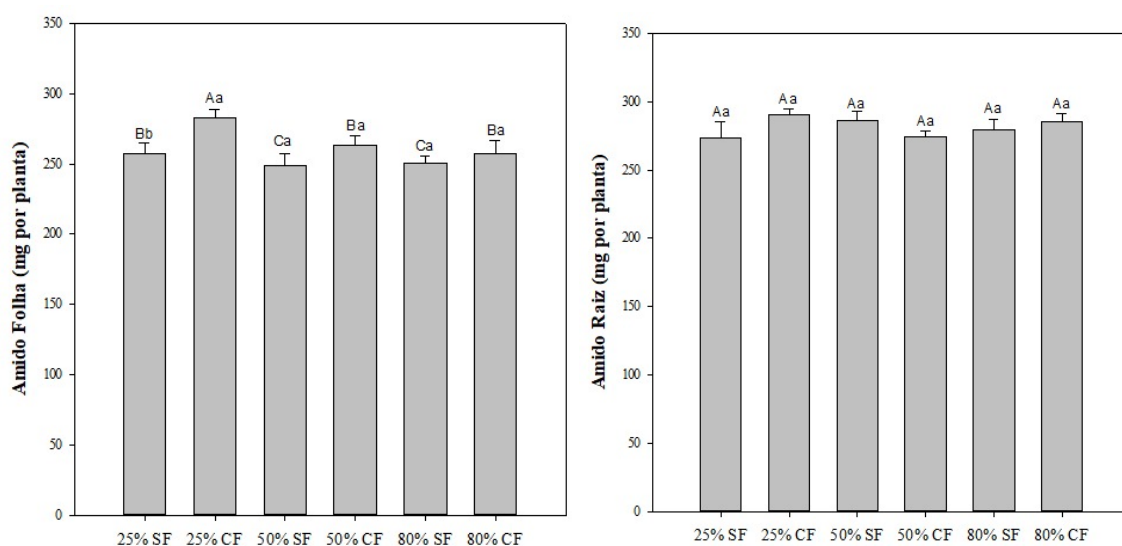


Figura 14. Concentração de amido em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

O maior acúmulo de amido nas folhas na presença de micorriza em comparação ao sem FMA, foi observado também com Gerlach et al., (2015). O amido é uma forma de armazenamento de energia nas plantas, e é composto por cadeias de glicose. Os açúcares redutores, como a glicose e a frutose, são utilizados na síntese do amido. Isso acontece durante o processo de fotossíntese, quando as plantas produzem açúcares que são posteriormente convertidos em amido para armazenamento.

De acordo com Martinez et al. (2004), aumentos no conteúdo de carboidratos em plantas sob estresse estão associados à diminuição do conteúdo de amido nas células, juntamente com a redução da capacidade de fotossíntese, o que resultará na paralisação do crescimento celular e na diminuição da síntese de sacarose para exportação.

O amido é uma forma de reserva de carboidratos nas plantas e pode ser mobilizado para fornecer energia durante períodos de estresse, então observa-se que nas folhas a concentração é superior as plantas sem micorriza. A presença de dos FMA influenciou a forma de como a planta lidou com o déficit hídrico em relação ao armazenamento do amido, provavelmente a mobilização eficiente do amido tenha garantido que as plantas tenham acesso a fontes de energia durante este momento de déficit.

Amônio

A concentração de amônio (NH_4^+) nas folhas diferiu entre os tratamentos e entre os regimes hídricos. ($\leq 0,05$), ao contrário das raízes que não diferiram. As maiores médias de concentrações sacarose foram observadas nos tratamentos 50% SF nas folhas, com diferença estatística de aproximadamente 42% entre os tratamentos (figura 15). Dentre os regimes hídricos, houve diferença significativa somente em 50% da Cc, sendo que as plantas sem micorrizas foram superiores a 36,4% as plantas sem micorrizas.

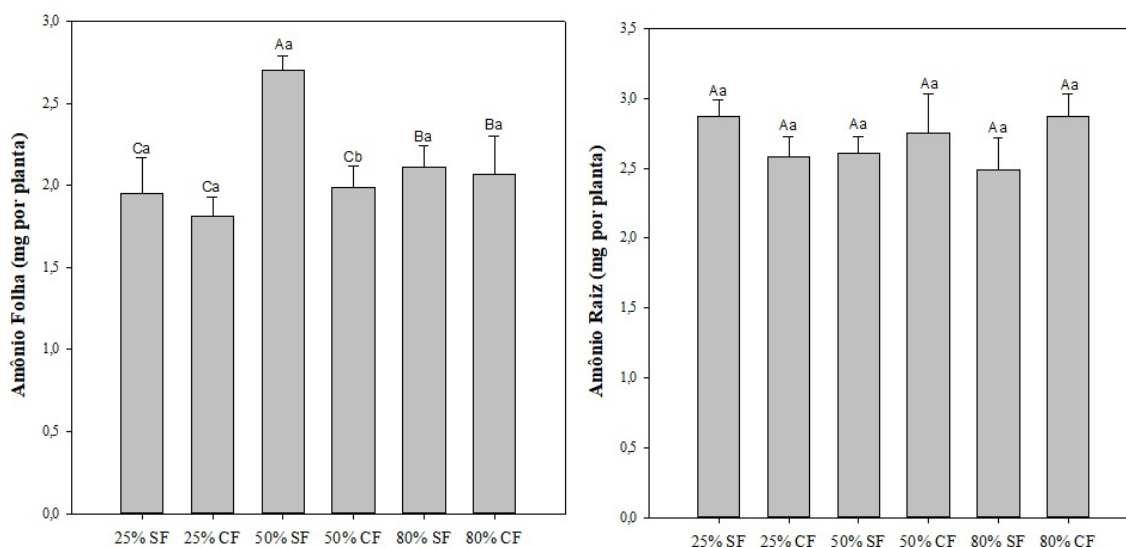


Figura 15. Concentração de amônio em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Quando as plantas estão sob estresse hídrico, a concentração de amônia livre pode aumentar nas células das plantas. Isso pode ocorrer devido a uma série de fatores, incluindo a interrupção do metabolismo e da atividade enzimática. O acúmulo

de amônia livre pode ter efeitos tóxicos sobre as células das plantas e interferir em vários processos fisiológicos.

Neste trabalho, pode-se supor que as plantas tentaram mitigar esses efeitos através de mecanismos de regulação interna, por este motivo, maior teor de amônio nas folhas das plantas sem fungo com 50% da Cc, uma vez que o estresse hídrico pode impactar negativamente o equilíbrio de nutrientes e compostos químicos dentro das células vegetais. Costa & Marengo (2007) encontraram resultados similares em plantas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl) submetidas ao estresse hídrico.

Nitrato

Nas concentrações de nitrato, observamos que nas folhas de jatobá os maiores teores foram nas plantas de 80% CF com aproximadamente 26% superiores aos demais tratamentos. E entre os regimes hídricos, não foi observado diferenças estatísticas nas plantas (figura 16).

Nas raízes, observou-se o acúmulo maior nos tratamentos sem micorrizas, com maiores médias nas plantas com 50 e 80% da Cc com 32,8% superiores aos demais tratamentos. E entre os regimes hídricos as diferenças estatísticas foram observadas nas Cc 50 e 80%, sendo que as plantas sem micorrizas foram 19% e 34% (respectivamente) superiores às plantas com micorrizas.

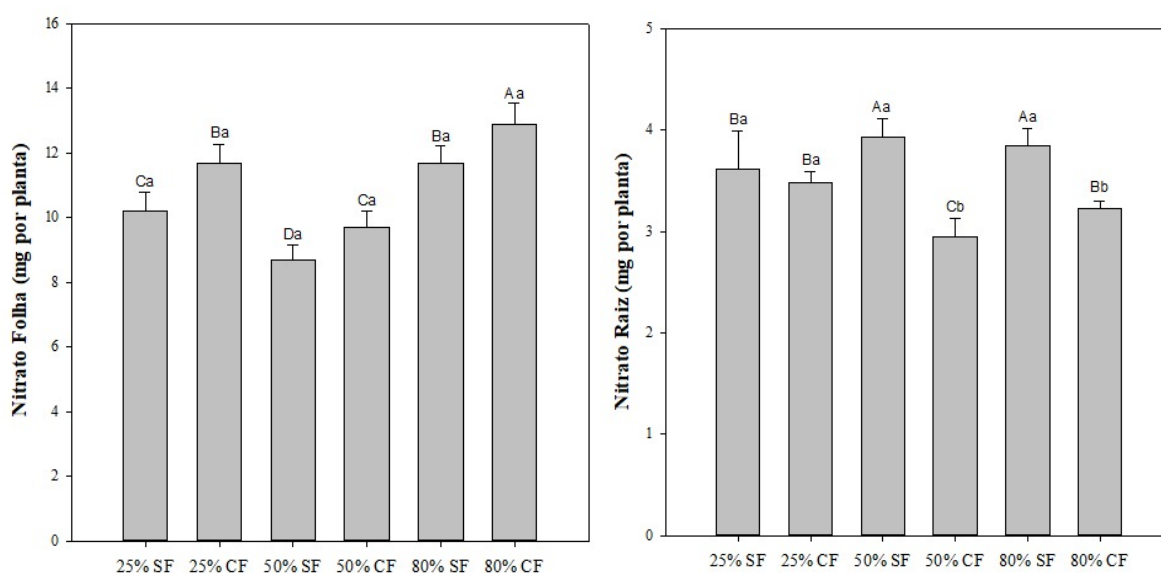


Figura 16. Concentração de Nitrato em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Durante condições de estresse hídrico, a disponibilidade de nitrato no solo pode ser afetada, e as plantas podem responder de maneiras diversas, incluindo a capacidade de absorver e utilizar o nitrato de forma eficiente.

A presença das micorrizas influenciou na absorção e a disponibilidade de nitrato para as plantas, principalmente na concentração de folhas, observando que nas raízes das plantas sem micorrizas, a concentração é inferior (em comparação as folhas), que provavelmente auxiliou na mitigação dos efeitos do déficit hídrico. Esta associação simbiótica entre as plantas e os fungos micorrízicos pôde contribuir para a melhor absorção de nutrientes, incluindo o nitrato, durante as condições de estresse. Resultado observado por Correia et al., (2022) encontraram resultados similares em plantas de Ipê amarelo (*H. serratifolius*) submetidas ao estresse hídrico.

A presença de micorrizas arbusculares (FMAs) tem sido associada a um aumento na atividade da enzima nitrato redutase e nitrito redutase em plantas. Essas enzimas desempenham um papel crucial na assimilação de nitrato pelas plantas, convertendo-o em compostos nitrogenados utilizáveis (Rani et al., 2017).

Os nitratos (NO₃⁻) são uma forma de nitrogênio essencial para o crescimento das plantas. Eles são absorvidos do solo pelas raízes e desempenham um papel fundamental na síntese de proteínas, no crescimento vegetal e na resposta ao estresse. O nitrato também pode ser convertido em outras formas de nitrogênio dentro das plantas, contribuindo para diversos processos metabólicos. O aumento do acúmulo de nitrato está associado a uma maior atividade da enzima nitrato redutase e nitrito redutase em plantas que estabelecem simbiose com FMAs (Rani et al., 2017).

Aminoácido solúveis totais

A concentração de Aminoácido Solúveis Totais nas folhas e raízes diferiu entre os tratamentos e entre os regimes hídricos. ($\leq 0,05$). As maiores médias de concentrações foram observadas nos tratamentos 50% CF nas folhas e 50% SF nas raízes das plantas (figura 17).

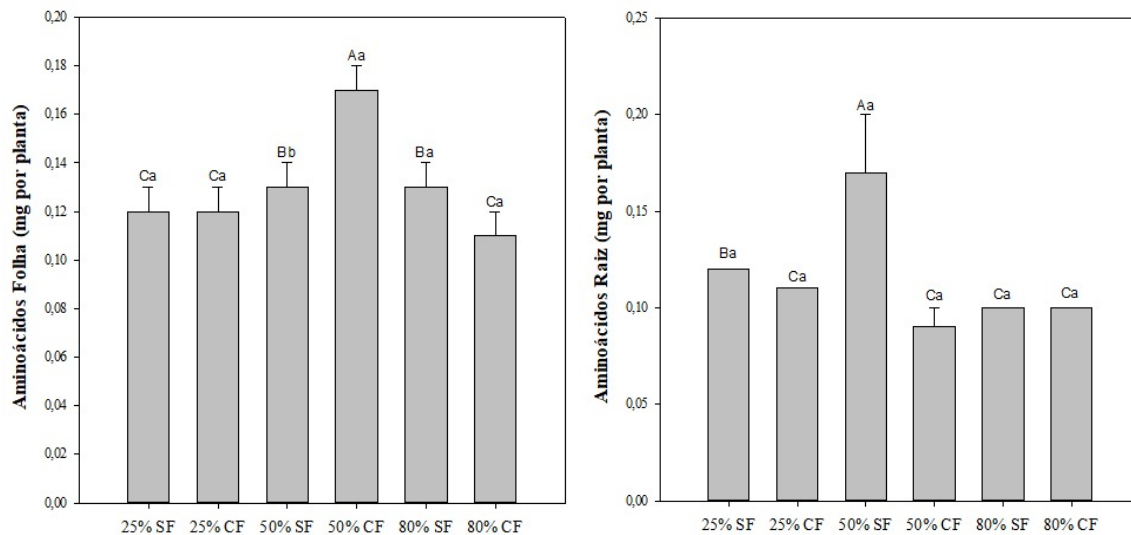


Figura 17. Concentração de aminoácidos solúveis totais em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

A concentração nas folhas, as plantas com 50% CF apresentaram maiores médias entre os tratamentos, com aproximadamente 27% de diferença entre os demais. Entre os regimes hídricos, houve diferença estatística apenas nas plantas de 50% da Cc, sendo que os FMA foram superiores (30,8%) as plantas sem micorrizas. Em relação a concentração nas raízes, as plantas com 50% SF apresentaram maiores médias entre os tratamentos, com aproximadamente 70% de diferença entre os demais. Entre os regimes hídricos, não houve diferença estatística nas plantas.

Em plantas sob déficit hídrico, os níveis de aminoácidos solúveis totais geralmente aumentam, observa-se que o teor de aminoácidos é maior nas folhas do que nas raízes. Isso ocorre como parte da resposta das plantas ao estresse, pois podem atuar como osmólitos, o que auxilia em manter a pressão osmótica e proteger as células vegetais da desidratação.

O acúmulo de aminoácidos em plantas sob estresse hídrico pode ser atribuído a vários fatores, incluindo a restrição da síntese de proteínas devido ao estresse, bem como distúrbios na translocação desses compostos para outros órgãos devido à deficiência hídrica nos tecidos do floema (Oliveira et al., 2013). Em condições de estresse hídrico, as plantas podem direcionar recursos para a síntese de aminoácidos como uma forma de regular sua homeostase interna e fornecer os precursores necessários para a adaptação e sobrevivência sob tais condições adversas. Essa é

uma estratégia importante que as plantas adotam para tentar manter sua integridade e função metabólica durante períodos de escassez de água (Oliveira et al., 2013).

O acúmulo de aminoácidos pode ser considerado um sinal de tolerância das plantas a diferentes estresses ambientais, incluindo o déficit hídrico. Os estudos realizados por Oliveira et al. (2013), Carvalho (2005) e Ferrari et al. (2015), corroboram essa ideia, demonstrando um aumento nos níveis de aminoácidos em plantas submetidas ao estresse hídrico. Esse acúmulo de aminoácidos pode estar associado à capacidade das plantas de regular seu metabolismo e manter a homeostase celular sob condições adversas, o que pode contribuir para sua sobrevivência e adaptação a esses estresses ambientais. Esses resultados fornecem insights valiosos sobre as respostas fisiológicas das plantas ao déficit hídrico e destacam o papel dos aminoácidos como componentes importantes dessas respostas adaptativas.

Proteínas solúveis totais

Nas concentrações de proteínas solúveis totais, observamos que nas folhas de jatobá os maiores teores foram nas plantas de 25% SF em média de 60% superior aos demais tratamentos, apresentando diferenças estatísticas ($\leq 0,05$). E entre os regimes hídricos, foi observado diferenças ($\leq 0,05$) nas plantas de 25% e 80% da Cc, apresentando maior teor nas plantas sem micorriza, com 31,7 e 24,3% respectivamente, superior as plantas sem micorrizas (figura 17).

Nas raízes, os tratamentos e entre os regimes hídricos obteve diferenças estatísticas ($\leq 0,05$). As plantas com 50% CF foram superiores aos demais tratamentos, e entre os regimes hídricos, houve diferença nas Cc de 25% e 50% sem FMA, sendo superiores à 20,8% e 11% respectivamente, em comparação as plantas com micorrizas. Na Cc de 80% não teve diferença estatística. Nas folhas, pode-se observar que na CC de 50% houve uma maior concentração de aminoácidos, conseqüentemente uma menor concentração de proteínas, demonstrando a estratégia de tolerância ao déficit hídrico moderado. Que durante condições de déficit hídrico, as plantas podem ajustar seu metabolismo para lidar com a escassez de água, e essa mudança na alocação de compostos nitrogenados é uma resposta comum.

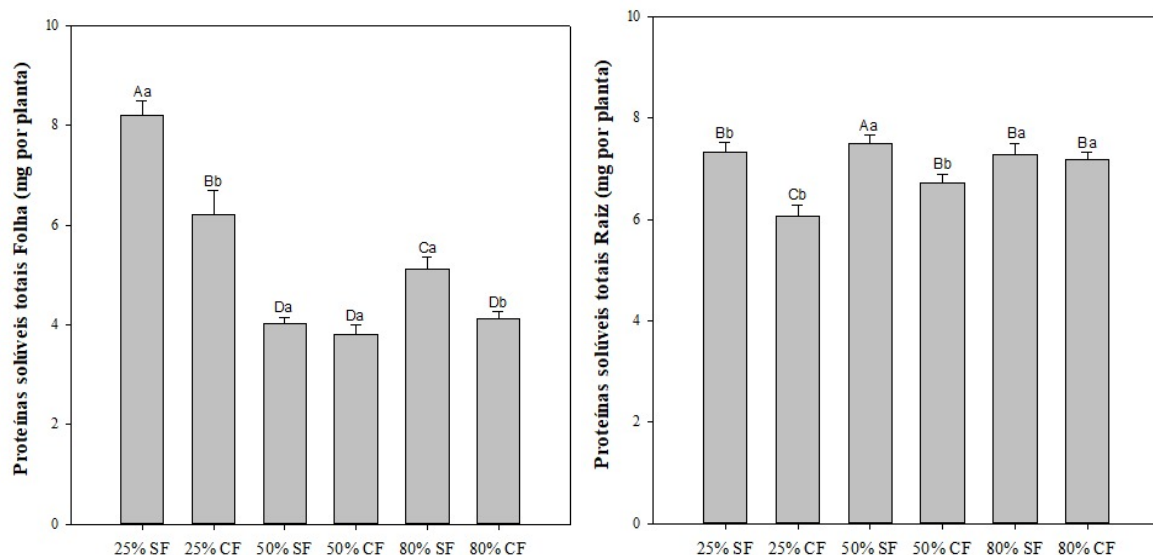


Figura 17. Concentração de proteínas solúveis totais em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

Durante condições de déficit hídrico, as plantas podem modificar a composição e concentração de proteínas totais como parte de sua resposta adaptativa. A presença de micorrizas pode influenciar essa resposta, uma vez que a simbiose pode afetar a absorção de nutrientes e a regulação do metabolismo da planta, como foi observado nas plantas sem micorrizas, que continham maiores concentrações em comparação as plantas com o FMA. Este resultado corrobora com Correia et al., (2022), que obteve a concentração de aproximadamente 48% superior as plantas com micorriza em plantas de Ipê amarelo (*H. serratifolius*) submetidas ao estresse hídrico.

A análise das proteínas solúveis totais em plantas submetidas a déficit hídrico com micorriza pode fornecer insights sobre as mudanças na composição proteica e nas estratégias adaptativas das plantas sob essas condições.

Prolina

A concentração de prolina nas folhas e raízes diferiu entre os tratamentos e entre os regimes hídricos. ($\leq 0,05$). As maiores médias de concentrações foram observadas nos tratamentos 25% CF nas folhas e nas raízes das plantas (figura 18).

Dentre os regimes hídricos, o acúmulo de prolina nas folhas dos tratamentos com 25, 50 e 80% da Cc foram superiores a 45,5%, 120% e 135,6% (respectivamente) as plantas sem micorrizas. Nas raízes, apenas a Cc de 25% que tiveram diferenças,

onde as plantas micorrizadas teve maiores médias (115,8%), em comparação as plantas sem micorrizas.

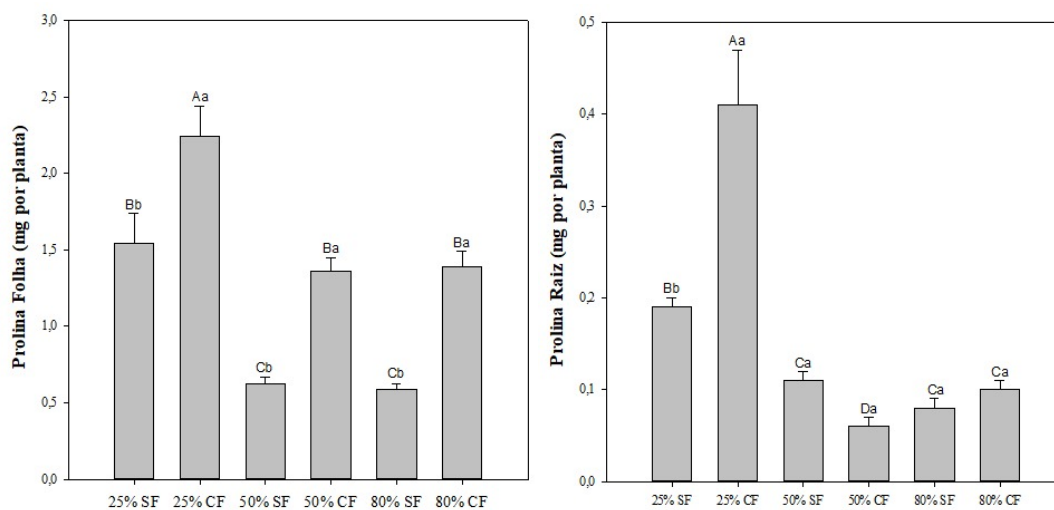


Figura 18. Concentração de Prolina em folhas e raízes de plantas de *H. courbaril* submetidas a diferentes regimes hídricos com interação de FMA. As médias seguidas de letras distintas diferem entre si ($p < 0,05$), onde as letras maiúsculas representam as diferenças entre os tratamentos e as letras minúsculas entre os regimes hídricos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 8$).

A prolina é um aminoácido que desempenha um papel importante nas plantas, atuando como um osmólito, ou seja, uma substância que ajuda a regular a pressão osmótica e protege as células vegetais contra condições de estresse, como a seca (Chen et al., 2013). E origina, no decorrer de seu catabolismo, a energia equivalente a cerca de 30 moléculas de ATP (Sharma & Prasad, 2011) e moléculas de nitrogênio (Al-Arjani et al., 2020; Ahanger et al., 2014), processo essencial para recuperação do estresse da planta.

Os altos teores de prolina nas folhas com FMA, indicam que estes organismos auxiliaram na adaptação e na mitigação dos efeitos do estresse hídrico nas plantas de Jatobá, uma vez que esta simbiose desempenha um papel crucial como osmólito, ajudando a regular a pressão osmótica e protegendo as células vegetais contra os efeitos adversos do estresse hídrico. Este resultado corrobora com Correia et al., (2022), Zou et al., (2013) e Zhang et al., (2019) que obteve concentração superiores nas plantas com FMA em comparação com as plantas sem FMA submetidas ao estresse hídrico. A presença de micorrizas influenciou os níveis de prolina nas plantas durante as condições de déficit hídrico.

É perceptível como o teor de prolina nas plantas pode estar relacionado à atividade das enzimas envolvidas em sua biossíntese. Além disso, as variações nos

níveis de aminoácidos em plantas sob estresse hídrico (figura 17) podem depender de diversos fatores, como a espécie, duração, intensidade do estresse, e interação de FMA - como observamos neste trabalho. Essa complexidade demonstra a quão dinâmica e adaptável é a resposta das plantas às condições desafiadoras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em geral, as mudas de *H. courbaril* apresentaram mudanças no crescimento e no metabolismo bioquímico na presença dos FMA. As concentrações de clorofila e carotenóides não foram influenciadas.

Nas plantas com micorrizas, observou-se maior crescimento no diâmetro do coleto, área foliar, comprimento e volume radicular. Além disso, observou-se também maior absorção de fósforo e manganês.

Mudas de *H. courbaril* com micorriza tendem a aumentar as reservas de carboidratos na planta. Por outro lado, as concentrações de sacarose diminuíram nas raízes com 80% do regime hídrico da planta e o amido foi alocado nas raízes, no mesmo regime.

Supõem-se que a osmorregulação em plantas de *H. courbaril* com FMA com déficit hídrico severo (25%) e moderado (50%) nos regimes hídricos é controlado pela prolina e aminoácidos.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SALAM, Eslam; ALATAR, Abdulrahman; EL-SHEIKH, Mohamed A. A inoculação com fungos micorrízicos arbusculares alivia os efeitos nocivos do estresse hídrico na rosa damascena. **Revista Saudita de Ciências Biológicas**, v. 25, n. 8, pág. 1772-1780, 2018.

Abramoff, MD; Magalhães, PJ; Ram, SJ Processamento de imagem com ImageJ. **Biofotônica Int.** 2006, 11, 249–258.

Agência Nacional De Águas (ANA). **Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos**, 2019. <http://conjuntura.ana.gov.br>, acessado em 20/01/2023.

ALGUACIL, M. M. et al. Plant type differently promote the arbuscular mycorrhizal fungi biodiversity in the rhizosphere after revegetation of a degraded, semiarid land. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, p. 167-173, 2011.

AL-KARAKI, G., MCMICHAEL, B., & ZAK, J. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. **Mycorrhiza**, 14(4), 263–269. 2004.

Al-Arjani, A.-BF; Hashem, A.; Abd_Allah, EF Fungos micorrízicos arbusculares modulam a expressão da tolerância dinâmica para mitigar o estresse hídrico em *Ephedra foliata* Boiss. *Saudita J. Biol. Ciência*. 27 , 380–394. 2020

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22: 711-728. 2013.

Ahanger, MA; Hashem, A.; Abd-Allah, EF; Ahmad, P. Micorrizas Arbusculares no Melhoramento de Culturas sob Estresse Ambiental. *Emergir. Tecnologia. Gerenciar. Tolerante ao estresse da colheita*. 2 , 69–95. 2014

ANDRADE, A. Pisos de madeira: características de espécies brasileiras, Piracicaba, SP, **ANPM**, p 133-136. 2015.

ANJUM, S.A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M.F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011.

ARAÚJO FILHO, J. A. Histórico do uso dos solos da caatinga. In: ARAÚJO, Q. R. de. 500 anos de uso do solo no Brasil. Bahia: **UESC**, p.329-338. 2002.

ARAÚJO, S. A. DO C., VASQUEZ, H. M., CAMPOSTRINI, E., NETTO, A. T., DEMINICIS, B. B., & LIMA, É. D. S. Características fotossintéticas de genótipos de capimelefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.), em estresse hídrico. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, 32(1), 1–7. 2010.

AUGÉ, R. M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Mycorrhiza**, v. 11, n. 1, p. 3-42, 2001.

BARROS, M. A. G. Flora medicinal do distrito federal. **Brasil Florestal**, v. 12, n. 50, p.35-45, 1982.

BASCOMPTE, J. Mutualism and biodiversity. **Current Biology**, v. 29, p. R467-R470, 2019.

BATES, LS; WALDREN, RP; TEARE, ID Determinação rápida de prolina livre para estudos de estresse hídrico. **Solo Vegetal**. 39 , 205–207. 1973.

BATISTA DE JESUS, J., KUPLICH, T. M., DE CARVALHO BARRETO, Í., NIEDERAUER DA ROSA, C., & HILLEBRAND, L. F. Temporal and phenological profiles of open and dense Caatinga using remote sensing: response to precipitation and its irregularities. 2021.

BAKHSHANDEH, Esmail et al. Efeitos das mudanças no uso da terra na qualidade do solo e na fertilidade biológica: um estudo de caso no norte do Irã. **Jornal Europeu de Biologia do Solo** , v. 103119, 2019.

BÁRZANA G.; AROCA R.; PAZ J.A.; CHAUMONT F.; MARTINEZ-BALLESTA M.C.; CARVAJAL M.; RUIZ-LOZANO J.M. 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**, v. 109, n. 5, p. 1009, 2012.

BENINCASA, M. M. P. Análise de crescimento de plantas Jaboticabal: **FUNEP**, p.42. 1988.

BENTO, L. F.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M.; PEREIRA, Z. V. Potential for recovery of *Campomanesia xanthocarpa* Mart. ex O. Berg seedlings from water deficit. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 2775-2785, 2016.

BHASKARA, G. B.; YANG, T. H.; VERSLUES, P. E. Dynamic proline metabolism: Importance and regulation in water limited environments. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 484, 2015.

BONDADA, B.; SHUTTHANANDAN, J. Understanding differential responses of grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaf and fruit to water stress and recovery following re-watering. **American Journal of Plant Sciences**, v.3, n.9, p.1232-1240, 2012.

BONFANTE, P.; DESIRÒ, A. Arbuscular mycorrhizas: the lives of beneficial fungi and their plant host. In: B. Lugtenberg (ed). Principles of Plant-Microbe Interactions. **Springer International Publishing Switzerland, Heidelberg**, p. 235-245, 2015.

BRADFORD, MARION M. Um método rápido e sensível para a quantificação de quantidades de microgramas de proteína utilizando o princípio da ligação proteína-corante. **Bioquímica analítica**, v. 72, n. 1-2, pág. 248-254, 1976.

BRONSTEIN, J. L.; DIECKMANN, U.; FERRIE`RE, R. Evolutionary Conservation Biology. Cambridge University Press, **Cambridge**. 2004.

CAIRO, P. A. R. Curso básico de relações hídricas de plantas. Vitória da Conquista, **UESB**, p. 32. 1995.

CASTELAR JVS, DA CUNHA M, SIMIONI PF, CASTILHORI MF, LIRA-MARTINS D, GILES AL, COSTA WS, ALEXANDRINO CR, CALLADO CH. Functional traits and water-transport strategies of woody species in an insular environment in a tropical forest. **Am J Bot.** 2023.

CATALDO, DA et al. Determinação colorimétrica rápida de nitrato em tecido vegetal por nitração de ácido salicílico. **Comunicações em ciência do solo e análise de plantas**, v. 6, n. 1, pág. 71-80, 1975.

CARVALHO, C. J. R. de. Respostas de plantas de *Schizolobium amazonicum* [S. *parahyba* var. *amazonicum*] e *Schizolobium parahyba* [*Schizolobium parahybum*] à deficiência hídrica. **Revista Árvore**, vol.29, n.6, p. 907-914, 2005.

CHEN, M.; VERNON, C. R.; GRAHAM, N. T.; HEJAZI, M.; HUANG, M.; CHENG, Y.;

CALVIN, K. Global land use for 2015–2100 at 0.05 resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2020.

CHEN, S.; JIN, W.; LIU, A.; ZHANG, S.; LIU, D.; WANG, F.; LIN, X.; HE, C. Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) aumentam o crescimento e o metabolismo secundário em pepino submetido a estresse de baixa temperatura. *Ciência. Hortico.* 160 , 222–229. 2013.

COELHO FILHO, M. A., BASSOI, L., ANGELOCCI, L., COELHO, E., & PEREIRA, F. D. C. **Relação solo-planta-atmosfera**. 2011.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A.; PASTORE, T.C.M.; CHRISTO, A.G. Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos = Brazilian commercial timbers: interactive identification key based on general and macroscopic features. **Serviço florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais**: Brasília, 2010.

CORREIA, T. S., LARA, T. S., SANTOS, J. A. D., SOUSA, L. D. S., & SANTANA, M. D. F.. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Promote Physiological and Biochemical Advantages in *Handroanthus serratifolius* Seedlings Submitted to Different Water Deficits. **Plants**, 11(20), 2731. 2022.

COSTA, GFD E MARENCO, RA. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta amazônica**, 37, 229-234. 2007.

Crawford, NM Nitrate: Nutriente e sinal para o crescimento das plantas. **Célula Vegetal**. 7 , 859–868. 1995.

da Sousa, L. D. S., Correia, T. S., Dos Farias, F. D. S., Santana, M. D. F., & Lara, T. S. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi density on growth and metabolism of *Handroanthus serratifolius* (Vahl) SO Grose seedlings. **Physiologia Plantarum**, 175(6), e14067. 2023.

EMBRAPA -Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. A EMBRAPA nos biomas brasileiros. Brasília: **Embrapa**, 16 f. 2004.

EPSTEIN, E., BLOOM, A. Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectiva. Londrina: Editora **Planta**, ISBN 85-99144-03-0. 416p. 2004.

FERRARI, E.; PAZ, A. da; SILVA, A. C. da. Déficit hídrico no metabolismo da soja em sementeiras antecipadas no mato grosso. **Nativa**, v.3, n.1, p.67-77, 2015.

FIGUEIRÔ A, J. M.; BARBOSA, D. C. A.; SIMABUKURO, E. A. Crescimento de plantas jovens de *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae) sob diferentes regimes hídricos. **Acta Botanica Brasílica**, v. 18, n. 3, p. 573-580. 2004.

GANDOLFI, S.; LEITÃO FILHO, H.F.; BEZERRA, C.L.F. Levantamento florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta mesófila

semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Rev. Brasil. Biol.**, 55 (4): 753-767, 1995.

GERLACH, N.; SCHMITZ, J.; POLATAJKO, A.; SCHLÜTER, U.; FAHNENSTICH, H.; WITT, S.; FERNIE, A. R.; UROIC, K.; SCHOLZ, U.; SONNEWALD, U.; BUCHER M. An integrated functional approach to dissect systemic responses in maize to arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Plant, Cell and Environment**, v. 38, n. 8, p. 1591-1612, 2015.

HART, M.; EHRET, D. L.; KRUMBEIN, A.; LEUNG, C.; MURCH, S.; TURI, C.; HOLSTE EK, HOLL KD, ZAHAWI RA, KOBE R. Reduced above ground tree growth associated with higher arbuscular mycorrhizal fungal diversity in tropical forest restoration. **Ecology and Evolution**. v. 6, n. 20, p. 7253–7262, 2016.

HOLSTE, E. K.; HOLL, K. D.; ZAHAWI, R. A.; KOBE, R. Reduced above ground tree growth associated with higher arbuscular mycorrhizal fungal diversity in tropical forest restoration. **Ecology and Evolution**, v. 6, n. 20, p. 7253–7262, 2016.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, v.24, p.519-570. 1973.

IDESP. Disponível em <<http://www.idesp.pa.gov.br/pdf/EstatisticaMunicipal/pdf/Santarem.pdf>>. Acesso em 26 de janeiro de 2023.

JALONEN, R.; TIMONEN, S.; SIERRA, J.; NYGREN, P. Arbuscular mycorrhizal symbioses in a cut-and-carry forage production system of legume tree *Gliricidia sepium* and fodder grass *Dichanthium aristatum*. **Agroforest Systems**, v. 87, n. 2, p. 319-330, 2013.

JUHOS K, PAPDI E, KOVÁCS F, VASILEIADIS VP, VERES A. The Effect of Wool Mulch on Plant Development in the Context of the Physical and Biological Conditions in Soil. **Plants** (Basel). 2023 Feb 3;12(3):684. doi: 10.3390/plants12030684. PMID: 36771767; PMCID: PMC9918954.

KALIL, LIVIA; CHECCO, GUILHERME B. Segurança hídrica e mudanças climáticas no Brasil: uma entrevista cruzada com Jerson Kelman e João Paulo Capobianco. *IdeAs*. **Idées d'Amériques**, n. 15, 2020.

KARLSSON, I. B.; SONNENBORG, T. O.; REFSGAARD, J. C.; TROLLE, D.; BORGESSEN, C. D.; OLESEN, J. E.; JENSEN, K. H. Combined effects of climate models hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 301-317, 2016.

KHALVATI, M. A., Hu, Y., Mozafar, A., & Schmidhalter, U. 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. 2005.

KRAMER, P. J. Drought, stress, and the origin of adaptations. In *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. (N.C. Turner, J.P. Kramer, eds.). Wiley, New York, p.7-20. 1980.

LACERDA, A. E. B.; KANASHIRO, M.; SEBBENN, A. M. Efeitos da exploração de impacto reduzido na diversidade genética e estrutura genética espacial de uma população de *Hymenaea courbaril* na floresta amazônica brasileira. **Ecologia e Manejo Florestal**, v. 255, n. 3, p. 1034-1043, 2008.

LEE, B. R.; MUNEER, S.; AVICE, J. C.; JUNG, W. J.; KIM, T. H. Mycorrhizal colonisation and P-supplement effects on N uptake and N assimilation in perennial ryegrass under wellwatered and drought-stressed conditions. **Mycorrhiza, Heidelberg**, v. 22, n. 7, p. 525–534, 2012.

LIMA, R.B.A.; SILVA, J.A.A.; MARANGON, L.C.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, R.K.S. Sucessão ecológica de um trecho de floresta ombrófila densa de terras baixas, Carauari, Amazonas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, nº67, p. 161-172. 2011.

LICHTHENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: Colowick SP, Kaplan (ed) *Methods in Enzymology*, v.148. **Academic**, San Diego. p.350-382. 1987.

LORENZI, H. Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 2ª ed. São Paulo: **Instituto Plantarum de estudos da Flora**; 368p. 2002.

LORENZI, H. Árvores Brasileiras:Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 7ª ed. São Paulo: **Instituto Plantarum de estudos da Flora**, 284p. 2016.

MARENCO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Revista de Estudos Avançados**, vol. 22, nº63, 2008.

MCCAIG, TN; ROMAGOSA, I. Medição e uso do estado hídrico de folhas excisadas em trigo. **Crop science** , v. 29, n. 5, pág. 1140-1145, 1989.

MILLER, G. L. Uso do reagente ácido dinitrosalicílico para determinação de açúcares redutores. **Química analítica**, v. 31, n. 3, pág. 426-428, 1959.

NASCIMENTO, H. H. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, E. C.; SILVA, M. A. Análise do crescimento de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em diferentes níveis de água no solo. **Revista Árvore**, v. 35, p. 617-626. 2011.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B.; SILVA, E. C. Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga. In: NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, E. L.; WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T. Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas. Recife: **UFRPE**, Imprensa Universitária, p. 22-31, 2005.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; MORAES, J. A. P. V., BURITY, H. A.; BEZERRA NETO, E. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, 13(1):75-87, 2001.

OLIVEIRA, JJF; SOUSA, RF; CARNEIRO, RFV; FONSECA, JM Crescimento inicial de plantas de leucena frente à inoculação micorrízica e adubação orgânica Crescimento inicial da planta leucena antes da inoculação micorrízica e adubação orgânica. **Rev. Brás. Agroecol.** 8 , 212–220. 2013.

OULEDALI, S.; ENNAJEH, M.; ZRIG, A.; GIANINAZZI, S.; KHEMIRA, H. Estimando a contribuição dos fungos micorrízicos arbusculares para a tolerância à seca de oliveiras em vasos (*Olea europaea*). **Acta Physiol. Plantar.** 40 , 81. 2018.

OZTURK, M.; TURKYILMAZ UNAL, B.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; KHURSHEED, A.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M. Osmoregulation and Its Actions during the Drought Stress in Plants. **Physiol. Plant.** 2021, 172, 1321–1335.

PELEJA, V. L., PELEJA, P. L., LARA, T. S., TRIBUZY, E. S., & DE MOURA, J. M. S. Seasonality and Phosphate Fertilization in Carbohydrates Storage: *Carapa guianensis* Aubl. Seedlings Responses. **Plants**, 11(15), 1956. 2022.

PIMENTEL, C. A relação da planta com a água. Seropédica, Rio de Janeiro. **EDUR**, 192 p. 2004.

PINTO, R.B.; TOZZI, A.M.G.A.; MANSANO, V.F. 2020. *Hymenaea* in Flora do Brasil 2020. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22972>. Acesso em: 18 jan. 2023.

PORCEL, R.; AROCA, R.; RUIZ-LOZANO, J. M. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, p. 181-200, 2012.

PORCEL, R.; BAREA, J. M.; RUIZ-LOZANO, J. M. Antioxidant activities in mycorrhizal soybean plants under drought stress and their possible relationship to the process of nodule senescence. **New Phytologist**, v.157, p.135–143, 2003.

RAMOS, K. M. O.; FELFILI, J. M.; FAGG, C. W.; SOUSA-SILVA, J. C.; FRANCO, A.C. Desenvolvimento inicial e repartição de biomassa de *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Smith, em diferentes condições de sombreamento. **Acta Botânica Brasilica**, v. 18, n. 2, p. 351-358, 2004.

Rani, B.; Madan, S.; Sharma, K.; Sim, P.; Berwal, MK; Kumar, A. Efeito da colonização micorrízica no metabolismo do nitrogênio e do fósforo no trigo (*Triticum aestivum* L.) sob estresse por déficit hídrico. **Internacional J. Curr. Microbiol. Apl. Ciência.** 2017 , 6 , 916–929.

RAPPARINI, F., & PEÑUELAS, J. Mycorrhizal Fungi to Alleviate Drought Stress on Plant Growth. In **Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses**, V. 1 (p. 21–42). 2013.

RIVERO, J.; GAMIR, R. A.; POZO, M. J.; FLORS, V. Metabolic transition in mycorrhizal tomato roots. **Frontiers in Microbiology**, v.6, n. 598, p.1-13, 2015.

ROSALES, M. A.; OCAMPO, E.; RODRÍGUEZ-VALENTÍN, R.; OLVERA-CARRILLO, Y.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; COVARRUBIAS, A. A. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux, v. 56, p. 24–34, 2012.

RUIZ-LOZANO, J., PORCEL, R., BÁRZANA, G., AZCÓN, R., & AROCA, R. 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**. 2012.

RUIZ-LOZANO, J. M. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies. **Mycorrhiza, Heidelberg**, v. 13, n. 6, p. 309–17, 2003

SAIRAM, RK; SRIVASTAVA, GC Alterações na atividade antioxidante em frações subcelulares de genótipos de trigo tolerantes e suscetíveis em resposta ao estresse salino de longo prazo. **Plant Science**, v. 162, n. 6, pág. 897-904, 2002.

SÁNCHEZ-BLANCO, M. J.; FERRÁNDEZ, T.; MORALES, M. A.; MORTE, A.; ALARCÓN, J. J. Variations in water status, gas exchange, and growth in *Rosmarinus officinalis* plants infected with *Glomus deserticola* under drought conditions. **Journal of plant physiology**, Stuttgart, v. 161, n. 6, p. 675–682, 2004.

SCHURR, U. Growth physiology: approaches to a spatially and temporally varying problem. **Progress in Botany**, v. 3, p. 355-373, 1998.

SHANLEY, P. Jatobá: *Hymenaea courbaril* L. In: SHANLEY, P.; MEDINA, G. (Ed.). *Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica*. Belém, PA: **CIFOR**. p. 105-113. 2005.

Sharma, M.; Prasad, R. A molécula Quorum-Sensing Farnesol é um modulador do efluxo de drogas mediado por transportadores multidrogas ABC e sinergiza com drogas em *Candida albicans*. *Antimicrobiano. Agentes Quimoter.* 55 , 4834–4843. 2011.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, V. L.; MIGUEL, D. L.; SILVA, E. M. R. fungos micorrízicos arbusculares: composição, comprimento de micélio extrarradicular e glomalina em áreas de mata atlântica, Rio de Janeiro. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p.419-433, 2016.

SILVA, S. R. S.; DEMUNER, A. J.; BARBOSA, L. C. A.; CASALI, V. W. D.; NASCIMENTO, E. A.; PINHEIRO, A. L. Efeito do estresse hídrico sobre características de crescimento e a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1363-1368. 2002.

SINGH, M.; KUMAR, J.; SINGH, S.; SINGH, V.P.; PRASAD, S.M. Roles of Osmoprotectants in Improving Salinity and Drought Tolerance in Plants: A Review. **Rev. Environ. Sci. Biotechnol.** 14, 407–426. 2015.

SIQUEIRA, J., SAGGIN-JÚNIOR, O., FLORES-AYLAS, W. Arbuscular mycorrhizal inoculation and superphosphate application influence plant development and yield of coffee in Brazil. **Mycorrhiza** 7, 293–300.1998.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica Sistemática**. 4. ed. [S. l.]: Instituto plantarum, 2019.

TATARANNI G, SANTARCANGELO M, SOFO A, XILOYANNIS C, TYERMAN SD, DICHIO B. Correlations between morpho-anatomical changes and radial hydraulic conductivity in roots of olive trees under water deficit and rewatering. **Tree Physiol.** 2015 Dec;35(12):1356-65. doi: 10.1093/treephys/tpv074. Epub 2015 Oct 7. PMID: 26446266.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia Vegetal** 6. ed. Porto Alegre: Artmed. 918p. 2017.

TAIZ, LINCOLN et al. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal**. Artmed Editora, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2021.

TEDESCO, M. J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **Faculdade de Agronomia** . 174p. 1995.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. Manual de Métodos de Análise de Solo, 3rd ed.; **Embrapa**: Brasília, Brazil. pp. 95–116. 2017.

TEIXEIRA-SANTOS J, RIBEIRO ACDC, WIIG Ø, PINTO NS, CANTANHÊDE LG, SENA L, MENDES-OLIVEIRA AC. Environmental factors influencing the abundance of four species of threatened mammals in degraded habitats in the eastern Brazilian Amazon. **PLoS One**. 2020.

TIAGO, P. V.; ROSSI, A. A. B.; CARPEJANI, A. A.; TIAGO, A. V.; DA ROCHA, V. D., FERNANDES, J. M.; DA SILVA, I. V. Diversidade genética e estrutura populacional de Jatobá: uma espécie com potencial econômico para a Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 515-524, 2018.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; MARTIN, F. M.; SELOSSE, M. A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**, v.205, n.4, p.1406-1423, 2015.

VAN HANDEL, Emile. Microdeterminação direta de sacarose. **Bioquímica analítica**, v. 22, n. 2, p. 280-283, 1968.

VASQUEZ-TELLO, A., Y. ZUILY-FODIL, A. T. PHAM THI & J. VIEIRA DA SILVA. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for

screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. **Journal of Experimental Botany**, 41: 827-32. 1990.

WEATHERBURN, M. W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical chemistry**, v. 39, n. 8, p. 971-974, 1967.

WU, Q.-S., & ZOU, Y.-N. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Drought Stress in Plants. In *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (pp. 25–41). **Springer Singapore**. 2017.

WU, Q.-S., SRIVASTAVA, A. K., & ZOU, Y.-N. AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. **Scientia Horticulturae**, 164, 77–87. 2013.

WU, QS, LOU, YG E LI, Y. Crescimento das plantas e metabolismo da sacarose nos tecidos no sistema de fungos micorrízicos trifoliados alaranjados e arbusculares. **Scientia Horticulturae** , 181 , 189-193. 2015.

WU, Q. S.; W.; HE, J. D.; SRIVASTAVA. A. K.; ZOU, Y. N.; KUČA, K. Mycorrhizas enhance drought tolerance of citrus by altering root fatty acid compositions and their saturation levels. **Tree Physiology**, v. 39, n. 7, p. 1149-1158, 2019.

YEMM E.W., COCKING E.F. The determination of amino acids with ninhydrin. **Analyst**, 80, 209–213, 1955.

Yooyongwech, S.; Samphumphuang, T.; Tisarum, R.; Theerawitaya, C.; Cha-Um, S. Fungos micorrízicos arbusculares (AMF) melhoraram a tolerância ao déficit hídrico em dois genótipos diferentes de batata-doce envolve ajustes osmóticos via açúcar solúvel e prolina livre. **Ciência. Hortico**. 198 , 107–117. 2016.

YEMM, EW; WILLIS, AJ1269789. A estimativa de carboidratos em extratos vegetais por antrona. **Revista bioquímica** , v. 57, n. 3, pág. 508, 1954.

ZHANG, FEI, HE, J.-D., NI, Q.-D., WU, Q.-S., & ZOU, Y.-N. 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. 2018.

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

ZHU, X. Q.; TANG, M.; ZHANG, H. Q. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced the growth, photosynthesis, and calorific value of black locust under salt stress. **Photosynthetica**, v. 55, n. 2, p. 378-385, 2017.

Zou, Y.-N.; Wu, Q.-S.; Huang, Y.-M.; Ni, Q.-D.; Ele, X.-H. O acúmulo inferior de prolina mediado por micorrizas em *Poncirus trifoliata* sob déficit hídrico deriva da integração da inibição da síntese de prolina com o aumento da degradação de prolina. **PLoS UM**, 8 , e80568. 2013.