



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS E AGRÁRIAS
CURSO DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

VANESSA DE AZEVEDO SOARES

**METIL JASMONATO NA MITIGAÇÃO DOS DANOS MORFOFISIOLÓGICOS
CAUSADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE RABANETE (*Raphanus
sativus* L.)**

**Bananeiras
2023**

VANESSA DE AZEVEDO SOARES

**METIL JASMONATO NA MITIGAÇÃO DOS DANOS MORFOFISIOLÓGICOS
CAUSADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE RABANETE (*Raphanus
sativus* L.)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Coordenação do Curso de Licenciatura em
Ciências Agrárias, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Licenciado em Ciências Agrárias

Orientador: Prof. Dr. Diego Silva Batista

Coorientadora: Dr^a. Juliane Maciel Henschel

Bananeiras
2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S676mm Soares, Vanessa de Azevedo.

Metil Jasmonato na mitigação dos danos morfofisiológicos causados pelo déficit hídrico em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.). / Vanessa de Azevedo Soares. - Bananeiras, 2023.

36 f. : il.

Orientação: Diego Batista.

Coorientação: Juliane Henschel.

TCC (Graduação) - UFPB/CCHSA.

1. Metil jasmonato. 2. Rabanete. 3. Déficit hídrico.
I. Batista, Diego. II. Henschel, Juliane. III. Título.

UFPB/CCHSA-BANANEIRAS

CDU 635.15

VANESSA DE AZEVEDO SOARES

**METIL JASMONATO NA MITIGAÇÃO DOS DANOS MORFOFISIOLÓGICOS
CAUSADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE RABANETE (*Raphanus
sativus* L.)**

Monografia apresentada e aprovada em
25/10/2023, para obtenção do título de
Licenciado em Ciências Agrárias, na
Universidade Federal da Paraíba,
Campus III.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO SILVA BATISTA**
Data: 27/11/2023 12:18:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Diego Silva Batista
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **JULIANE MACIEL HENSCHEL**
Data: 27/11/2023 19:40:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Juliane Maciel Henschel
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 **BELISIA LUCIA MOREIRA TOSCANO DINIZ**
Data: 27/11/2023 10:45:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Belisia Lucia Moreira Toscano Diniz
Examinador(a)

Daniel da Silva Gomes

Msc. Daniel da Silva Gomes
Examinador(a)

Dedico este trabalho aos meus pais e a todo esforço que fizeram para que eu chegasse até aqui, esta conquista não é apenas minha, é nossa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por todas as bênçãos e conquistas. A minha família, meus pais, meus irmãos que sempre me apoiaram e me deram forças quando precisei.

A Universidade Federal da Paraíba, ao Centro de Ciências Humanas, sociais e agrárias, aos professores do curso por todas oportunidades e ensinamentos. A FAPESQ e CNPq pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsas.

Imensa gratidão ao professor Dr. Diego da Silva Batista e Dra. Juliane Maciel Henschel, pela orientação na iniciação científica e na construção desse trabalho, obrigada por todos os ensinamentos e por serem tão incríveis e presentes, vocês são inspiradores.

A banca presente e a todas as contribuições feitas para a melhoria do trabalho.

Aos meus amigos, em especial à Francitânia Vitória, que sempre se manteve presente, ajudou e vem ajudando a superar tantas inseguranças, me acalmou e segurou minha mão nos dias mais difíceis. Obrigada por tudo, gostaria que todo mundo pudesse sentir o quão maravilhoso é ter uma amizade sincera, verdadeira e leve como a sua.

A Estephanni, Daniel e Sabrina, obrigada por toda ajuda e apoio, ao lado de vocês aprendi muito, vocês são incríveis.

RESUMO

O rabanete (*Raphanus sativus* L.) é uma hortaliça de raiz tuberosa comestível rica em antioxidantes, carboidratos, açúcares, fibras alimentares, proteínas, vitaminas e minerais. A seca é um dos fatores mais limitantes para o desenvolvimento das culturas e produção agrícola. Assim, as plantas possuem mecanismos de defesa e vias de sinalização para suportar os problemas causados pela falta de água. Dentre tais mecanismos, pode-se destacar as respostas mediadas por hormônios como o metil jasmonato (MJ), o qual vem sendo relacionado à indução de tolerância a estresses bióticos e abióticos. Visto isso, este trabalho teve o objetivo de avaliar a eficiência da aplicação do MJ sobre os efeitos do déficit hídrico na morfofisiologia das plantas de rabanete. As plantas foram submetidas aos tratamentos com 80% da capacidade de campo ou com restrição hídrica total dos 15 aos 30 DAS, sendo pulverizadas com água (controle) ou MJ na concentração de 100 µM. A aplicação foi realizada a cada sete dias, com borrifadores manuais. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 2 (níveis de umidade no solo x MJ), com 10 repetições. Foram avaliados parâmetros fisiológicos e morfológicos. Observou-se que o déficit hídrico reduziu o crescimento e trocas gasosas das plantas. Por outro lado, a aplicação de MJ reduziu a área foliar específica e o extravasamento de eletrólitos, agindo de forma isolada. No entanto, não afetou os demais parâmetros de crescimento e trocas gasosas. De forma geral, o MJ não atenuou os efeitos do déficit hídrico em rabanete.

Palavras-chave: Metil jasmonato. Rabanete. Déficit hídrico. Tolerância à seca.

ABSTRACT

Radish (*Raphanus sativus* L.) is an edible tuberous root vegetable rich in antioxidants, carbohydrates, sugars, dietary fiber, protein, vitamins, and minerals. Drought is one of the most limiting factors for crop development and agricultural production. Plants have defense mechanisms and signaling pathways to withstand the problems caused by water scarcity. Among these mechanisms, are the responses mediated by hormones, such as methyl jasmonate (MJ), which has been related to the induction of tolerance to biotic and abiotic stresses. Thus, this work aimed to evaluate the efficiency of MJ application on the effects of water deficit on the morphophysiology of radish plants. Plants were submitted to treatments with 80% of field capacity or total water restriction from 15 to 30 days after seedling (DAS), being sprayed with water (control) or 100 µM MJ. The application was carried out every seven days, with manual sprayers. The experimental design was completely randomized, in a 2 x 2 factorial scheme (irrigation levels x MJ application), with 10 replications, composed by one vessel with one plant. At 30 DAS, morphophysiological parameters were assessed. Water deficit reduced plant growth and gas exchange. On the other hand, the MJ application isolated reduced the specific leaf area and electrolyte leakage. However, it did not affect the other growth and gas exchange parameters. Overall, MJ did not attenuate the effects of the water deficit in radish.

Keywords: Methyl jasmonate. Radish. Drought. Drought tolerance.

LISTA DE SIGLAS

A – Assimilação líquida de carbono

AA - Ácido ascórbico

ABA – Ácido abscísico

CC – Capacidade de campo

CCHSA – Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias

CE1 - Condutividade elétrica inicial

CE2 - Condutividade elétrica final

DAS – Dias após a semeadura

E – Transpiração

ECI – Eficiência de carboxilação

EE – Extravasamento de eletrólitos

EiUA: Eficiência intrínseca no uso de água.

EROs – Espécies reativas de oxigênio

F_0 - Fluorescência mínima da clorofila *a* no estado adaptado ao escuro

F_M - Fluorescência máxima da clorofila *a* no estado adaptado ao escuro

F_V/F_M - O rendimento quântico máximo de PSII

Gs- condutância estomática

MF – Massa fresca

MJ - Metil jasmonato

MS – Massa seca

MT – Massa túrgida

SOD – Superóxido dismutase

TRA - Teor relativo de água

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

SUMÁRIO

SUMÁRIO	9
1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
Rabanete	14
Seca	15
Déficit hídrico	16
Mecanismos de defesa ao déficit hídrico	17
Alterações morfológicas.....	19
Respostas ao déficit hídrico no rabanete	20
Metil Jasmonato	20
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O rabanete (*Raphanus sativus* L.) é uma hortaliça de raiz tuberosa comestível pertencente à família Brassicaceae (Henschel et al., 2021). Sua raiz possui coloração vermelha e polpa branca, podendo variar de tamanho e formato (Nishio, 2017). Suas raízes e folhas são ricos em antioxidantes como compostos fenólicos e carotenoides, além de conter carboidratos, açúcares, fibras alimentares, proteínas, algumas vitaminas hidrossolúveis (B1, B2, B3, B5, B6, B9 e C) e minerais (cálcio, ferro, magnésio, zinco, manganês, potássio e fósforo), sendo um vegetal de alto valor nutricional e com características medicinais (Banihani, 2017).

Essa cultura apresenta ciclo rápido, podendo durar de 25 a 30 dias após a semeadura, e tal característica permite que o rabanete seja uma ótima opção para a agricultura familiar e para uso em rotações ou consórcio (Akram, et al., 2016; Goyeneche et al., 2015). O rabanete também pode ser usado como cultura de cobertura para evitar a erosão do solo, diminuindo a compactação por conta de suas raízes que o perfuram (Nishio, 2017). Além de ser uma espécie de alto potencial nutricional, o rabanete possui características interessantes que o tornam um bom modelo para estudo, como sua alta atividade de dreno, partição de biomassa e produtividade em condições de estresse (Sugiura et al., 2015; Stagnari et al., 2017; Chen et al., 2019).

A água é fundamental para o desenvolvimento e crescimento das plantas e o fator mais limitante para a produção agrícola (Stagnari et al., 2016). Atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, vêm aumentando a concentração dos gases de efeito estufa e contribuindo para o aquecimento global, tais eventos podem acarretar em secas mais intensas e duradouras, afetando processos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos das plantas e diminuindo assim o desenvolvimento e a produção das espécies cultivadas (Gray e Brady, 2016).

As plantas por serem organismos sésseis, podem passar por diversos estresses abióticos ao longo do seu ciclo de vida, como a seca, que é considerada um dos fatores mais limitantes para o desenvolvimento das culturas e produção agrícola. Os danos causados pela seca variam de acordo com o nível de estresse e estágio de crescimento da planta. Estima-se que fatores abióticos reduzem cerca de 50% da produção agrícola, dos quais 10% são atribuídos à seca (Lamaoui et al., 2018; Zia et al., 2021; Fathi e Tari, 2016).

Para suportar os problemas causados pela falta de água, as plantas ativam mecanismos de defesa e vias de sinalização. As respostas de tolerância variam de acordo com a duração e intensidade do estresse (Harb et al., 2010). Uma das primeiras respostas das plantas ao déficit

hídrico é a síntese de ácido abscísico, que induz o fechamento estomático, reduzindo a perda de água por meio da transpiração (Fathi e Tari, 2016; Basu et al., 2016). Outra estratégia inicial para diminuir os efeitos do déficit hídrico, é a redução do tamanho e número de folhas, possuindo menor área de transpiração e passando a exigir menos água (Fathi e Tari, 2016). Contudo, o fechamento estomático e redução da área foliar resultam em menor absorção de CO₂ que posteriormente afetará a eficiência da fotossíntese (Basu et al., 2016). Além disso, o déficit hídrico causa danos consideráveis aos pigmentos fotossintéticos, degradando a membrana dos tilacóides e reduzindo os teores de clorofila, diminuindo a absorção de luz (Rao e Chaitanya, 2016).

A deficiência hídrica altera o balanço hídrico das plantas devido à redução do teor de água e potencial hídrico no solo, dificultando a absorção de água e reduzindo o turgor celular (Osakabe et al., 2014). Alguns compostos como glicina betaína, prolina e ácido abscísico e outros antioxidantes são sintetizados para e expressos para manter o potencial osmótico e proteger a integridade estrutural das células, protegendo as plantas dos efeitos prejudiciais do déficit hídrico (Zargar et al., 2017).

O déficit hídrico severo desencadeia a produção das espécies reativas de oxigênio (EROs), que são originadas devido a diminuição de CO₂ intracelular, resultando na transferência de elétrons da cadeia transportadora de elétrons para o oxigênio no fotossistema I (Rao e Chaitanya, 2016). Estas moléculas são encontradas principalmente nas formas de superóxido (O₂⁻), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), oxigênio singleto (¹O₂) e radical hidroxila (HO[•]), e podem causar danos aos fosfolipídios e proteínas das membranas e à estrutura do DNA, prejudicando a integridade da célula e induzindo a morte celular (Das e Roychoudhury, 2014).

O metil jasmonato (MJ) é um hormônio vegetal que funciona como sinalizador molecular, responsável por regular vários processos fisiológicos e bioquímicos, afetando a tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos (Yu et al., 2018). Estudos vêm indicando a eficácia do MJ na tolerância contra estresses bióticos e abióticos, por estar envolvido em sistemas de transdução, que induzem enzimas específicas catalisadoras de reações biosintéticas para formar compostos de defesa, como polifenóis, alcalóides e antioxidantes (Yu et al., 2018). Além disso, o MJ desencadeia a reprogramação da expressão gênica, permitindo assim que células vegetais lidem com os ferimentos causados por insetos, patógenos e estresses ambientais, incluindo seca, salinidade e metais pesados (Yu et al., 2018; Anjum et al., 2016).

A aplicação de MJ tem se mostrado eficaz em plantas de trigo submetidas ao déficit hídrico, aumentando altura, número de folhas, e comprimento do pendão (Anjum et al., 2016). Em plantas de milho sob déficit hídrico, MJ induziu o aumento de compostos orgânicos como prolina, açúcares solúveis totais e aminoácidos livres, também houve o aumento de atividades de enzimas como peroxidase, superóxido dismutase e catalase (Abdelgawad et al., 2014). Miranshahi e Sayyari (2016), relataram que o MJ teve efeito significativo em parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos em plantas de segurelha em restrição hídrica, melhorando o crescimento, teor relativo de água, prolina, antioxidantes e porcentagem de óleo essencial.

Tendo em vista os problemas que a seca traz para o desenvolvimento e produção das culturas e a necessidade do uso racional da água, é de suma importância estudar os mecanismos e respostas das plantas à seca, para posteriormente desenvolver estratégias de cultivo que resultem em maior tolerância ao déficit hídrico. Como foi visto acima, o MJ teve resultados positivos na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico, podendo vir a ser uma estratégia para lidar com esse problema (Anjum et al., 2016; Abdelgawad et al., 2014; Miranshahi e Sayyari 2016). Assim, este trabalho teve o objetivo geral de avaliar os efeitos da aplicação do MJ sobre a morfofisiologia de plantas de rabanete sob déficit hídrico. E como objetivos específicos, analisar o efeito do metil jasmonato e do déficit hídrico nas trocas gasosas, fluorescência, pigmentos fotossintéticos, integridade das membranas e biomassa foliar e radicular.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Rabanete

O rabanete (*Raphanus sativus* L.) é uma hortaliça de raiz tuberosa comestível pertencente à família Brassicaceae, sendo uma das famílias de vegetais mais consumidas ao redor do mundo devido ao seu conteúdo de nutrientes e seus compostos químicos benéficos a saúde (Gamba et al., 2021). Originado na Ásia e Europa, o rabanete possui grande importância econômica (Silva et al., 2020; Henschel et al., 2021). Sua raiz possui coloração vermelha e polpa branca, podendo variar de tamanho e formato (Nishio, 2017). O rabanete começou a ser consumido no antigo Egito por volta de 2700 anos AC, sendo cultivado na Europa a partir do século XV e introduzido na América durante o século XX (Kaneko, et al., 2007). A raiz é a parte mais consumida, porém o consumo de folhas e brotos vem aumentando nos últimos anos. Podem ser consumidos em saladas ou cozidos juntamente com outros vegetais. É uma hortaliça com baixo teor calórico, ficando em quinto lugar no ranking de consumo da família Brassicaceae, totalizando 6%, ficando atrás couve flor, brócolis, repolho branco e normal (Gamba et al., 2021). Esse vegetal vem sendo utilizado para alimentação humana e para o tratamento de enfermidades como complicações respiratórias, hepáticas e diabetes, devido seu alto valor nutricional, sendo rico em carboidratos, açúcares, fibras alimentares, proteínas, além de várias vitaminas hidrossolúveis (B1, B2, B3, B5, B6, B9 E C), possuindo ainda minerais como magnésio, fósforo, cálcio, zinco, manganês e potássio (Banihani, 2017).

Possui ciclo rápido, podendo durar em média de 25 a 30 dias após a semeadura, dessa forma, o rabanete tem potencial para ser uma ótima opção para a agricultura familiar e para uso em rotações ou consórcio, pois em um curto período de tempo estará pronto para o consumo e comercialização, além de ser uma cultura de fácil manejo. É intolerante ao transplante, com semeadura feita em local definitivo, podendo ser cultivado durante todo o ano, inclusive com outras culturas de ciclo mais longos (Akram, et al., 2016; Goyeneche et al., 2015). Outra característica importante do rabanete é a sua capacidade de ser usado como cultura de cobertura para evitar a erosão do solo, diminuindo a compactação por conta de suas raízes que o perfuram, assim melhorando os aspectos físicos, facilitando também a passagem da água (Nishio, 2017). No Brasil, a produção de rabanete vem crescendo, no ano de 2017 foram produzidas 8.031 mil toneladas, totalizando o valor de 13.927 mil reais, tendo como maior produtor o estado de São Paulo (IBGE, 2017).

Seca

A água é o elemento mais abundante do planeta Terra, ainda assim a população mundial sofre com as consequências da sua falta, sendo a maior causa limitante de produção às culturas (Begg e Turner, 1976).

Seca é um termo meteorológico utilizado para um período de precipitação pluviométrica considerado insuficiente (Taiz e Zeiger, 2017). Sendo reconhecida como um desastre ambiental que ocorre em praticamente todas as zonas climáticas, independente de possuir alta ou baixa pluviosidade (Wilhite, 2000).

A seca difere dos demais desastres naturais (inundações, ciclones, terremotos, etc.), pois seus efeitos podem acumular-se lentamente ao longo dos anos e serem perpetuados por um longo período de tempo após o evento, sendo considerada um fenômeno “rastejante”, pois devido a esses aspectos, é difícil determinar seu início e fim (Wilhite, 2000). Apesar dos vários anos de estudo, cientistas e climatologistas ainda sentem dificuldade para reconhecer o início de uma seca e de estabelecer critérios para declarar o fim. Assim, a falta de uma definição precisa implica em uma certa confusão para analisar se há ou não a existência de um evento de seca em determinada região e se sim, qual é o grau de sua severidade (Wilhite, 2000).

Wilhite (2000), aponta que para determinar o grau de severidade de uma seca, é preciso avaliar não só sua duração, mas também outros pontos, como intensidade e cobertura espacial. A seguir as notas do autor sobre cada ponto:

Intensidade: Refere-se à gravidade do déficit de precipitação pluviométrica, ou ao grau dos impactos associados a esse déficit. Geralmente é feito a comparação entre o índice de precipitação normal e o índice de precipitação real, em um período de tempo que varia de um a doze meses ou mais.

Duração: As secas normalmente exigem um mínimo de dois a três meses para se estabelecer, mas depois podem continuar por meses ou anos. A magnitude dos impactos da seca está intimamente relacionada com o momento de seu início, a escassez de precipitação, sua intensidade e a duração do evento.

Cobertura espacial: As áreas afetadas pela seca podem mudar gradualmente com o tempo de estação para estação, não atingindo todo o território do país, como é o caso do Brasil.

A seca causa grande impactos em vários países ao redor do mundo, nas regiões da China e Índia no ano de 2012, estima-se que mais de meio milhão de pessoas tiveram suas vidas afetadas por conta dos períodos de estiagem, comprometendo o desenvolvimento

econômico das regiões (Lanen et al., 2013). O ano de 2012 também marcou os Estados Unidos, período onde aconteceu um grande período de seca, causando impactos na produção de milho, pois nessa época o país se destacava por exportações desses grãos ao redor do mundo (Boyer et al., 2013).

No Brasil, a seca ocorre em todo território nacional, sendo a região nordeste a mais afetada, com eventos mais frequentes e intensos registrados desde o ano de 1552 (Passador e Passador, 2010). As mudanças climáticas afetam diretamente esses períodos de estiagem, devido a diminuição na evapotranspiração e consequentemente reduzindo a chuva (Tavares et al., 2019).

É possível identificar que a seca é um problema recorrente em todo o planeta, por ser complexa, têm-se dificuldades para encontrar uma definição e realizar seu controle, visto que não ocorre em períodos ou regiões exatas e tendo duração variada. Sua severidade vem comprometendo a produção de culturas vegetais ao redor de todo o mundo, causando perdas no rendimento e na economia. Isso ocorre devido aos eventos de seca reduzirem drasticamente a disponibilidade hídrica nos solos, resultando no fenômeno conhecido como déficit hídrico, caracterizado pelo fornecimento de água abaixo das necessidades das plantas. Nesse contexto, o déficit hídrico representa o principal estresse abiótico que afeta o desenvolvimento e rendimento agrícola.

Déficit hídrico

O estresse é caracterizado como uma condição fisiológica alterada por fatores que tendem a causar desequilíbrio, assim, o desvio de um determinado fator a partir do seu ótimo poderá resultar em estresse (Shao et al., 2009). Estresses desencadeiam uma gama de respostas nas plantas, que vão desde alterações na expressão de genes e metabolismo celular, até mudanças de crescimento e produção vegetal. As reações das plantas existem para amenizar os efeitos nocivos causados por substâncias de fatores bióticos e estresses abióticos, dentre eles se destacam a salinidade, luz, altas temperaturas e déficit hídrico (Shao et al., 2009).

O déficit hídrico é definido como a condição causada pela escassez ou ausência de água, ocorrendo na maioria dos habitats naturais ou agrícolas, sendo causado principalmente por períodos intermitentes ou contínuos sem precipitação, assim a disponibilidade de água para as plantas é restrita, o que pode interferir em todos seus processos celulares, causando menor crescimento e podendo resultar até em sua morte (Zargar et al., 2017; Taiz e Zeiger, 2017).

O déficit hídrico é o fator que mais limita a produção das culturas ao redor do mundo, embora haja o reabastecimento de água pelas chuvas, a agricultura é uma grande consumidora, de forma que todos os anos são gastos bilhões de dólares em irrigação e programas para melhorar a tolerância à sua falta (Begg e Turner, 1976; Basu et al., 2016). Em regiões áridas e semiáridas o déficit hídrico é ainda mais severo, comprometendo o rendimento das colheitas (Fathi e Tari, 2016).

Como a maioria dos organismos presentes na terra, a água constitui a maior proporção do volume celular das plantas, sendo cerca de 97% perdida para a atmosfera por meio de transpiração (Taiz e Zeiger, 2017). Dessa forma, o déficit hídrico se caracteriza como uma grande limitação para a agricultura mundial, pois como as plantas perdem grande quantidade de água para a atmosfera, restando apenas 3% destinados a realização dos seus processos fisiológicos, a limitação na absorção de água se torna muito prejudicial, impactando no seu desenvolvimento, diminuindo consideravelmente ou extinguindo a produção.

Mecanismos de defesa ao déficit hídrico

As plantas como organismos sésseis, estão propícias a passar por danos causados pelo déficit hídrico, que ocorre com frequência em todo o mundo. Para suportar os problemas causados pela falta de água, as plantas ativam mecanismos de defesa e vias de sinalização. As respostas de tolerância variam de acordo com a duração e intensidade do estresse (Harb et al., 2010).

A principal consequência do déficit hídrico é a limitação de água e desidratação celular, ocasionando a perda de turgescência. Como alternativa, as plantas utilizam ajuste osmótico (Blum, 2015). As plantas acumulam uma série de substâncias orgânicas e inorgânicas como açúcares, aminoácidos, alcaloides e íons inorgânicos para reduzir o potencial osmótico e melhorar a retenção de água nas células, sustentando a estrutura celular e a fotossíntese e impedindo a senescência foliar (Fang e Xiong, 2015)

Outra resposta inicial das plantas ao déficit hídrico é o fechamento estomático. Os estômatos são responsáveis por duas funções principais: regulação da transpiração e controle de CO₂ dentro da folha, de forma que condutâncias menores reduzem a perda de água por transpiração, porém também afetam diretamente a fotossíntese, já que menos carbono está sendo absorvido pela planta (Martin-Stpaul et al., 2017).

O fechamento estomático ocorre quando as duas células-guarda que circundam a fenda, perdem a turgescência e fecham a abertura (Pirasteh-Anosheh et al., 2016). Existem muitos sinais que induzem o fechamento dos estômatos, dentre eles, o mais conhecido é a via

de sinalização do ácido abscísico (ABA) (Pirasteh-Anosheh et al., 2016). A sinalização de ABA é essencial para manter a condutância dos estômatos tanto em condições normais, quanto de estresse (Hsu et al., 2021).

Maiores resistências estomáticas reduzem a transpiração, causando aumento de temperatura foliar e altas temperaturas podem resultar em desnaturação de proteínas, especialmente enzimas. Além disso, alterações na flexibilidade da membrana é outro efeito de temperaturas elevadas, que podem influenciar diferentes aspectos do metabolismo, causando futuras perturbações em funções celulares, como fotossíntese e síntese de macromoléculas importantes, como aminoácidos e proteínas (Salehi-lisar e Bakhshayeshan-Agdam, 2016).

A fotossíntese é vista como o processo mais importante para o sustento da vida na terra, sendo a única maneira de capturar energia luminosa e transformar em energia química (Zargar et al., 2017). A inibição da fotossíntese é um dos principais e mais recorrentes efeitos do déficit hídrico em plantas superiores, devido a vários fatores contribuírem para essa redução, como alterações na expansão foliar, temperatura altas, fatores estomáticos e maquinário fotossintético prejudicado (Salehi-lisar e Bakhshayeshan-Agdam, 2016).

A taxa fotossintética diminui juntamente com o conteúdo relativo de água e potencial hídrico, a limitação estomática é geralmente uma das maiores causas de redução fotossintética, pois levam ao acúmulo de elétrons reduzidos, podendo diminuir o oxigênio molecular e dar origem as espécies reativas de oxigênio (EROS), causando danos oxidativos nos tecidos celulares (Zargar et al., 2017; Reddy et al., 2004). Além disso, devido à baixa absorção de CO₂, enzimas relacionadas na sua redução (fase escura) são prejudicadas, assim, menor atividade das reações escuras podem levar a desequilíbrios nas fases química e fotoquímica da fotossíntese, causando acúmulo de EROS nos cloroplastos e gerando danos aos fotossistemas (Zargar et al., 2017). As EROS (O₂^{·-}, OH[·], H₂O₂ e ¹O₂), em circunstâncias normais vivem em equilíbrio, porém quando, há a quebra desse equilíbrio em condições de estresse, ocorre sua superprodução resultando em peroxidação lipídica, perturbação de enzimas e proteínas das membranas, fazendo com que haja o aumento da permeabilidade dessa membrana causando o extravasamento de íons, destruição de clorofilas e morte celular (Fang e Xiong, 2015).

Para lidar com o estresse oxidativo as plantas ativam mecanismos antioxidantes, enzimáticos e não enzimáticos, a seguir descritos por Shao et al., (2009).

Não enzimáticos:

α -tocoferol

O α -tocoferol é um antioxidante lipossolúvel, encontrado na parte verde das plantas e é responsável por interagir com um grupo de lipídios, estabilizando membranas e eliminando EROS. O estresse oxidativo é um grande responsável por ativar a síntese os tocoferóis em plantas.

Ácido ascórbico (AA)

O ácido ascórbico (AA) é um importante antioxidante não enzimático que reage contra as EROS e pode regenerar o α -tocoferol a partir de radicais tocoferoxil, fornecendo assim proteção para as membranas.

Glutathione

A glutathione está presente em praticamente todos os compartimentos celulares como citosol, mitocôndrias, cloroplastos, retículo endoplasmático e vacúolos. A glutathione é a principal fonte de tióis não proteicos, juntamente com a relativa estabilidade e o alto teor de água a tornam uma grande ferramenta para proteger as plantas contra o estresse oxidativo.

Enzimáticos:

Superóxido dismutase (SOD)

Uma das enzimas que desempenham papel fundamental de defesa celular contra as EROS. A geração de SOD é ativada em condições de déficit hídrico, atuando na defesa de danos mais severos.

Peroxidase

A peroxidase desempenha um papel na diminuição de H_2O_2 acumulado, ajudando a reduzir a peroxidação lipídica e aumentar a integridade da membrana. A peroxidase é ativada por meio de estresses, como o déficit hídrico, com o aumento de temperatura ou frio.

Ascorbate peroxidase

Atuam como isoenzimas atuando num papel importante no metabolismo de H_2O_2 . Essas isoenzimas de ascorbate peroxidase são responsáveis por prevenir o estresse oxidativo em organismos fotossintetizantes.

Catalase

A catalase destrói o peróxido de hidrogênio, por meio da desintoxicação. Sua ativação é feita pelo déficit hídrico.

Alterações morfológicas

Como já foi visto, as plantas ativam diferentes tipos de mecanismos em seu sistema fisiológico e bioquímico para lidar com os efeitos do déficit hídrico. Porém, parte dessas alterações podem resultar em menor crescimento das suas folhas e raízes.

Em condições de restrição hídrica, as plantas podem aumentar seu sistema radicular para buscar água em profundidades maiores do solo, no entanto, o contrário também pode ocorrer, havendo a diminuição do tamanho, massa e volume das raízes (Fang e Xiong, 2015). Isso pode ocorrer por limitações na produção de assimilados, assim, menos reservas serão transportadas para as raízes, que resultará em menor crescimento desses órgãos.

Outra estratégia para diminuir os efeitos do déficit hídrico, é a redução do tamanho e número de folhas, possuindo menor área de transpiração e passando a exigir menos água (Fathi e Tari, 2016). As folhas tendem a cair ou enrolar devido a perda da pressão de turgor, sendo esse fenômeno chamado de murchamento (Fang e Xiong, 2015). A expansão e crescimento dessas folhas dependem diretamente da divisão e expansão celular e o déficit hídrico e o estresse osmótico são responsáveis por afetarem a área foliar reduzindo o número e o tamanho das células (Skirycz e Inzé, 2010).

Respostas ao déficit hídrico no rabanete

O déficit hídrico afeta as plantas de rabanete reduzindo seu crescimento geral (Henschel et al., 2022), podem ser realocados menos assimilados para raízes que para suas folhas, fazendo com que esses órgãos de armazenamento sejam menores (Stagnari et al., 2017). Pode haver também redução na expansão do aparelho fotossintético e aumento na espessura foliar e índices de clorofilas (Stagnari et al., 2017; Akram et al., 2015). Akram et al., (2015) avaliando plantas de rabanete submetidas a lâmina de irrigação bem irrigada e 60% da capacidade de campo viu que a restrição de água aumentou o acúmulo de açúcares solúveis totais e a atividade de enzimas como superóxido dismutase e peroxidase.

Metil Jasmonato

Mais um mecanismo de defesa das plantas contra o déficit hídrico é a regulação do crescimento por hormônios. Os hormônios vegetais regulam todos os aspectos das plantas, metabolismo, desenvolvimento e respostas a estresses bióticos e abióticos, sendo essenciais para a manutenção da vida das plantas, podendo agir alterando a expressão genética (Peleg e Blumwald, 2011).

Os fitormônios mais conhecidos que regulam o crescimento das plantas são: ácido abscísico, etileno, citocinina, auxina, giberelina, ácido salicílico, óxido nítrico e o jasmonato (Peleg e Blumwald, 2011).

O metil jasmonato (MJ) é um importante regulador do crescimento vegetal, envolvido em vários processos, como germinação de sementes, alongamento de raízes, amadurecimento de frutos e senescência (Cheong e Choi, 2003). MJ também funciona como sinalizador molecular, responsável por regular vários processos fisiológicos, bioquímicos e do sistema antioxidante, afetando a tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos, sendo seus principais locais de biossíntese de MJ as organelas celulares como cloroplastos e peroxissomos (Yu et al., 2018; Cheong e Choi, 2003).

O MJ atua na resistência a seca aumentando os carboidratos totais, açúcares solúveis totais, polissacarídeos, aminoácidos livres, prolina, proteínas e atividades das enzimas como CAT, POD e SOD, além disso também é capaz de aumentar o acúmulo das clorofilas, taxa fotossintética e teor relativo de água (Yu et al., 2018).

A aplicação de 0,5 mM MJ tem se mostrado eficaz contra o déficit hídrico em plantas de trigo, aumentando altura, número de folhas, quantidade de grãos por espiga e comprimento do pendão (Anjum et al., 2016). Sementes de milho embebidas com 50 μ M de MJ e submetidas a déficit hídrico também apresentaram resultados eficientes, onde MJ induziu o aumento de compostos orgânicos como prolina, açúcares solúveis totais e aminoácidos livres, também houve o aumento da atividade de enzimas como peroxidase, superóxido dismutase e catalase (Abdelgawad et al., 2014). Miranshahi e Sayyari (2016), relataram que o MJ teve efeito significativo em parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos em plantas de segurelha em restrição hídrica, melhorando o crescimento, teor relativo de água, prolina, antioxidantes e porcentagem de óleo essencial.

Nas plantas de rabanete submetidas ao estresse salino e aplicação de MJ, o MJ foi capaz de aumentar o acúmulo de antocianinas, demonstrando que seu uso é capaz de agir e regular o sistema antioxidante (Sakamoto e Suzuki, 2019). Já no rabanete tratado por três dias com a solução de 1,0 mM de MJ, foi possível observar aumento nas raízes, o que se deu principalmente pela regulação de genes que aumentam o crescimento (Chen et al., 2019).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na área experimental do Laboratório de Produção de Muda, do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias/Universidade Federal da Paraíba (CCHSA/UFPB), em Bananeiras, Paraíba, Brasil (6°45'S; 35°38'O), sob temperatura média de 24,1°C (20,3°C–28°C), e umidade relativa de 92% (AES 2021). Foram utilizados vasos de 5 L contendo substrato comercial (Mecplant®, Telêmaco Borba, Brasil), com peso e umidade padronizados, utilizando como adubação de cobertura N-P-K (10-10-10) ($\approx$ 5 g por vaso). Em seguida, os vasos foram irrigados até atingir 100% da capacidade de campo e as sementes de rabanete (*Raphanus sativus* L.) da variedade Crimson Gigante (Feltrin®, Farroupilha, Brasil) foram semeadas, sendo oito sementes por vaso. A capacidade de campo foi mantida em todos os vasos até os sete dias após a semeadura (DAS), quando foi realizado o desbaste mantendo-se apenas duas plantas por vaso.

As plantas foram submetidas aos tratamentos com 80% da capacidade de campo (CC) ou com restrição hídrica total dos 15 aos 30 DAS. Além disso, as folhas foram pulverizadas com água (controle) ou MJ na concentração de 100 μ M, com a adição de 0,03% (v/v) de Tween-80®. A manutenção da umidade do solo foi realizada a cada dois dias com a pesagem dos vasos, repondo-se a água até que o peso correspondente à lâmina de irrigação fosse atingido. Já a aplicação de MJ foi realizada a cada sete dias, com borrifadores manuais, pulverizando as folhas até seu ponto de encharcamento

Trocas gasosas

Aos 30 DAS foram analisadas as trocas gasosas usando um analisador de gás infravermelho de sistema de troca gasosa de fluxo aberto (IRGA, LCpro-SD Portable Photosynthesis System, ADC BioScientific, Hoddesdon, Reino Unido). As análises foram feitas em folhas totalmente expandidas entre as 8:00h e 11:00h da manhã. As condições na câmara foliar consistiram de uma concentração de referência de CO₂ ambiente e radiação fotossintética ativa artificial de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com 10% de luz azul. A taxa líquida de assimilação de carbono (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mmol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO₂ (C_i , $\text{mmol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{ar}$) e taxa de transpiração foliar (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram determinados.

Fluorescência da clorofila

A fluorescência da clorofila *a* foi determinada com um fluorômetro portátil (OS30p+, Opti-Sciences, Hudson, NY, EUA). As análises foram realizadas entre 8h e 11h da manhã. As folhas foram adaptadas ao escuro por 30 min e, em seguida, foram determinadas as medidas pontuais: fluorescência mínima da clorofila *a* no estado adaptado ao escuro (F_0), a fluorescência máxima da clorofila *a* no estado adaptado ao escuro (F_M), o rendimento quântico máximo de PSII (F_v/F_M) e a curva OJIP.

Pigmentos fotossintéticos

Os pigmentos fotossintéticos foram determinados de acordo com Wellburn (1994), com modificações. Foram coletados quatro discos (1 cm²) de folhas totalmente expandidas, em seguida, foram incubados por 48h no escuro com 7 mL de dimetilsulfóxido. O extrato foi lido em 480, 649 e 665 nm usando um espectrofotômetro (GTA-96 UV-VIS, Global Trade Technology, São Paulo, Brasil). Foram determinados os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, razão clorofila *a/b*, índice de clorofilas e carotenoides totais.

Teor relativo de água

O teor relativo de água (TRA) foi determinado de acordo com Barrs e Weatherley (1962), com modificações. Para isso, 15 discos foliares com 1,0 cm de diâmetro cada, foram coletados de folhas completamente expandidas de 5 plantas por tratamento. Para obtenção da

massa fresca (MF) os discos foram pesados em balança de precisão imediatamente após a coleta. Após a pesagem os discos foram submersos em água destilada por seis horas e após esse período foram pesados para a obtenção da massa túrgida (MT). Posteriormente, foram secos a 65 °C por 24 horas para obtenção da massa seca (MS). O TRA foi expresso em porcentagem (%) e calculado como $[(MF-MS)/(MT-MS)] \times 100$.

Extravasamento de eletrólitos

O extravasamento de eletrólitos foi quantificado de acordo com Bajji et al. (2002). Sendo coletados 10 discos foliares (área de 1 cm²), que posteriormente foram acondicionados em tubos contendo 40 mL de água destilada, onde foram mantidos por 4 horas a 25°C sob agitação ocasional. Após esse período foi determinada a condutividade elétrica inicial (CE1) do extrato com um condutivímetro portátil (CD-880, Instrutherm). Em seguida, os tubos foram mantidos a 90°C por 2 horas e após esse período foi determinada a condutividade elétrica final (CE2). O extravasamento de eletrólitos foi expresso em porcentagem e calculado como $EE (\%) = (CE1/CE2) \times 100$.

Parâmetros morfológicos

Os parâmetros de crescimento como o diâmetro, comprimento da raiz, número de folhas e área foliar, foram determinados utilizando o software ImageJ (Abràmoff et al. 2004). O volume da raiz foi obtido após sua imersão em uma proveta graduada, obtendo-se a diferença entre o volume final e o inicial. Para a determinação da massa fresca, as folhas e raízes foram pesadas separadamente em balança semi-analítica logo após a colheita. Em seguida, as folhas e as raízes foram levadas para uma estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingirem peso constante. A área foliar específica foi determinada pela razão entre a área foliar e a massa seca da folha. Além disso, com os dados de massa seca, foram calculados a taxa assimilatória líquida (massa seca total/área foliar) e a razão entre parte aérea e raiz.

Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 2 (níveis de umidade no solo x metil jasmonato), com 10 repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Sisvar 5.6 (Ferreira, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados

O acúmulo de biomassa em plantas de rabanete foi afetado de forma isolada pela irrigação. Entretanto, essas variáveis não foram afetadas pela aplicação de MJ, nem pela interação entre irrigação e MJ (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de variância para avaliações morfofisiológicas em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.) aos 30 DAS sob duas condições hídricas e aplicação de MJ (100 µM) ou água (controle).

Variáveis	P-valor*			CV (%)
	MJ	Irrigação	MJ x Irrigação	
Volume raiz (mL)	0,42	0,003	0,9293	65,89
Diâmetro da raiz	0,44	0	0,2682	16,56
Comprimento raiz	0,89	0,013	0,8604	24,79
Área foliar	0,84	0,0002	0,5171	34,02
Área foliar específica	0,01	0,0003	0,8357	17,86
Massa fresca folha (g)	0,372	0,0002	0,3432	40,59
Massa fresca raiz (g)	0,5842	0,0004	0,9013	55,71
Massa seca folha (g)	0,1546	0,0254	0,4098	37,81
Massa seca raiz (g)	0,9801	0,0052	0,7138	42,87
Razão parte aérea/raiz	0,1426	0,129	0,6541	31,48
Extrav. de eletrólitos (%)	0,0149	0	0,8425	18,4
Teor relativo de água (%)	0,8428	0	0,2479	7,28
<i>Ci</i>	0,8945	0,0961	0,9547	11,43
<i>E</i>	0,8247	0	0,9772	29,42
<i>Gs</i>	0,6496	0,0002	0,974	56,11
<i>A</i>	0,4443	0,0001	0,8963	38,78
EUA	0,5871	0,4535	0,8582	41,89
EiUA	0,7926	0,006	0,921	47,67
EIC	0,5551	0,0002	0,9043	37,92
F_v/F_m	0,7993	0,9106	0,4101	7,66
Clorofila <i>a</i>	0,056	0,0135	0,2956	45,23
Clorofila <i>b</i>	0,0528	0,0099	0,4253	33,31
Carotenoides	0,0917	0,0198	0,1924	44,91
Clorofilas totais	0,0547	0,0125	0,318	42,02
Razão clorofila <i>a/b</i>	0,1035	0,0247	0,4982	10,44

*P-valor menor que $\leq 0,05$ indica diferença significativa para o fator.

O déficit hídrico reduziu o crescimento geral das plantas de rabanete (Fig. 1a). Plantas sob restrição hídrica apresentaram menores massas secas e frescas tanto para raiz, como para as folhas (Fig. 1b-e). No entanto, o MJ não apresentou efeito nem interação significativa no acúmulo de biomassa.

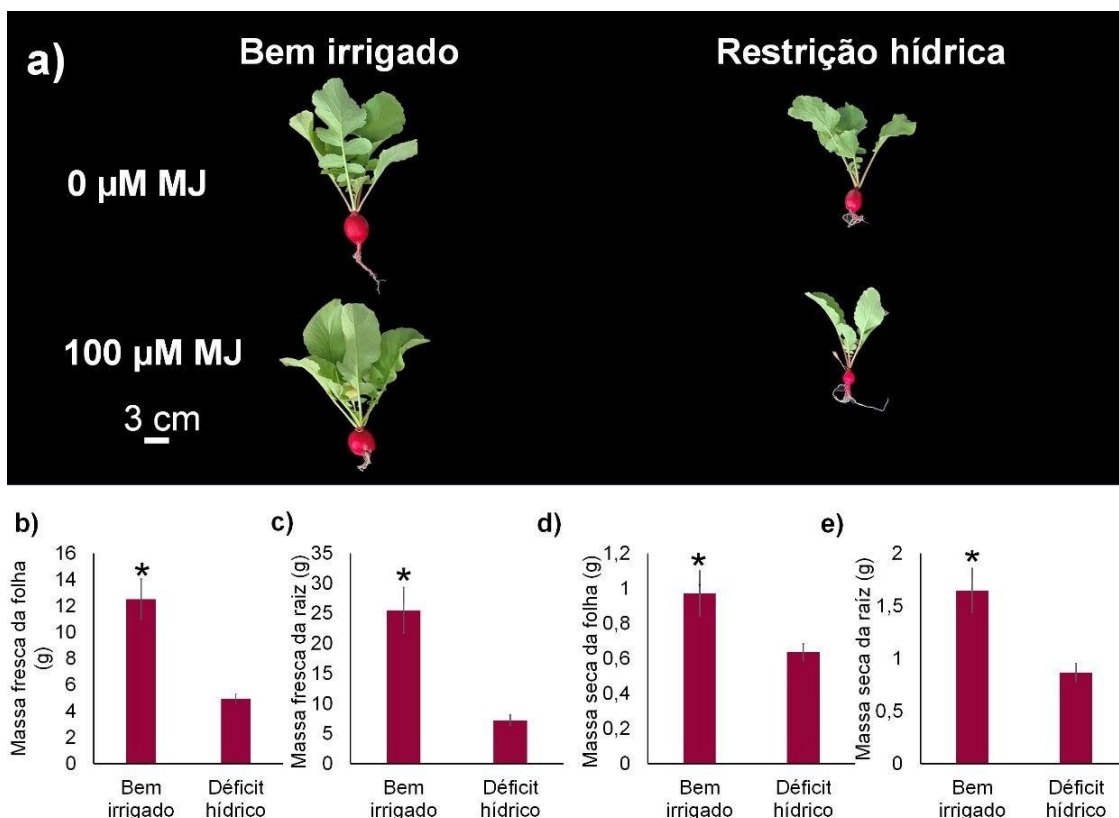


Figura 1. Acúmulo de biomassa em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.) aos 30 DAS sob duas condições hídricas e aplicação de MJ (100 µM) ou água (controle). a) Imagem das plantas ao final do cultivo; b) Massa fresca da folha (g); c) Massa fresca da raiz (g); d) Massa seca da folha (g); e) Massa seca da raiz (g). Barras representam a média de 10 plantas $\pm$ erro padrão. Asteriscos indicam diferenças pelo teste F ($P \leq 0,05$)

O déficit hídrico também afetou o volume, comprimento e diâmetro da raiz, bem como a área foliar e área foliar específica das plantas (Tabela 1). O déficit hídrico reduziu tanto o crescimento da raiz e da parte aérea, como evidenciado pelo menor volume, comprimento e diâmetro da raiz, e menor área foliar e área foliar específica (Fig. 2a-e). O MJ, por sua vez, afetou apenas a área foliar específica, não havendo interação entre os fatores irrigação e MJ para o crescimento (Tabela 1). O tratamento com MJ reduziu a área foliar específica (Fig. 2f).

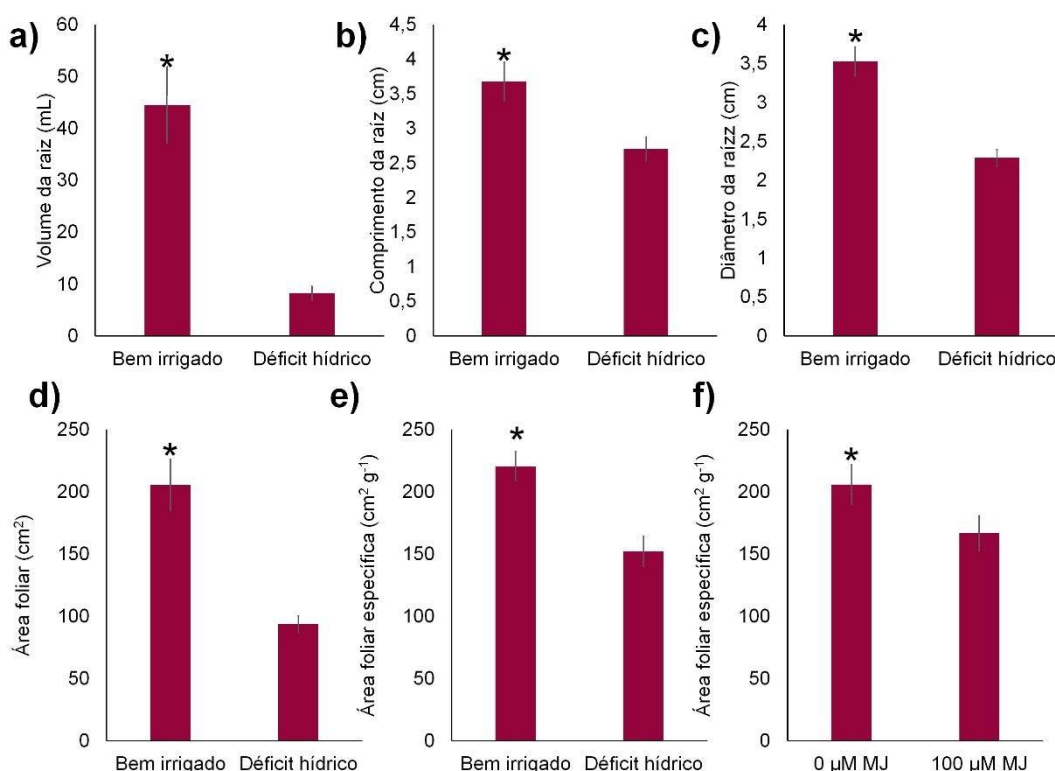


Figura 2. Parâmetros de crescimento em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.) aos 30 DAS sob duas condições hídricas e aplicação de MJ (100 μ M) ou água (controle). a) Volume da raiz (mL); b) Comprimento da raiz (cm); c) Diâmetro da raiz (cm); d) Área foliar (cm²); e) Área foliar específica (cm² g⁻¹) em resposta à irrigação; f) Área foliar específica (cm² g⁻¹) em resposta ao MJ. Barras representam a média de 10 plantas $\pm$ erro padrão. Asteriscos indicam diferenças pelo teste F ($P \leq 0,05$)

As trocas gasosas foram afetadas apenas pela irrigação, de forma isolada (Tabela 1). As plantas bem irrigadas apresentaram condutância estomática (gs), assimilação líquida de carbono (A), eficiência de carboxilação e transpiração (E) maiores que as plantas estressadas (Fig. 3a-c, e). Já para a eficiência intrínseca no uso de água (EiUA), as plantas estressadas apresentaram maior valor em relação as bem irrigadas (Fig. 3d). A eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m) não foi afetada significativamente pelas condições hídricas ou MJ. Não houve interação significativa entre os fatores de variação parâmetros de trocas gasosas e fluorescência.

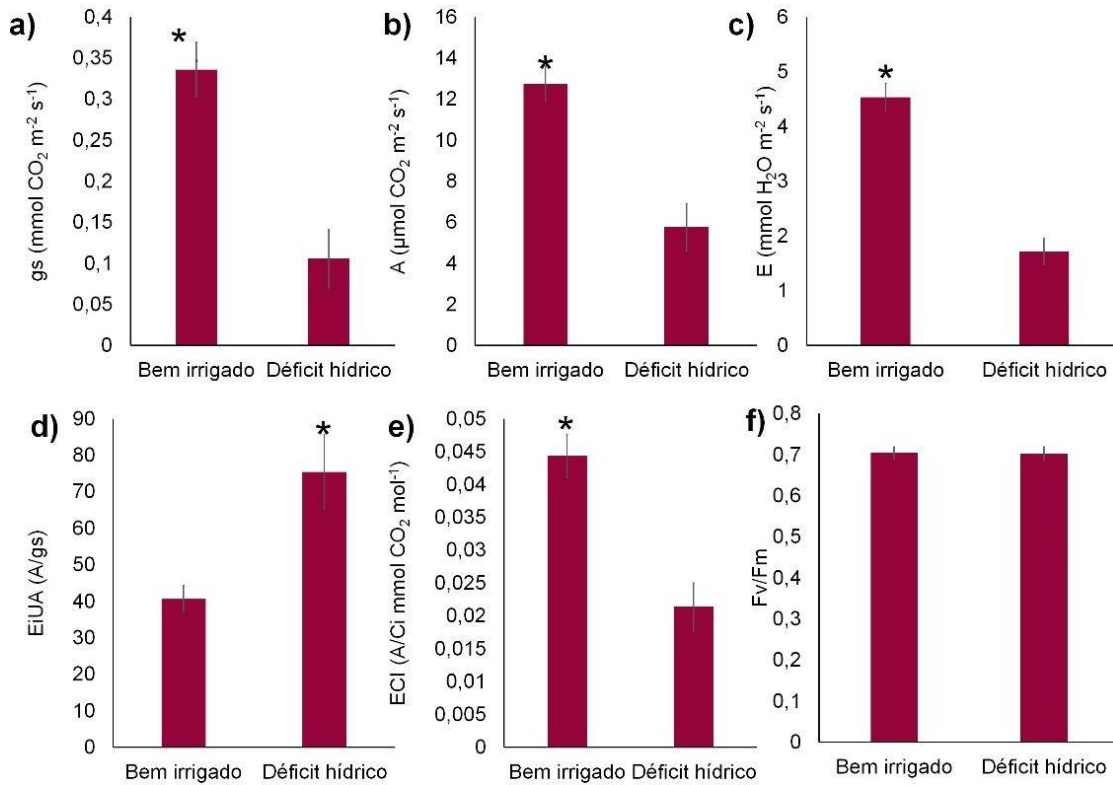


Figura 3. Parâmetros de trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.) aos 30 DAS sob duas condições hídricas e aplicação de Metil jasmonato (100 μM) ou água (controle). a) g_s : condutância estomática ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) b) A : Assimilação de carbono ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). c) E : Transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). d) $EiUA$: Eficiência intrínseca no uso de água. e) ECI : eficiência de carboxilação ($A/C_i \text{ mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$). f) F_v/F_m : Rendimento quântico do fotossistema II. Barras representam a média de 10 plantas $\pm$ erro padrão. Asteriscos indicam diferenças pelo teste F ($P \leq 0,05$)

O conteúdo de pigmentos fotossintéticos foi afetado pela irrigação de forma isolada, não sendo afetado pelo MJ nem pela interação entre os fatores (Tabela 1). O déficit hídrico aumentou o conteúdo de clorofilas totais, carotenoides e a razão clorofila a/b, comparado às plantas não estressadas (Fig. 4a-c).

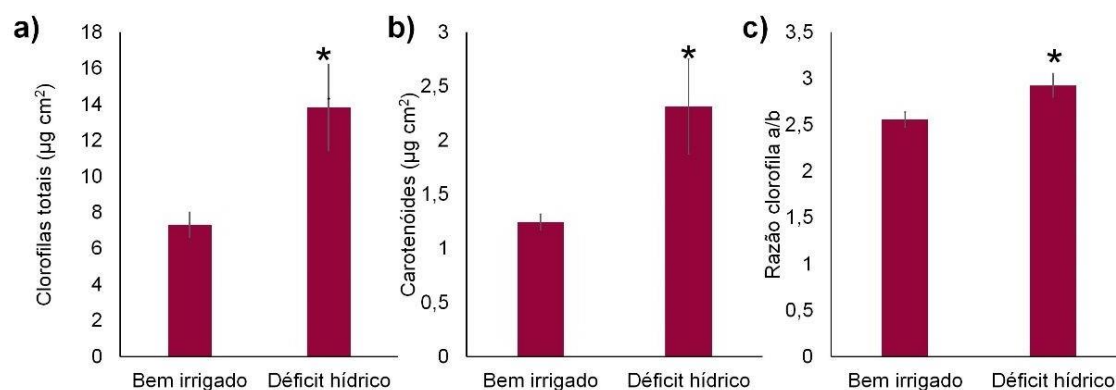


Figura 4. Conteúdo de clorofilas e carotenóides em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.) aos 30 DAS sob duas condições hídricas e aplicação de MJ (100 µM) ou água (controle). A) Clorofilas totais. B) Carotenóides. C) Razão clorofila a/b. Barras representam a média de 10 plantas ± erro padrão. Asteriscos indicam diferenças pelo teste F ($P \leq 0,05$)

Não houve interação significativa entre os fatores de variação. O déficit hídrico aumentou o extravasamento de eletrólitos comparado às plantas bem irrigadas, no entanto, o tratamento com MJ reduziu o extravasamento de eletrólitos (Fig. 5a e b). O teor relativo de água foi maior no tratamento bem irrigado comparado ao déficit hídrico (Fig. 5c).

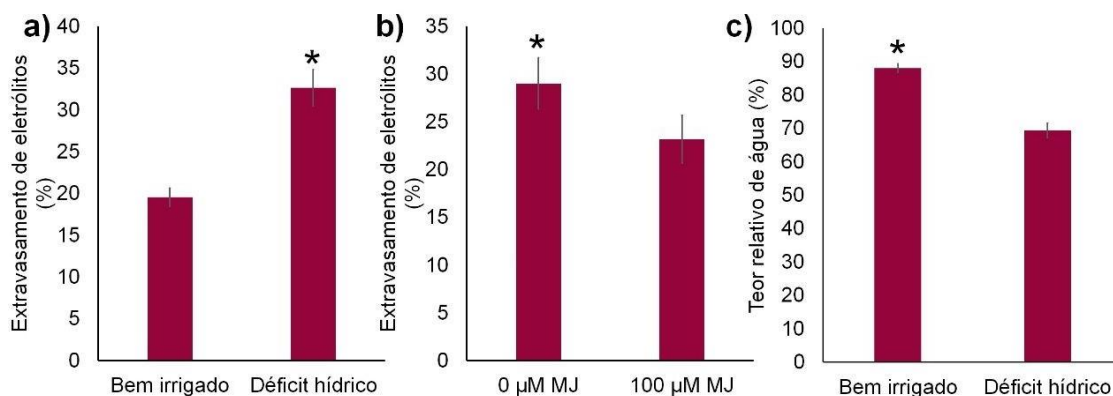


Figura 5. Extravasamento de eletrólitos e teor relativo de água em plantas de rabanete (*Raphanus sativus* L.) aos 30 DAS sob duas condições hídricas e aplicação de MJ (100 µM) ou água (controle). Barras representam a média de 10 plantas ± erro padrão. Asteriscos indicam diferenças pelo teste F ($P \leq 0,05$)

O extravasamento de eletrólitos foi afetado pelos fatores irrigação e MJ de forma isolada, de forma que não houve interação entre os dois, enquanto o teor relativo de água foi afetado apenas pela irrigação (Tabela 1).

Discussão

A água é um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento e produção das culturas, sendo essencial compreender as respostas das plantas à seca para aumentar a produção agrícola (Zargar et al., 2017). Nesse trabalho, o déficit hídrico prejudicou severamente as plantas de rabanete, reduzindo seu crescimento tanto da raiz como das folhas. Resultados semelhantes foram encontrados por Henschel et al. (2022), onde plantas estressadas pela indisponibilidade de água apresentaram menores massas para raíes e folhas. Essa redução no crescimento pode estar relacionada a diminuição da pressão de turgor celular causada pela interrupção dos gradientes de potencial hídrico, resultando em menor expansão celular (Mohamed e Latif, 2017; Zargar et al., 2017). Tal redução no turgor celular pode ser confirmada pelo menor teor relativo de água observado nas plantas estressadas.

A redução do volume, comprimento e diâmetro da raiz, bem como da área foliar e área foliar específica das plantas, reforçam o menor crescimento das plantas sob déficit hídrico. Esses resultados podem estar relacionados a capacidade reduzida de absorção de água das raízes em condições de seca, diminuindo as reservas de armazenamento das mesmas (Stagnari et al., 2017). O MJ, por sua vez, reduziu a área foliar específica, indicando que sua aplicação resultou em folhas mais espessas. Entretanto, o MJ não afetou os demais parâmetros de crescimento, sugerindo que sua aplicação exógena não atenuou o déficit hídrico em rabanete.

A fotossíntese é um dos principais processos afetados pelo déficit hídrico (Zargar et al., 2017). A taxa fotossintética indica diretamente a produtividade de uma planta (Yang et al., 2021). Menores taxas fotossintéticas podem ser resultado de limitações estomáticas ou não estomáticas (Yang et al., 2021). Os estômatos são responsáveis por controlar a transpiração e entrada de CO₂ na folha e regular a temperatura foliar (Stpaul et al., 2017). Nesse estudo, a assimilação de carbono, transpiração e eficiência de carboxilação, foram reduzidas pelo déficit hídrico. Esses parâmetros fotossintéticos podem ter sido afetados pela condutância estomática, que também sofreu limitações nas plantas estressadas. Já a eficiência intrínseca no uso de água foi maior no tratamento estressado, indicando que as plantas apresentaram certa plasticidade fotossintética, reduzindo a transpiração e mantendo a assimilação de carbono mesmo com reduções na condutância estomática (Rao e Chaitanya, 2016). Além disso, a concentração intercelular de CO₂ não foi afetada pelo déficit hídrico, sugerindo que a redução da condutância estomática não foi limitante para a difusão desse gás. A fotossíntese também pode ser reduzida por fatores não estomáticos, como fatores fotoquímicos e bioquímicos (Hu et al., 2010; Yang et al., 2021). Nesse estudo, o déficit hídrico não afetou o rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m), indicando que não houveram danos fotoquímicos sob essa

condição. Por outro lado, a menor eficiência de carboxilação sob déficit hídrico indica limitações bioquímicas no ciclo de Calvin-Benson, com menor eficiência da Rubisco (Aires et al., 2022). Isso sugere que o déficit hídrico limitou a fotossíntese do rabanete principalmente por reduzir a atividade da Rubisco. O MJ, por sua vez, não afetou as trocas gasosas das plantas.

O teor de clorofilas totais, carotenoides e razão clorofila *a/b*, foram maiores em plantas estressadas. Esse aumento na concentração dos pigmentos pode estar relacionado a mecanismos de defesa para proteger as membranas dos cloroplastos (Kim et al., 2013; Kalaji et al., 2018). No entanto, houve maior extravasamento de eletrólitos sob a condição de déficit hídrico, indicando redução da integridade das membranas celulares, como a dos cloroplastos. A aplicação exógena de MJ reduziu o extravasamento de eletrólitos de forma isolada, apontando que esse bioregulador aumentou a integridade de membranas independentemente do estresse.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O déficit hídrico reduziu as trocas gasosas e a integridade de membranas, o que resultou em menor crescimento das plantas de rabanete. O metil jasmonato (MJ), por sua vez, reduziu a área foliar específica e o extravasamento de eletrólitos, mas não afetou as demais variáveis, sugerindo que sua aplicação não atenuou o déficit hídrico em rabanete nas condições desse trabalho. No entanto, mais estudos são necessários para compreender melhor o papel do MJ no metabolismo de plantas de rabanete sob déficit hídrico.

REFERÊNCIAS

1. Abdelgawad, Z. A. Khalafaallah, A. A. Abdallah, M. M. (2014). Impacto do metil jasmonato na atividade antioxidante e alguns aspectos bioquímicos da planta de milho cultivada sob condição de estresse hídrico. *Ciências Agrícolas*, 5: 12 - 1077.
2. Abràmoff, M. D. Magalhães, P. J. Ram, S. J. (2004). Processamento de imagem com ImageJ. *Biophotonics international* , 11: 36-42.
3. Aires S. Ferraz K. Carvalho L. Teixeira P. Putti F. de Souza P. Rodrigues J. D. Ono E. O. (2022). Foliar application of salicylic acid to mitigate water stress in tomato. *Plants*.11:1764 - 1775.
4. Akram, N. A. Shafiq, S. Ashraf, M. Aisha, R. Sajid, M. A. (2016). Drought-induced anatomical changes in radish (*Raphanus sativus* L.) leaves supplied with trehalose through different modes. *Arid Land Research and Management*, 30: 412- 420.
5. Akram, N. A. Waseem, M. Ameen, R. & Ashraf, M. (2016). Trehalose pretreatment induces drought tolerance in radish (*Raphanus sativus* L.) plants: some key physio-biochemical traits. *Acta physiologiae plantarum*, 38, 1-10.
6. Anjum, S. A. Tanveer, M. Hussain, S. Tung, S. A. Samad, R. A. Wang, L. Shahzad, B. (2016). O metil jasmonato aplicado exogenamente melhora a tolerância à seca no trigo imposta nos estágios iniciais e tardios de desenvolvimento. *Acta Physiologiae Plantarum* , 38: 1-11.
7. Banihani, A. S.,]. (2017). Radish (*Raphanus sativus*) and diabetes. *Nutrients*, 9: 1014–1023.
8. Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress 5: 1–10.
9. Begg, J. E. e Turner, N. C. (1976). Déficits hídricos nas culturas. *Avanços na agronomia*, 28:, 161-217.
10. Blum, A. (2016). Stress, strain, signaling, and adaptation—not just a matter of definition. *Journal of experimental botany*, 67(3), 562-565.
11. Boyer, J. S. Byrne, P. Cassman, K. G. Cooper, M., Delmer, D., Greene, T., ... & Gaffney, J. (2013). The US drought of 2012 in perspective: a call to action. *Global Food Security*, 2(3), 139-143.
12. Chen, W., Wang, Y. Xu, L. Dong, J. Zhu, X. Ying, J. Liu, L. (2019). Methyl jasmonate, salicylic acid and abscisic acid enhance the accumulation of glucosinolates and sulforaphane in radish (*Raphanus sativus* L.) taproot. *Scientia Horticulturae*, 250, 159-167.
13. Cheong, J. J. Do Choi, Y. (2003). Methyl jasmonate as a vital substance in plants. *TRENDS in Genetics*, 19(7), 409-413.

14. Da Silva, D. F. Cipriano, P. E. de Souza, R. R. Júnior, M. S. da Silva, R. F. Faquin, V., Guilherme, L. R. G. (2020). Anatomical and physiological characteristics of *Raphanus sativus* L. submitted to different selenium sources and forms application. *Scientia Horticulturae*, 260: 108839.
15. Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in environmental science*, 2: 53.
16. Fang, Y. & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and molecular life sciences*, 72, 673-689.
17. Fathi, A. Tari, D. B. (2016). Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences*, 10: 1-6.
18. Ferreira, D. F. (2019). SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs: Sisvar. *Brazilian Journal of Biometrics*, 37: 529-535.
19. Gamba, M., Asllanaj, E., Raguindin, P. F., Glisic, M., Franco, O. H., Minder, B., ... & Muka, T. (2021). Nutritional and phytochemical characterization of radish (*Raphanus sativus*): A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 205-218.
20. Goyeneche R. Roura. S. Ponce A. Vega-Gálvez A, Quispe-Fuentes I, Uribe E, Scala K Di (2015) Chemical characterization and antioxidant capacity of red radish (*Raphanus sativus* L.). *J Funct Foods* 16: 256–264.
21. Gray, S. B. & Brady, S. M. (2016). Plant developmental responses to climate change. *Developmental biology*, 419: 64-77.
22. Harb A. Krishnan A. Ambavaram M. M. R. Pereira A. (2010) Molecular and physiological analysis of drought stress in arabidopsis reveals early responses leading to acclimation in plant growth. *Plant Physiol* 154: 1254–1271.
23. Henschel J. M. Brito F. A. Pimenta T. M. Picoli E. A. Zsögön A. Ribeiro D. M. (2021) Irradiance-regulated biomass allocation in *Raphanus sativus* plants depends on gibberellin biosynthesis. *Plant Physiol Biochem* 168: 43–52
24. Henschel, J. M. Dantas, E. F. O. Soares, A. V. Dos Santos, S. K., Dos Santos, L. W. O., Dias, T. J., & Batista, D. S. (2022). Salicylic acid mitigates the effects of mild drought stress on radish (*Raphanus sativus*) growth. *Functional Plant Biology*, 49: 822-831.
25. Hu, L., Wang, Z., & Huang, B. (2010). Diffusion limitations and metabolic factors associated with inhibition and recovery of photosynthesis from drought stress in a C3 perennial grass species. *Physiologia plantarum*, 139: 93-106.
26. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2017). Produção de rabanete: IBGE.

27. Kalaji H. M. Račková L, Paganová V. Swoczyna T. Rusinowski S. Sitko K. (2018) Can chlorophyll a fluorescence parameters be used as bio-indicators to distinguish between drought and salinity stress in *Tilia cordata* Mill? *Environ Exp Bot* 152:149–157.
28. Kaneko, Y., Kimizuka-Takagi, C., Bang, S. W., & Matsuzawa, Y. (2007). Radish. In *Vegetables* (pp. 141-160). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
29. Kim S. H. Kim. Y. H. Ahn Y. O. Ahn M. J. Jeong J. C. Lee H. S. Kwak SS (2013) Downregulation of the lycopene ϵ -cyclase gene increases carotenoid synthesis via the β -branch-specific pathway and enhances salt-stress tolerance in sweetpotato transgenic calli. *Physiol Plant* 147:432–442.
30. Lamaoui, M. Jemo, M. Datla, R. & Bekkaoui, F. (2018). Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in chemistry*, 6: 26.
31. Martin-StPaul, N., Delzon, S., & Cochard, H. (2017). Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology letters*, 20: 1437-1447.
32. Miranshahi, B. & Sayyari, M. (2016). Methyl jasmonate mitigates drought stress injuries and affects essential oil of summer savory 13:1635-1645.
33. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216.
34. Mohamed, H. I., & Latif, H. H. (2017). Improvement of drought tolerance of soybean plants by using methyl jasmonate. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23: 545-556.
35. Nishio, T. (2017). Economic and academic importance of radish. *The radish genome*, 21: 1-10.
36. Passador, C. S., & Passador, J. L. (2010). Apontamentos sobre as políticas públicas de combate à seca no Brasil: cisternas e cidadania? *Cadernos Gestão Pública e Cidadania*, 15(56).
37. Peleg, Z., & Blumwald, E. (2011). Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current opinion in plant biology*, 14(3), 290-295.
38. Rao, d., chaitanya, k. 2016. Photosynthesis and antioxidative defense mechanisms in deciphering drought stress tolerance of crop plants. *Biologia Plantarum* 60: 201-218.
39. Sakamoto, M., & Suzuki, T. (2019). Methyl jasmonate and salinity increase anthocyanin accumulation in radish sprouts. *Horticulturae*, 5(3), 62.
40. Shao, H. B., Chu, L. Y., Jaleel, C. A., Manivannan, P., Panneerselvam, R., & Shao, M. A. (2009). Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants—biotechnologically and sustainably improving agriculture and the environment in arid regions of the globe. *Critical reviews in biotechnology*, 29(2), 131-151.

41. Skirycz, A., & Inzé, D. (2010). More from less: plant growth under limited water. *Current opinion in biotechnology*, 21(2), 197-203.
42. Stagnari F, Galieni A, D'Egidio S, Pagnani G, Pisante M (2017) Responses of radish (*Raphanus sativus*) to drought stress. *Ann Appl Biol* 172: 170–186
43. Stagnari, F., Galieni, A., & Pisante, M. (2016). Drought stress effects on crop quality. *Water stress and crop plants: a sustainable approach 2*: 375-392.
44. Sugiura D, Betsuyaku E, Terashima I (2015) Manipulation of the hypocotyl sink activity by reciprocal grafting of two *Raphanus sativus* varieties: Its effects on morphological and physiological traits of source leaves and whole-plant growth. *Plant Cell Environ* 38: 2629–2640.
45. Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed Editora.
46. Van Lanen, H. A., Wanders, N., Tallaksen, L. M., & Van Loon, A. F. (2013). Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1715-1732.
47. Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions.
48. Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7: 50.
49. Yu, X., Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, X., Lang, D., & Zhang, X. (2018). Os papéis do metil jasmonato para o estresse nas plantas. *Functional Plant Biology*, 46: 197-212.
50. Zargar, S. M., Gupta, N., Nazir, M., Mahajan, R., Malik, F. A., Sofi, N. R., ... & Salgotra, R. K. (2017). Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant gene*, 11:154-159.
51. Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological research*, 242: 12662.