

Efeitos do omeprazol na tolerância ao déficit de água e de azoto na cultura de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Adriano Braga Bingobingo

Mestrado em Engenharia Agronómica

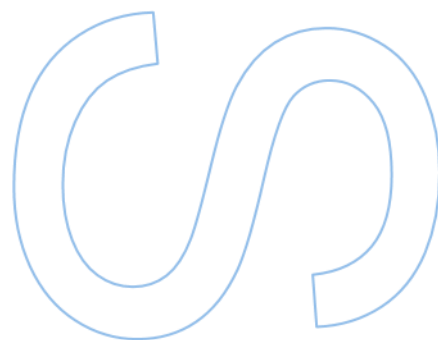
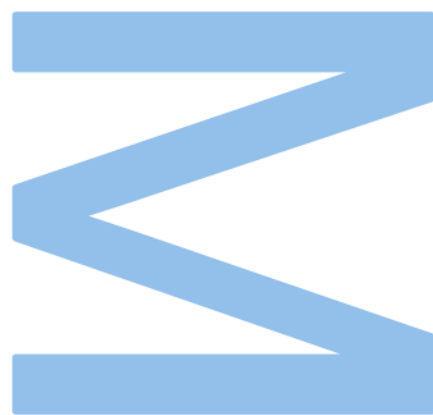
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2022

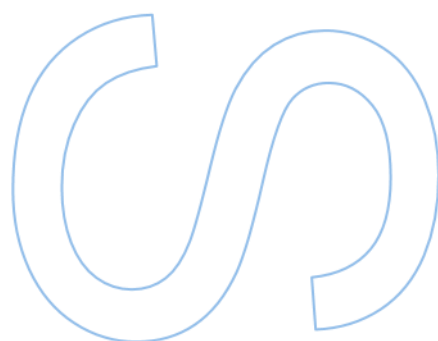
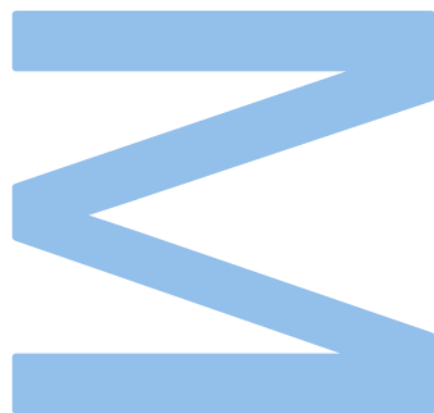
Orientadora

Profª. Doutora Susana Carvalho, Professora Auxiliar, Faculdade de
Ciências da Universidade do Porto

Supervisora

Joana Machado, Mestre, Faculdade de Ciências da Universidade
do Porto





Aos meus filhos, Agostinho Soma Bingobingo e Ernesto Emídio Bingobingo

Dedico

Declaração de Honra

Eu, Adriano Braga Bingobingo, inscrito no Mestrado em Engenharia Agronómica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto declaro, nos termos do disposto na alínea a) do artigo 14.º do Código Ético de Conduta Académica da U.Porto, que o conteúdo da presente dissertação reflete as perspetivas, o trabalho de investigação e as minhas interpretações no momento da sua entrega.

Ao entregar esta dissertação, declaro, ainda, que a mesma é resultado do meu próprio trabalho de investigação e contém contributos que não foram utilizados previamente noutros trabalhos apresentados a esta ou outra instituição.

Mais declaro que todas as referências a outros autores respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, encontrando-se devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências bibliográficas. Não são divulgados na presente dissertação quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor.

Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

Adriano Braga Bingobingo

Huambo, 28 de outubro de 2022

Agradecimentos

A Deus todo-poderoso agradeço pela atribuição da vida, inteligência e sabedoria necessária para a concretização dessa dissertação.

A minha Orientadora e Professora, Doutora Susana Carvalho, agradeço pela aceitação de conduzir este trabalho e pela paciência e apoio milimétrico dado para o sucesso dessa etapa da minha vida.

A Joana Machado, minha Supervisora, e a Ana Patrícia Fernandes, agradeço pela atenção, paciência e apoio que me concederam durante todas as etapas dessa dissertação.

A Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, em particular aos meus colegas, funcionários não docentes e a todos os meus professores desse mestrado agradeço pela paciência e profissionalismo que tiveram para a transmissão do conhecimento necessário e que certamente contribuiu no sucesso dessa etapa académica.

Ao Instituto Nacional de Gestão de Bolsas de Estudo (INAGBE) agradeço pela atribuição da bolsa, no âmbito do Programa de Envio Anual de 300 Licenciados/Mestres Angolanos com Elevado Desempenho e Mérito Académico para as Melhores Universidades do Mundo

A Faculdade de Ciência Agrárias da Universidade José Eduardo dos Santos, por autorizar a minha saída para frequentar este curso de mestrado.

Por último, agradeço todos os meus familiares e amigos, em particular à minha esposa e aos meus pais pelos cuidados e apoios dados durante a minha estada em Portugal.

A todos que direta e indiretamente me apoiaram, o meu muito obrigado.

Resumo

A água e os fertilizantes azotados estão entre os principais fatores determinantes da produtividade das culturas. No entanto, o seu uso excessivo acarreta problemas ambientais, exigindo assim uma maior eficiência no uso dos mesmos, principalmente face às atuais alterações climáticas. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar o potencial do omeprazol (OMP), uma molécula inibidora da bomba de prótons em mamíferos, como estratégia agronómica ambientalmente sustentável, para aumentar a tolerância da cultura do tomate ao déficit combinado de água e azoto. Para tal, foram realizados dois ensaios, em que o primeiro serviu para otimizar a dose de aplicação de OMP e o segundo visou analisar o efeito do OMP no crescimento, desenvolvimento, produtividade e qualidade do fruto de plantas de tomate submetidas aos déficits individuais de água e azoto e ao déficit combinado dos mesmos. Assim, no Ensaio 1 o OMP foi aplicado em quatro concentrações (0, 1, 5 e 10 μM) em plantas controlo e plantas sujeitas a déficit combinado de água e azoto. No final da experiência (20 dias após o transplante), em condições de déficit, a concentração de 1 μM de OMP aumentou significativamente a altura da planta ($\pm 17\%$) e o peso seco do caule ($\pm 33\%$) comparativamente a plantas sem OMP (0 μM). Porém, concentrações mais elevadas de OMP (5 e 10 μM) levaram a uma redução de vários parâmetros de crescimento nomeadamente: altura da planta (± 23 e 29% , respetivamente), número de folhas (± 20 e 11% , respetivamente), área foliar (± 39 e 33% , respetivamente), massa seca vegetal ($\pm 38\%$ e 39% , respetivamente) e o índice SPAD (± 12 e 10% , respetivamente) quando comparados com a concentração de 1 μM . Esses resultados permitiram concluir que a aplicação de doses altas de OMP (10 μM) nas condições estudadas têm efeitos tóxicos e que, a aplicação de 1 μM tem efeitos positivos no crescimento sendo por isso selecionada para a realização do segundo ensaio. No Ensaio 2 as plantas controlo (100% água/100% azoto) e plantas sujeitas ao déficit de água (50% água/100% azoto), de azoto (100% água/50% azoto), e déficit combinado de água e azoto (50% água/50% azoto), receberam uma solução de 0 e 1 μM de OMP por via radicular à 400 mL. À data da floração verificou-se que o OMP aumentou significativamente a altura da planta ($\pm 14\%$) (em condições de déficit combinado) e, no final da experiência (90 a 109 dias após o transplante), o OMP aumentou o número de folhas ($\pm 18\%$), o índice SPAD ($\pm 10\%$), o peso seco total ($\pm 15\%$), o peso seco das folhas ($\pm 5\%$), a produtividade ($\pm 14\%$) e reduziu o pH do fruto ($\pm 11\%$) (em condições de déficit de azoto); e o peso seco das raízes ($\pm 37\%$) (em condições de déficit combinado). Paralelamente, 1 μM de OMP aumentou também a produtividade ($\pm 20\%$) e a eficiência do uso da água ($\pm 22\%$), em

condições controlo. Em condições de déficit de água não foram observados quaisquer aumentos. A acidez titulável e grau de maturação não foram influenciadas pela aplicação de OMP ou pelos déficits impostos. Esses resultados indicam que o OMP pode minimizar o efeito dos déficits aqui estudados na cultura de tomate, podendo abrir o caminho para a identificação de análogos mais económicos para uso em grande escala.

Palavras-chave: elicitadores, produtividade, uso eficiente da água, uso eficiente de azoto, sustentabilidade

Abstract

Water and nitrogen fertilizers are among the main determinants of crop productivity. However, their excessive use causes environmental problems, thus requiring greater efficiency in their use, especially in the face of current climate change. The present work was developed with the objective of analyzing the potential of omeprazole (OMP), a proton pump inhibitor molecule in mammals, as an environmentally sustainable agronomic strategy to increase tomato crop tolerance to combined water and nitrogen deficit. To this end, two trials were carried out, in which the first served to optimize the dose of OMP application and the second aimed to analyze the effect of OMP on growth, development, productivity and fruit quality of tomato plants subjected to individual water deficits and nitrogen and their combined deficit. Thus, in Trial 1 OMP was applied at four concentrations (0, 1, 5 and 10 μM) in control plants and plants subjected to combined water and nitrogen deficit. At the end of the experiment (20 days after transplanting), under deficit conditions, the concentration of 1 μM of OMP significantly increased plant height ($\pm 17\%$) and stem dry weight ($\pm 33\%$) compared to plants without OMP (0 μM). However, higher concentrations of OMP (5 and 10 μM) led to a reduction in several growth parameters, namely: plant height (± 23 and 29% , respectively), number of leaves (± 20 and 11% , respectively), leaf area (± 39 and 33% , respectively), plant dry mass ($\pm 38\%$ and 39% , respectively) and the SPAD index (± 12 and 10% , respectively) when purchased with a concentration of 1 μM . These results allowed us to conclude that the application of high doses of OMP (10 μM) under the conditions studied have toxic effects and that the application of 1 μM has positive effects on growth, being therefore selected for the second test. In Test 2, control plants (100% water/100% nitrogen) and plants subjected to water deficit (50% water/100% nitrogen), nitrogen (100% water/50% nitrogen), and combined water and nitrogen (50% water/50% nitrogen), received a solution of 0 and 1 μM of OMP by root route at 400 ml. At the time of flowering, it was found that OMP significantly increased plant height ($\pm 14\%$) (under combined deficit conditions) and, at the end of the experiment (90 to 109 days after transplanting), OMP increased the number of leaves ($\pm 18\%$), SPAD index ($\pm 10\%$), total dry weight ($\pm 15\%$), leaf dry weight ($\pm 5\%$), productivity ($\pm 14\%$) and reduced fruit pH ($\pm 11\%$) (under nitrogen deficit conditions); and root dry weight ($\pm 37\%$) (under combined deficit conditions). In parallel, 1 μM of OMP also increased productivity ($\pm 20\%$) and water use efficiency ($\pm 22\%$), under control conditions. Under water deficit conditions no increases were observed. Titratable acidity and degree of ripeness were not influenced by OMP application or imposed deficits. These results indicate that OMP can minimize the effect

of the deficits studied here on tomato crops, opening the way for the identification of more economical analogues for large-scale use.

Keywords: efficient use of nitrogen, efficient use of water, elicitors, productivity, sustainability

Índice

Lista de Tabelas	viii
Lista de Equações	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Abreviaturas e Acrónimos.....	xv
1. Introdução.....	1
2. Estado da arte	4
2.1. A utilização de água na agricultura	4
2.2. Aplicação de fertilizantes nos sistemas agrícolas	4
2.3. A cultura do tomate	5
2.3.1. Produção e produtividade de tomate no mundo	6
2.3.2. Importância socioeconómica da cultura de tomate	7
2.3.3. Exigências edafoclimáticas	7
2.3.4. Necessidades hídricas da cultura de tomate	9
2.3.5. Fertilização da cultura do tomate.....	9
2.4. Efeitos do déficit hídrico nas plantas	10
2.4.1. Efeitos na fisiologia da planta.....	10
2.4.2. Efeitos na morfologia da planta	11
2.4.3. Efeitos na produtividade e qualidade do fruto.....	11
2.5. Efeito do déficit de azoto nas plantas	12
2.6. Déficit combinado de água e azoto nas plantas	14
2.7. Estratégias sustentáveis para aumento da eficiência do uso do azoto e da água	15
3. Materiais e métodos	21
4. Resultados e discussão	32
5. Conclusões e estudos futuros.....	64
6. Referências Bibliográficas	66

Lista de Tabelas

Tabela 1. Síntese dos trabalhos realizados com aplicação do OMP em plantas sob condições de stresses abióticos.....	16
Tabela 2. Características químicas e físicas do solo utilizado no ensaio.....	26
Tabela 3. Temperaturas e humidade relativa registadas durante o ensaio no interior da estufa.....	29

Lista de Equações

Equação 1. Área foliar específica (cm^2/g)	23
Equação 2. Razão parte aérea/raiz (g/g peso seco)	23
Equação 3. Razão folhas/planta	24
Equação 4. Eficiência do uso da água (g/ml)	24
Equação 5. Consumo de água por área foliar (mL/cm^2)	24
Equação 6. Evapotranspiração cultural	28
Equação 7. Eficiência do uso da água em função da produtividade	30
Equação 8. Acidez titulável (% ácido cítrico)	31
Equação 9. Índice de maturação	31

Lista de Figuras

Figura 1. Produção de tomate por continente e top 10 dos maiores produtores mundiais. Fonte: FAO (14 de setembro de 2021).....	6
Figura 2. Aspeto geral do Ensaio 1, onde se podem observar os vasos cobertos com plástico para impedir a evaporação da água e disposição dos mesmos na câmara fitoclimática.....	23
Figura 3. Mapa de localização da estufa onde foi realizada o ensaio.....	25
Figura 4. Tabuleiro alveolado usado na sementeira do Ensaio 2, com alvéolos vazios entre plantas.....	27
Figura 5. Peso seco total (A), peso seco das folhas (A), caule (B) e raiz (C), em gramas, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μ M) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.	35
Figura 6. Altura da planta em centímetros, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μ M) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. ...	36
Figura 7. Comprimento da raiz em centímetros, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μ M) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.....	37
Figura 8. Número de folha por planta, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μ M) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de	

Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. 38

Figura 9. Área foliar em centímetros quadrado, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. 40

Figura 10. Razão parte aérea/raiz em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. 40

Figura 11. Área foliar específica, em centímetros quadrado por grama, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. 41

Figura 12. Índice SPAD, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. 42

Figura 13. Eficiência do uso da água, em gramas por mililitro, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e

100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente. 43

Figura 14. Consumo de água/área foliar, mililitros por centímetro quadrado, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente..... 44

Figura 15. Data de floração, frutificação e maturação em dias após transplantação, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 45

Figura 16. Peso seco total (A), Peso seco dos frutos (B), peso seco dos pedúnculos (C), peso seco das folhas (D), peso seco do caule (E) e peso seco da raiz (F), em gramas, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 50

Figura 17. Altura da planta (A), em centímetros, e Diâmetro do caule (B), em milímetros, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e

50%ETc), durante o estágio de floração, frutificação e maturação do fruto. Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 52

Figura 18. Número de folhas, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc), durante o estágio de floração, frutificação e maturação do fruto. Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 54

Figura 19. Índice SPAD, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc), durante o estágio de floração, frutificação e maturação do fruto. Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 56

Figura 20. Comprimento da raiz, em centímetros, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 57

Figura 21. Produtividade, em quilogramas por planta, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam,

respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 58

Figura 22. Eficiência do uso da água, em quilogramas por metro cúbico, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{\text{DxO}}^{\text{n.s}}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 59

Figura 23. pH do fruto, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{\text{DxO}}^{\text{n.s}}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 60

Figura 24. Sólidos solúveis total, em °Brix, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{\text{DxO}}^{\text{n.s}}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 61

Figura 25. Acidez titulável (A), em percentagem de ácido cítrico, e Grau de maturação (B), em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{\text{DxO}}^{\text{n.s}}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$ 63

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

CPLP	Comunidade dos Países de Língua Portuguesa
pH	Potencial de hidrogénio
OMP	Omeprazol
SST	Teor de sólidos solúveis totais

1. Introdução

A água e os fertilizantes são considerados como dois dos principais fatores determinantes da produtividade agrícola (Klem *et al.*, 2018). A falta desses recursos afeta negativamente a produtividade das culturas e a segurança alimentar (Machado *et al.*, 2022). Por outro lado, o seu uso excessivo pode ocasionar graves problemas sociais e ambientais, entre os quais a limitação no abastecimento de água de qualidade em meio urbano (Du *et al.*, 2017), a contaminação dos solos e da atmosfera, associados principalmente a aplicações excessivas de fertilizantes azotados sob condições de manejo inadequado da fertirrigação (Sharma *et al.*, 2017) e a oxidação dos nitratos que aumentam os níveis de óxidos nitrosos na atmosfera, o que contribui para as alterações climáticas (Fernandes *et al.*, 2022). Neste sentido, torna-se indispensável a adoção de medidas eficientes de gestão da água e dos fertilizantes para se garantir a produção de alimentos com o menor impacto ambiental possível, através de uma produção agrícola sustentável (Du *et al.*, 2017; Florke *et al.*, 2018). A necessidade de adoção dessas práticas sustentáveis é cada vez maior, face aos atuais cenários de alterações climáticas. Estas alterações têm causado mudanças nos sistemas de produção agrícolas e na economia, que afetam negativamente a vida e o bem-estar das famílias (Ren *et al.*, 2018), pois prejudicam a produção de alimentos básicos, de consumo diário, como o de tomate que é uma das culturas mais produzidas e consumidas no mundo (Heuvelink, 2018).

À semelhança de outras culturas, a produção e a disponibilização de tomate poderá ser comprometida no futuro, caso as práticas atuais de produção, como a ineficiência de uso da água e do azoto, não sejam alteradas. Mas, quaisquer estratégias que sejam consideradas para aumentar a eficiência do uso da água e do azoto, deverão ter em consideração o facto de esta cultura ser fortemente dependente da quantidade de água e de azoto que são disponibilizados (Cammarano *et al.*, 2020). Em condições de deficit hídrico e de azoto vários processos fisiológicos são comprometidos levando a decréscimos ao nível morfológico e consequentemente na produtividade da cultura (Hernandez-Espinoza *et al.*, 2020; Ochoa-Velasco *et al.*, 2016; Tembe *et al.*, 2017). Nesse sentido, vários trabalhos têm sido realizados com o objetivo de reduzir o uso de água e de fertilizantes na agricultura sem afetar ou até melhorar a produtividade (Chen *et al.*, 2013; de Oliveira Hott *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019b). Muito desses estudos estão relacionados com perceber o efeito isolado do stress hídrico (Morsy, 2019; Sarker *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021) e nutricional, dentre os quais o stress de azoto (Sun *et al.*,

2022; Vitale *et al.*, 2018), na produtividade e na qualidade do tomate. Devido à preocupação relativa aos impactos dos stresses bióticos e/ou abióticos na agricultura, com efeitos sobre a disponibilidade de alimentos, a utilização de elicitadores¹ tem sido usada para induzir resistências às plantas a determinados tipos de stresses (e.g. Mohammadi *et al.*, 2017; Salvi *et al.*, 2019). Os estudos com elicitadores na tolerância das plantas a stresses abióticos têm demonstrado resultados promissores. Entre os elicitadores mais estudados destacam-se o Trinexapac etílico (TE), ácido abscísico (ABA) e Paclobutrazol (PAC), e os extratos de algas, usualmente usados em plantas sob condições de stress hídrico e salino (e.g. Almaroai *et al.*, 2020; Bahmani Jafarlou *et al.*, 2021; El-Katony *et al.*, 2020; Mohammadi *et al.*, 2017). A aplicação de TE, PAC e ABA foram eficazes na mitigação de danos fisiológicos resultantes do stress hídrico no azevém, no estudo realizado por Mohammadi *et al.* (2017). Num outro estudo, a aplicação de extratos de alga (*Ascophyllum nodosum*) aumentou a defesa das plantas de soja contra a formação de espécies reativas de oxigênio, a tolerância das plantas ao déficit hídrico, a atividade fotossintética e a produtividade (Morais, 2020). Recentemente alguns estudos começaram a dar atenção ao omeprazol (OMP), uma molécula inibidora da bomba de protões em mamíferos, até à data nunca explorada em aplicações em plantas. A sua utilização em plantas parte do princípio de que o OMP, em humanos, interage com ATPases P-Type IIC e inibe ATPases H/K no lúmen intestinal, reduzindo a pacificação do intestino e, apesar das plantas parecem não ter ATPases tipo IIC que movem potássio ou sódio através da membrana, o OMP influencia os processos fisiológicos da planta (Shin *et al.*, 2009; Sweadner *et al.*, 2001), como o aumento da cutina nas folhas, uma macromolécula protetora contra a perda excessiva de água (Rouphael *et al.*, 2018). Até à data este elicitador foi testado como estratégia de aumento da tolerância ao stress salino, na alface, manjerição e tomate (Carillo *et al.*, 2019b; Cirillo *et al.*, 2019; Rouphael *et al.*, 2018), hídrico, na hortelã-pimenta (Elansary *et al.*, 2019) e de azoto, no milho (Van Oosten *et al.*, 2019). Entretanto, até a presente data não há estudos relacionados com o uso deste elicitador na cultura de tomate em condições de déficit hídrico ou de azoto, bem como nunca foram estudados os efeitos deste elicitador quando aplicado a plantas sujeitas a stresses combinados.

¹ Compostos endógenos ou exógenos que estimulam defesa (resistência ou tolerância) da planta contra stresses bióticos ou abióticos. Também pode estimular o próprio metabolismo das plantas para produzir compostos que resultarão em características agronómicas desejadas. Esses compostos ativam sinais de resposta que aumentam a produção de metabólitos secundários, levando a uma resposta de defesa na planta (Aranda *et al.*, 2021).

Assim, com o intuito de ajudar a encontrar estratégias sustentáveis para aumentar a eficiência do uso da água e de azoto no tomate, foi desenvolvido o presente trabalho, assente na análise do efeito do OMP como estratégia agronómica, e ambientalmente sustentável, com o objetivo de aumentar a tolerância desta cultura em condições de déficit individual de água ou de azoto, ou em cenários de deficit combinado destes fatores.

2. Estado da arte

2.1. A utilização de água na agricultura

A água é um dos fatores mais importantes na agricultura, sendo considerado o mais crítico para o desenvolvimento da agricultura sustentável em todos os países (Chartzoulakis *et al.*, 2014). O seu abastecimento afeta a produtividade das culturas e a qualidade dos frutos, exigindo assim uma maior gestão por parte dos agricultores, de forma a tornar mais eficiente a sua utilização (Du *et al.*, 2017). A produção agrícola atual exige uma maior eficiência na utilização da água devido ao facto deste ser um recurso limitado, com uma competitividade cada vez maior entre os diferentes setores de utilização como a agricultura, indústria e o meio urbano (Du *et al.*, 2017). Estudos apontam que as alterações climáticas alterarão o tempo e a distribuição da água e que, até 2050, as necessidades de água no meio urbano aumentará 80% (Florke *et al.*, 2018), competindo com a atividade agrícola que utiliza atualmente mais de 70% do total de água doce existente no planeta (Buttaro *et al.*, 2014). Assim, o aumento da eficiência do uso da água é de extrema importância para garantir a produção agrícola e preservar os ecossistemas (Buttaro *et al.*, 2014; Florke *et al.*, 2018). Segundo Chartzoulakis *et al.* (2014), o gestão sustentável da água e a proteção do meio ambiente requerem a adoção de práticas agrícolas eficientes, desde o manejo dos solos até à gestão da rega e fertilização.

2.2. Aplicação de fertilizantes nos sistemas agrícolas

Uma gestão adequada da fertilização é um dos grandes desafios a nível mundial no setor agrícola, pois a mesma depende maioritariamente de fontes químicas (Zulfiqar *et al.*, 2019). Os fertilizantes são produtos importantes para garantir uma elevada produtividade agrícola, sobretudo em sistemas de produção mais intensivos onde existe uma elevada densidade de plantação e competição por nutrientes no solo (Chen *et al.*, 2018; Semenov *et al.*, 2020). Apesar da sua elevada importância, os fertilizantes são umas das principais ameaças à biodiversidade, sendo recomendada a adoção de estratégias que visem diminuir a sua utilização, para salvaguardar o meio ambiente, sem que se diminua a produtividade das culturas (Boch *et al.*, 2021; Hasler *et al.*, 2015). O uso excessivo e empírico de fertilizantes causa eutrofização e toxicidade da água superficial ou subterrânea, poluição da atmosfera, degradação da fertilidade natural dos solos e mudanças nos ecossistemas (Chen *et al.*, 2018; Rahman *et al.*, 2018).

2.2.1. Adubação azotada

O azoto é o macronutriente mais exigido pelas culturas, e consequentemente o mais limitante da sua produção, sendo parte de diversos constituintes da plantas como da clorofila, aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e da parede celular (Djidonou *et al.*, 2019). Os adubos azotados, apesar das suas mais variadas funções na planta, quando manuseados erradamente causam graves impactos negativos ambientais, sobretudo em culturas que requerem maiores quantidades desse nutriente. Os fertilizantes azotados inorgânicos são de relativamente baixo custo, o que resulta na sua aplicação excessiva nas explorações agrícolas (Jalpa *et al.*, 2020). A utilização em excesso de fertilizantes azotados é comum em todo o mundo e, fruto disso, a eficiência do seu uso tem diminuído significativamente (Wang *et al.*, 2018b). O excesso de azoto no solo pode resultar na contaminação das fontes e cursos de água por lixiviação de nitratos (Du *et al.*, 2017), bem como, desequilibrar a relação azoto-cálcio, tornando a planta mais suscetível a doenças e a distúrbios fisiológicos na pós-colheita dos frutos (Tavallali *et al.*, 2018). O pH do solo também pode sofrer alteração em função da aplicação de fertilizantes. A aplicação de azoto na forma amoniacal e/ou ureica causa forte redução do pH do solo, tornando-o ácido, causando redução da biodiversidade microbiana e o número de géneros na rizosfera e diminuição da capacidade de troca catiónica do solo (Semenov *et al.*, 2020). Além disso, o azoto gasoso reativo (óxido nitroso), normalmente proveniente de altas taxas de aplicação de fertilizantes azotados, é apontado como um gás poderoso causador de efeito de estufa, que leva a efeitos de resfriamento local de curta duração e de aquecimento substancial de longa duração no sistema climático global (Xu *et al.*, 2020). Considerando a relevância de um manejo adequado da adubação azotada, melhorar a eficiência do seu uso na produção agrícola, diminuindo a poluição de azoto no meio ambiente e otimizando o rendimento e a qualidade das plantas, é fundamental para enfrentar os desafios de garantir a segurança alimentar, evitar a degradação ambiental e reduzir as mudanças climáticas.

2.3. A cultura do tomate

O tomate (*Solanum lycopersicon* L.) é uma espécie que pertence a família *Solanaceae* e género *Solanum* e o seu cultivo é universal, pois adapta-se em várias regiões do mundo, desde as de clima tropicais até às de clima temperado (Bahloul *et al.*, 2018; Knapp *et al.*, 2016). A sua origem e domesticação ocorreu do noroeste da América do Sul até à América Central, compreendendo as regiões de Peru e Equador (Mata-Nicolás *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2017). Em 1544 foi introduzido no continente Europeu, a partir do qual, anos mais tarde, se disseminou para Ásia e África (Dam *et al.*, 2006). Hoje é

uma das culturas mais importantes do mercado de alimentos e uma das mais consumidas a nível mundial (Martina *et al.*, 2021; Mata-Nicolás *et al.*, 2020).

2.3.1. Produção e produtividade de tomate no mundo

Como já foi mencionado, o tomate encontra-se entre as culturas mais produzidas a nível mundial. Dados de 2019 apontam que, anualmente, a nível mundial se produzem cerca de 180,7 milhões de toneladas de tomate (FAO, 2021). Em termos de produção, o continente asiático lidera a lista mundial com as estatísticas dos anos 2016, 2017, 2018 e 2019 apontando este continente como o responsável por 60% da produção mundial de tomate (Figura 1) (FAO, 2021). A China é líder mundial na produção, sendo que em 2019 produziu mais de 60 milhões de toneladas (Figura 1). No top 10 dos maiores produtores figuram, para além da China, a Índia, a Turquia, os EUA, o Egipto, a Itália, o Irão, a Espanha, o México e o Brasil (Figura 1) (FAO, 2021).

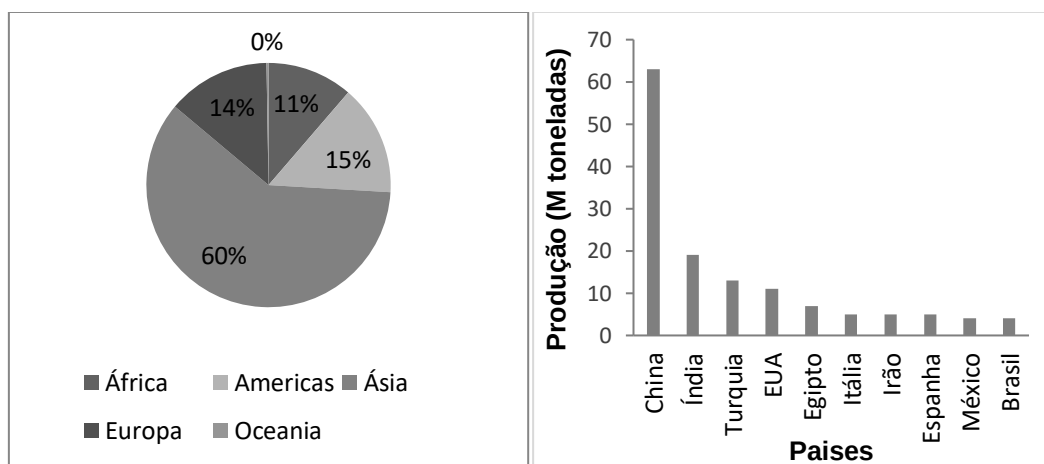


Figura 1. Produção de tomate por continente e top 10 dos maiores produtores mundiais. Fonte: FAO (14 de setembro de 2021)

A produtividade da cultura de tomate varia em função do sistema de produção (ar livre/ estufa, cultivo com solo/ sem solo, com cobertura/ sem cobertura do solo), da utilização do fruto (consumo fresco ou processado), da variedade, da época de cultivo, da gestão da fertirrega e do recurso a polinização com abelhões, entre outros aspetos (Gonçalves, 2014; Osorio-Gracia *et al.*, 2020; Pedro, 2015). A produtividade média mundial ronda as 36 t ha⁻¹, sendo a Holanda o país líder com uma produtividade superior a 505 t ha⁻¹ (FAO, 2021) já que a cultura é feita ao longo de todo o ano (11 meses) em estufas com recurso a elevado condicionamento ambiental. Entre os países da CPLP (Comunidade dos Países de Língua Portuguesa), Portugal e o Brasil apresentam a maior produtividade de tomate com cerca de 96 e 72 t ha⁻¹, respetivamente, e Angola, com cerca de 2 t ha⁻¹, apresenta a produtividade média mais baixa (FAO, 2021).

2.3.2. Importância socioeconómica da cultura de tomate

A cultura de tomate faz parte das hortícolas mais consumidas mundialmente quer pelos países produtores quer pelos países com menor produção. Por exemplo, Portugal tem uma balança comercial positiva, mas Angola apresentou em 2019 uma balança negativa no valor de 155 mil dólares (FAO, 2021). Esta movimentação monetária em torno da cultura do tomate, demonstra claramente a importância económica e social desta hortícola, que é rica em nutrientes essenciais para a saúde humana. O tomate pode ser utilizado na alimentação humana diária, consumido em fresco ou processado em polpa, sumo e diversos molhos (Valle-Castillo *et al.*, 2021).

O consumo de tomate contribui para a manutenção de uma dieta saudável e equilibrada (Dam *et al.*, 2006), por ser um rico em carotenoides, vitamina C, vitamina E, fenóis, fibras dietéticas e nutrientes como o potássio, magnésio e o cálcio (Dinu *et al.*, 2017). O tomate também é rico em antioxidantes, ajudando na diminuição dos riscos de cancro, diabetes, doenças cardiovasculares (Bahloul *et al.*, 2018), inflamação do cólon e síndrome da degeneração macular, que em pessoas com mais de 65 anos é a principal causa de cegueira (de Jesús *et al.*, 2018). A importância da planta de tomate não se esgota nos frutos, pois as folhas são utilizadas tradicionalmente para o tratamento de ferimentos, em algumas regiões de Angola (Cahimba, 2012).

2.3.3. Exigências edafoclimáticas

Solo

O tomate é uma cultura que se adapta a diferentes tipos de solos, apesar disso, desenvolve-se melhor em solos profundos e bem drenados, de textura franca ou franco-argilosa e com boa capacidade de retenção de água (Carvalho, 2017; Pereira, 2020; Silva, 2016). Solos compactos devem ser evitados devido a sensibilidade da cultura ao excesso de humidade, encharcamento e má aeração (Pereira, 2020).

Salinidade e pH

A salinidade do solo é um fator relevante na determinação da produtividade e da qualidade das culturas. A cultura do tomate é moderadamente sensível a este fator e, desenvolve-se, sem perdas significativas de rendimento, com condutividade elétrica de até 2,5 dS m⁻¹ e, por cada dS m⁻¹ acima desse valor há uma redução de 10% da produtividade (Eitel Canales, 2021; Silva, 2019). Apesar disso, estudos têm demonstrado que o aumento da salinidade reduz significativamente a produtividade ao mesmo tempo que aumenta a qualidade do fruto (Amalfitano *et al.*, 2017). O pH ideal

para o crescimento e produção da cultura do tomate situa-se na faixa entre 6 e 6,8 (Abhyankar *et al.*, 2019). Valores de pH fora do ideal causam redução no diâmetro do caule, altura da planta, comprimento da raiz, biomassa fresca e biomassa seca das plantas e consequentemente baixa produtividade da cultura (Khan *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020a).

Temperatura

As temperaturas ideais para o crescimento e desenvolvimento da cultura de tomate são variáveis de acordo com a fase em que a mesma se encontra. Para uma boa germinação da semente a temperatura do solo deve rondar entre os 18 e 30°C, ao passo que entre 17 e 20°C são ideais para o crescimento da planta e entre 18 e 25°C para a fase reprodutiva (Wemans, 2017). De forma geral, para o ótimo desenvolvimento da cultura do tomate as temperaturas devem variar entre 20 e 25°C, durante o dia, e entre 13 e 18°C, durante a noite (Perin *et al.*, 2018). Temperaturas acima de 30°C afetam negativamente o sistema radicular, o desenvolvimento e a frutificação da planta (Aguilar Pezo, 2021). Temperaturas baixas (> 10°C) também são prejudicial para a cultura do tomate (Chaves-Barrantes *et al.*, 2017), pois afetam negativamente a absorção da água e dos nutrientes, bem como o metabolismo da planta (Perin *et al.*, 2018) e, na fase reprodutiva comprometem a viabilidade do pólen e a fecundidade da flor, causando aborto da mesma (Wemans, 2017).

Humidade relativa

Durante todo o ciclo da cultura a humidade relativa ideal deve rondar entre 50 e 70%, e quando esta for de 60% a taxa de polinização é aumentada significativamente (Shamshiri *et al.*, 2018), contribuindo para o aumento da produção. Quando as temperaturas são altas, superiores a 35°, o aumento da humidade relativa até perto de 70% ajuda a minimizar os efeitos negativos do stress térmico no tomateiro (Lin *et al.*, 2017; Ting-ting *et al.*, 2019). Na produção em estufa a humidade relativa ideal varia entre 70 e 80% (Sousa, 2019). Se a humidade relativa estiver acima da ideal será instável para a cultura do tomate (Suzuki *et al.*, 2015) e se esta for superior a 90% aumentam-se os riscos de ocorrência de doenças fúngicas, sobretudo as *Botrytis* (Sousa, 2019).

Radiação

Assim como em outras culturas, no tomate a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) situa-se entre os 400 e 700nm (Kalaitzoglou *et al.*, 2019). A intensidade luminosa limite, ou seja, o valor mínimo da radiação solar global diária que permite produção mínima de hidratos de carbono para a planta crescer é de $122 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Perin *et al.*, 2018) e a ótima varia entre 500-800 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Lu *et al.*, 2017). Valores abaixo da intensidade luminosa limite, são foto-inibidores e podem aumentar a área foliar específica e a altura da planta (Urrestarazu *et al.*, 2016) e valores altos podem afetar severamente a produtividade, principalmente quando associados a altas temperaturas (Masabni *et al.*, 2016). O fotoperíodo não afeta a floração da cultura de tomate (Shibuya *et al.*, 2021), pois esta é considerada uma cultura indiferente ao fotoperíodo (García Chate, 2021).

2.3.4. Necessidades hídricas da cultura de tomate

Na cultura do tomate a produtividade, a duração do ciclo da cultura e a qualidade dos frutos são influenciadas pela disponibilidade de água (Chen *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2021). O conhecimento da quantidade ideal de água a aplicar é essencial para garantir uma boa produtividade e qualidade dos frutos e evitar problemas ambientais, dentre os quais a contaminação dos cursos e fontes de água por fertilizantes lixiviados no solo (Rasool *et al.*, 2020). Durante todo o ciclo da cultura (90 a 120 dias) são necessários 4000 a 6000 m^3ha^{-1} de água (Silva, 2019). O aumento da quantidade de água até 5011,22 m^3ha^{-1} ocasiona aumento da produtividade da cultura de tomate (Morsy, 2019). Porém, no contexto climático atual é espectável que haja maior produtividade com a aplicação de menores quantidades de água, de forma a aumentar a eficiência e a sustentabilidade desse recurso.

2.3.5. Fertilização da cultura do tomate

A produtividade da cultura de tomate é diretamente influenciada pela fertilização (Brunetti *et al.*, 2019). O tomate é uma cultura que responde satisfatoriamente a fertilização inorgânica e orgânica, mas resultados apontam que os fertilizantes inorgânicos são mais eficientes no aumento da produtividade da cultura, enquanto os orgânicos na qualidade dos frutos (Bilalis *et al.*, 2018). Porém, as quantidades exatas de fertilizantes a aplicar na cultura de tomate, para elevar a produtividade, a qualidade e a eficiência do uso do fertilizante ainda não estão clarificadas (Wang *et al.*, 2017). Bons resultados na produção de tomate foram conseguidos com a utilização de 240, 120 e 150 kg ha^{-1} de azoto (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O), respetivamente (Wang *et al.*, 2017), com essas quantidades foi possível obter produtividades acima de 95 t ha^{-1} .

¹ de tomate, entretanto, na adubação por fertirrega no tomate em estufa foi recomendada a utilização de 213-217 kg ha⁻¹ de N; 106-108 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 133-136 kg ha⁻¹ de K₂O (Wang *et al.*, 2016).

2.4. Efeitos do déficit hídrico nas plantas

Atualmente, a seca é um dos principais problemas abióticos que afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas em todo mundo e está a tornar-se o principal fator limitante na produtividade agrícola (Zhang *et al.*, 2019). O impacto da falta de água estende-se para quase todas as fases de crescimento e desenvolvimento das plantas (Du *et al.*, 2017). As plantas quando são submetidas a condições de stress hídrico respondem com uma série de alterações fisiológicas e bioquímicas que causam mudanças no seu fenótipo (Basit *et al.*, 2020; Jangid *et al.*, 2016). De um modo geral, se o stress for temporário a planta pode retomar o seu crescimento quando a situação de normalidade é reposta (Hao *et al.*, 2019), no entanto, caso seja permanente, pode causar a morte da planta.

2.4.1. Efeitos na fisiologia da planta

Em resposta ao stress hídrico, as plantas aumentam a produção e acumulação de ácido abscísico (ABA), nas folhas e noutros tecidos, que induz o fecho dos estomas para limitar a perda de água e, em consequência, a realização da respiração e da fotossíntese fica limitada devido ao impedimento da entrada e saída de dióxido de carbono e de oxigénio nos órgãos respiratórios e fotossintéticos (Kuromori *et al.*, 2018). A falta de água no solo causa stress hídrico nas plantas e afeta negativamente alguns componentes celulares que participam diretamente no processo da fotossíntese (Chen *et al.*, 2019), como por exemplo a clorofila. Além disso, causa alteração da respiração, absorção e translocação de nutrientes e fotoassimilados e regulação de hidratos de carbono e hormonas (Fernandes *et al.*, 2022). Um estudo realizado por Zhang *et al.* (2018b) mostrou que o crescimento da planta de tomate fica comprometido sob efeito de stress hídrico, devido a uma redução significativa do teor de clorofila e carotenoides e consequentemente da taxa fotossintética.

O stress hídrico afeta a capacidade fotossintética da planta, em todas os seus estágios de crescimento e desenvolvimento (Jangid *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018a). Na maioria das culturas os impactos são maiores nas fases iniciais de desenvolvimento e na fase de floração, mas no caso do tomate, a maior sensibilidade ao stress hídrico ocorre na fase de floração e frutificação, pelo facto deste afetar negativamente a abscisão dos órgãos florais que, em consequência causam menor número e tamanho dos frutos e

menor produtividade (Fernandes *et al.*, 2022). Uma redução da condutância estomática e na taxa fotossintética líquida, foi verificada em plantas submetidas ao efeito de stress hídrico (Yuan *et al.*, 2016), que em consequência reduziram o seu crescimento e desenvolvimento.

2.4.2. Efeitos na morfologia da planta

A falta de água no solo é apontada como uma das causas da diminuição da altura da planta e do diâmetro do caule, e faz com que as raízes cresçam em profundidade em busca desse recurso para satisfazer as necessidades hídricas da parte aérea, e da planta em geral (Sibomana *et al.*, 2013; Volpe *et al.*, 2018), levando assim à redução do rácio parte aérea/ parte radicular comprometendo a produtividade. O aumento do comprimento do sistema radicular é apontado como uma estratégia para mitigar os efeitos da seca (Volpe *et al.*, 2018). Na cultura do tomate este comportamento causa modificações morfológicas no sistema radicular da planta uma vez que diminui a quantidade de raízes laterais (Wang *et al.*, 2019). As respostas do sistema radicular ao stress hídrico dependem da via em que o ABA é induzido (Volpe *et al.*, 2018). O stress hídrico ocasiona também diminuição da condutância hidráulica da raiz, que em consequência diminui a absorção da água do solo (Kavroulakis *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2016). No caso do tomate, uma das culturas agrícola mais suscetíveis ao stress hídrico (Tembe *et al.*, 2017), sob condições de deficit hídrico apresentam menor comprimento do caule, menor número de folhas, menor área foliar, menor peso seco e fresco e consequentemente menor produtividade (Morsy, 2019). Uma redução na taxa de transpiração foi observada em plantas sob efeito de stress hídrico (Zhang *et al.*, 2017), tal facto condiciona a absorção da água e sais minerais, pelas raízes, que são essenciais para a sobrevivência da planta e produtividade da cultura.

2.4.3. Efeitos na produtividade e qualidade do fruto

O deficit hídrico na cultura do tomate afeta tanto a produtividade quanto a qualidade do fruto. Uma redução significativa da humidade do solo causa diminuição da biomassa seca da planta e consequentemente diminuição da produtividade da cultura (Wang *et al.*, 2019). Os efeitos na produtividade dependem da fase de desenvolvimento em que o stress ocorre (Cui *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2019; Nuruddin *et al.*, 2003). Cui *et al.* (2019) observou que quando o déficit hídrico ocorreu nas fases de floração e desenvolvimento do fruto e na fase de amadurecimento do fruto, a produtividade da cultura foi negativamente afetada, tendo causado uma redução na produtividade de 13 e 26%, respetivamente, enquanto que quando o mesmo ocorreu na fase vegetativa, não se observaram decréscimos significativos. A intensidade do stress é outro aspeto a ser

considerado. A maior redução do rendimento ocorre quando as plantas são submetidas em situações de stress hídrico mais severas (Sibomana *et al.*, 2013), sendo que o tamanho dos frutos e a produtividade da cultura diminui à medida que aumenta a intensidade do stress (Patane *et al.*, 2010).

Os efeitos na qualidade geram alguma discussão no sentido em que os estudos têm demonstrado comportamentos diferentes em relação à qualidade do tomate sob efeito de stress hídrico. No ensaio conduzido por Morsy (2019), em condições de deficit hídrico o tomate diminuiu a sua qualidade, devido ao efeito negativo da falta de água no teor de sais solúvel totais e de ácido ascórbico e, aumentou a eficiência de utilização deste importante recurso. Porém, num estudo realizado por Nahar *et al.* (2018), o stress hídrico melhorou a qualidade físico-química e organolética do tomate ao aumentar os teores de ácido ascórbico, ácido cítrico e ácido málico, glicose, frutose e sacarose. Apesar dessas diferenças, em diversos estudos são relatados efeitos positivos do stress hídrico na qualidade do tomate (Lu *et al.*, 2019), através do aumento dos teores de sólidos solúveis totais, açúcar solúvel, ácidos orgânicos, vitamina C (Cui *et al.*, 2019), atividade antioxidante total (Djurovic *et al.*, 2016) e firmeza do fruto (Patane *et al.*, 2010).

2.5. Efeito do déficit de azoto nas plantas

O azoto é um dos principais nutrientes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo um fator limitante para a produção da maioria das culturas (Liang *et al.*, 2018). É constituinte de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e enzimas, e a sua falta causa problemas graves na produtividade das culturas, por afetar, dentre outros processos, a fotossíntese (Wu *et al.*, 2019). Em situações de deficiência de azoto no solo, as plantas rapidamente emitem vários sinais fisiológicos e metabólicos, dentre os quais a diminuição da atividade de certas enzimas, degradação de proteínas e acumulação de carboidratos, que em consequência, induzem um stress oxidativo na planta causado pela geração de espécies reativas de oxigénio que conduzem à degradação oxidativa dos lípidos, também conhecida como peroxidação lipídica (Liu *et al.*, 2020b). Um estudo anterior mostrou que, sob stress grave de azoto há uma redução da condutância estomática das células do mesófilo e células da bainha do feixe, o que influencia a concentração de CO₂ intercelular e redução do conteúdo e atividade das enzimas fotossintéticas, o que reduz a taxa de carboxilação (Mu *et al.*, 2021).

Um ensaio realizado em *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) mostrou que o azoto afeta positivamente os níveis de clorofila e rubisco e a eficiência do uso do azoto fotossintético

(Perchlik *et al.*, 2018), sendo que quando há deficiência de azoto os níveis desses compostos e a eficiência de uso desse nutriente ficam comprometidas. A falta de azoto na fase reprodutiva também tem efeitos sobre a fotossíntese, pois causa senescência da planta e degradação dos componentes azotados, sobretudo enzimas fotossintéticas e tilacoides (Mu *et al.*, 2021).

Os efeitos negativos da falta de azoto também são registados na morfologia da planta. O crescimento da planta é inibido em condições de deficiência de azoto (Ning *et al.*, 2018). A densidade de plantas também pode sofrer redução sob efeito de deficit de azoto. Num estudo realizado com a cultura da colza, a falta de azoto provocou a morte de 39% das plântulas, tendo aumentado o declínio da densidade de plantas na fase de crescimento, causando redução significativa da produtividade (Liu *et al.*, 2019b). Sob condições de stress de deficiência de azoto as plantas tendem a reduzir da taxa de floração, frutificação, bem como os teores de carboidratos (Wang *et al.*, 2020). Nessas condições de stress também ocorre aumento do comprimento radicular da planta, que cresce em busca desse nutriente para satisfazer as suas necessidades nutricionais, levando a um aumento na razão raiz-planta (Li *et al.*, 2018). O aumento do comprimento da raiz resulta do aumento das atividades de enzimas-chave relacionadas com a assimilação de azoto, em situação de deficit, e, quando tal sucede há também aumento das raízes laterais, que em consequência aumentam a área de absorção do azoto (Lv *et al.*, 2021).

O azoto é um nutriente importante na coloração das folhas e em condições de escassez é remobilizado das folhas mais velhos para as mais jovens, o que faz com que os sintomas de necrose, que causam mudança na coloração de verde para amarelo, devido ao menor teor de clorofila, sejam apresentados primeiro nas folhas velhas e a posterior nas novas (Aci *et al.*, 2021; Suniaga Quijada *et al.*, 1991). Na cultura do tomate, o teor de clorofila e a taxa de assimilação de CO₂ pelas folhas de tomate também são afetados pela quantidade de azoto disponível para a planta, de tal modo que em condições de deficiência ocorre uma redução significativa desses parâmetros (Sun *et al.*, 2022). O stress severo de azoto resulta em menor área foliar e aumenta a grossura das folhas (Scholberg *et al.*, 2000). Em relação à produtividade da cultura, o tomate responde positivamente à adubação azotada, enquanto que a falta desse elemento pode resultar num decréscimo em relação à sua produtividade máxima (Abu-Alrub *et al.*, 2019). Em suma, o deficit de azoto é capaz de reduzir significativamente o peso da planta e produtividade da cultura (Ding *et al.*, 2005; Mu *et al.*, 2021; Ning *et al.*, 2018), mas pode aumentar alguns parâmetros qualitativos. Alguns estudos comprovam que a

redução da disponibilização de azoto aumenta os níveis de compostos antioxidantes hidrofílicos (vitamina C e fenóis totais), a atividade antioxidante (Hernandez *et al.*, 2019; Ochoa-Velasco *et al.*, 2016) e o teor de sais solúveis totais (Tavallali *et al.*, 2018).

2.6. Déficit combinado de água e azoto nas plantas

No contexto atual, marcado por cenários de alterações climáticas, as plantas raramente estão sujeitas a stresses individuais, sendo geralmente sujeitas a vários stresses ao mesmo tempo e que normalmente gera uma resposta nova por parte da planta (Dawood *et al.*, 2022). Apesar disso, há pouca bibliografia que estude stresses combinados, daí a importância de estudos como estes.

A água e o azoto fazem partes dos principais fatores que limitam o crescimento da planta e a produtividade de várias culturas (Klem *et al.*, 2018; Kunrath *et al.*, 2018). Os seus fornecimentos em níveis ótimos melhoram as características morfo-fisiológicas e aumentam a produtividade (Kaplan *et al.*, 2019). A aplicação excessiva de azoto torna a planta mais suscetível ao acamamento e ao ataque de pragas e doenças (Sousa, 2019), por outro lado, se a água for aplicada em excesso aumentam-se os riscos de lixiviação do azoto no solo, levando a contaminação do meio ambiente (Li *et al.*, 2017). Apesar do fornecimento deficitário controlado de água e a aplicação de menores quantidades de azoto serem apontados como alternativa para reduzir o uso excessivo destes recursos e os riscos socioeconómicos e ambientais associados (Khan *et al.*, 2018), a deficiência severa e simultânea de água e azoto afetam o teor de clorofila, proteínas e carotenoides, bem como, a atividade fotossintética (Karami *et al.*, 2020), sem deixar de parte a redução da produtividade da cultura (Yang *et al.*, 2017). Segundo Nguyen *et al.* (2017), o fornecimento adequado de água é fundamental para a maximização do aproveitamento do azoto pela planta, e vice versa, pois o stress hídrico induz o fecho dos estomas que se traduz numa diminuição da transpiração, e consequentemente limita a difusão de azoto do solo para as raízes, afetando o transporte de azoto no fluxo de seiva do xilema (Wang *et al.*, 2018a). O aumento de fornecimento de azoto não tem efeitos no rendimento em condições de stress hídrico, sugerindo que o efeito do stress de azoto é menor em relação a stress hídrico (Babazadeh *et al.*, 2021). Entretanto, outros estudos têm demonstrado que o fornecimento de azoto é capaz de inibir os efeitos da falta de água no solo sobre as plantas (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2016) e aumentar a eficiência do uso da água (Du *et al.*, 2017).

Em suma, a resposta das culturas ao fornecimento deficitário de água e azoto são estratégias a utilizar para melhorar a eficiência do uso da água e do azoto e reduzir os impactos ambientais relacionados as suas utilizações excessivas (Kunrath *et al.*, 2018), bem como aumentar os retornos económicos.

2.7. Estratégias sustentáveis para aumento da eficiência do uso do azoto e da água

O aumento da tolerância das plantas a determinados tipos de stress tem sido alvo de muitos estudos. Em volta dessa temática vários estudos têm sido conduzidos com o intuito de encontrar alternativas para mitigar os efeitos negativos do déficit de água e de azoto que desencadeiam alterações fisiológicas e morfológicas nas plantas. Alguns desses estudos procuram entender os mecanismos fisiológicos envolvidos na resposta da planta a esses déficits (e.g. Kuromori *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021). E, outros procuram soluções através do melhoramento genético (e. g. Borba *et al.*, 2017; Jureková *et al.*, 2011; Meise *et al.*, 2019; Sá, 2021), enxertia (e. g. Calvo-Polanco *et al.*, 2016), associação simbiótica planta-microrganismos (e. g. Chitarra *et al.*, 2016; Kavroulakis *et al.*, 2018) e uso de substâncias minerais, como o silício (e. g. El-Aziz, 2020; Shi *et al.*, 2016).

Para além destas estratégias, a tolerância das plantas a stresses exógenos tem sido frequentemente estudada com a aplicação de determinados elicitadores. Elicitadores são compostos endógenos ou exógenos que estimulam defesa (resistência ou tolerância) da planta contra stresses bióticos ou abióticos, pois ativam sinais de resposta que aumentam a produção de metabólitos secundários, levando a uma resposta de defesa na planta, e são classificados em bióticos ou abióticos (Aranda *et al.*, 2021). Tal como foi mencionado anteriormente, esses compostos têm sido usados na agricultura em várias situações, dentre os quais o uso de extratos de algas como mecanismos de mitigação da seca e das altas temperaturas (Salvi *et al.*, 2019), de trinexapac etil (TE), paclobutrazol (PAC) e ácido abscísico (ABA) na mitigação do stress hídrico na cultura de azevém (Mohammadi *et al.*, 2017) e mais recente o OMP (Van Oosten *et al.*, 2017).

2.7.1. Papel do Omeprazol como elicitador de tolerância a stresses abióticos

Recentemente o OMP que foi utilizado na melhoria da tolerância ao stress salino, no manjerição e tomate (Carillo *et al.*, 2019c; Cirillo *et al.*, 2019; Van Oosten *et al.*, 2017), ao stress hídrico, na hortelã-pimenta (Elansary *et al.*, 2019) e stress de azoto, no milho (Van Oosten *et al.*, 2019) (Tabela 1). O OMP, é um fármaco de uso clínico que em

mamíferos funciona como inibidor da bomba de prótons, inibindo as secreções de ácidos gástricos, particularmente em doenças como úlcera péptica e doença do refluxo gastroesofágico (Al-Badr, 2010; Jewell, 2007). O seu uso vai além da utilização em humanos, pois tem sido usado também em animais como cães e cavalos (Odunayo *et al.*, 2022; Sacks *et al.*, 2022). Em mamíferos o OMP interage com ATPases P-Type IIC e inibe ATPases H/K no lúmen intestinal, entretanto, apesar das plantas não terem ATPases tipo IIC que movem potássio ou sódio através da membrana, o OMP influencia os processos fisiológicos da planta (Shin *et al.*, 2009; Sweadner *et al.*, 2001), que resultam em melhoria da sua performance, e por isso tem sido testado nas plantas em respostas a stresses abióticos, apesar do seu estudo estar ainda numa fase bastante preliminar (Cirillo *et al.*, 2019).

Tabela 1. Síntese dos trabalhos realizados com aplicação do OMP em plantas sob condições de stresses abióticos

Tipo de stress	Cultura	Doses	Freq. de aplic.	Referência
Azoto	Milho	0, 1 μ M	A cada 4 dias (P2S) e a cada 3 dias (US)	(Van Oosten <i>et al.</i> , 2019)
Hídrico	Hortelã-pimenta	0, 10, 50, 100 e 200 μ M	7x, a cada 7 dias	(Elansary <i>et al.</i> , 2019)
Mecânico (gravitropismo)	Arabidopsis	0, 3 μ M	1x	(Okamoto <i>et al.</i> , 2018)
Salino	Alface	0, 10, 50, 100 e 200 μ M	4x, a cada 7 dias	(Carillo <i>et al.</i> , 2019b)
Salino	Manjerição	0, 10 μ M	4x com intervalos de 7 dias	(Carillo <i>et al.</i> , 2019c)
Salino	Manjerição	0, 1 μ M	3x, aos 35, 41 e 55 DAS	(Cirillo <i>et al.</i> , 2019)
Salino	Tomate	0, 10 e 100 μ M	5x, a cada 7 dias	(Rouphael <i>et al.</i> , 2018)
Salino	Tomate	0, 1, 10 e 45 μ M	Não especificado (EH) e 3x, aos 36, 50 e 68 DAS (ES)	(Van Oosten <i>et al.</i> , 2017)

EH-ensaio hidropónico; ES-ensaio em solo; P2S-primeiras duas semanas; US-últimas semanas; DAS-dias após a sementeira

2.7.2. Efeitos do omeprazol na morfologia e fisiologia das plantas

A aplicação de OMP nas plantas tem chamado a atenção de muitos investigadores devido aos seus efeitos na tolerância a stresses abióticos. O OMP nas plantas tem vários efeitos, dentre os quais, aumentar a quantidade de clorofila, taxa fotossintética e as trocas gasosas, reduzir as perdas de água aumentando o potencial hídrico da folha e o conteúdo relativo de água, bem como, aumentar o conteúdo de prolina e modular a expressão génica de metabolitos secundários, em plantas de hortelã-pimenta sujeitas a stress hídrico (Elansary *et al.*, 2019). Em plantas de tomate sob condições de stress salino, o OMP induziu o aumento das raízes e da parte aérea em condições de stress severo (Van Oosten *et al.*, 2017). Na mesma cultura, sob condições de stress salino, a aplicação deste elicitor aumentou o peso seco da raiz e as suas características morfológicas (comprimento total e superfície da raiz) bem como a transpiração e taxa fotossintética das plantas (Rouphael *et al.*, 2018). Um estudo recente com a cultura de alface indicou ainda que o OMP, para além de aumentar a tolerância das plantas à salinidade, também aumenta a biomassa da raiz e consequentemente melhora a absorção de nutrientes e água, aumentando a eficiência de uso desses recursos em condições de crescimento ótimas (Carillo *et al.*, 2019b).

O aumento da tolerância ao deficit individual de água e de azoto também foi comprovado recentemente em hortelã-pimenta (Elansary *et al.*, 2019) e em milho (Van Oosten *et al.*, 2019), respetivamente. A aplicação de diferentes doses de OMP (0, 50, 100 e 200µM) em plantas de hortelã-pimenta sob diferentes níveis de irrigação, proporcionou um aumento significativo na altura, número de folhas, área foliar e peso seco das plantas tratadas com este elicitor, quando em condições de baixa disponibilidade de água (70% e 50% de capacidade de campo). A diminuição do número de folhas, área foliar e peso seco da planta foi menor com a aplicação de 100 e 200µM de OMP (Elansary *et al.*, 2019). Em condições de stress de azoto, o OMP melhora a absorção e assimilação de nitrato por meio de mudanças na atividade da enzima nitrato redutase, no metabolismo primário e na expressão génica (Van Oosten *et al.*, 2019). Nas mesmas condições, o OMP elicita a síntese dos aminoácidos livres, glutamina e asparagina, e os seus transportes para as raízes, ocasionando o transporte de azoto de longas distâncias (Van Oosten *et al.*, 2019). A síntese de ácido gama-aminobutírico (GABA) e de alanina também podem ser influenciadas pela aplicação de OMP e, quando tal acontece, pode ocorrer o crescimento das raízes e melhoria da absorção e síntese de nutrientes (Van Oosten *et al.*, 2019), dentre os quais o azoto. O GABA e a alanina são

aminoácidos associados ao fornecimento de quelatos de carbono e ATP, fundamentais para a síntese de aminoácidos e proteínas nas raízes (Carillo *et al.*, 2019a). Em estudo anterior, a aplicação de OMP em tomate sob stress salino, aumentou a acumulação de cutina nas folhas, uma macromolécula protetora contra a perda excessiva de água (Rouphael *et al.*, 2018). Entretanto, até a presente data não há estudos relacionados com o uso deste elicitor na cultura de tomate em condições de déficit hídrico ou de azoto, bem como nunca foram estudados os efeitos deste elicitor quando aplicado a plantas sujeitas a stresses combinados.

2.7.3. Efeitos do omeprazol no conteúdo de iões da planta

Nos animais o OMP atua como inibidor de ATPase de potássio e nas plantas não está caracterizado o seu efeito inibitório. Apesar de carecer de mais estudos, observou-se recentemente que concentrações muito altas de OMP (1mM) podem inibir a fração de proteína ATPase nas raízes das plantas (Van Oosten *et al.*, 2019). Porém, propõe-se que o OMP tem efeitos na participação e sequestro de iões tóxicos, como por exemplo o sódio (Na^+) e o cloro (Cl^-), que se acumulam em condições de stress salino. Em plantas de manjerição, a aplicação de OMP reduziu a relação Na:K nas folhas (Van Oosten *et al.*, 2017). As concentrações de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e de nitrato (NO_3^-) também podem sofrer alterações com a aplicação de OMP. Estudo realizado na cultura de tomate demonstrou efeitos positivos do OMP no aumento da concentração de NO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} e, redução dos iões tóxicos, como o Na^+ e Cl^- , em plantas sob condições de stress salino (Rouphael *et al.*, 2018). É importante salientar, que o efeito do OMP na concentração de iões na planta, em alguns caso, é dependente da dose aplicada, como por exemplo, no estudo realizado por (Rouphael *et al.*, 2018), onde as concentrações de Na^+ e Cl^- reduziram até 30% e 20%, com a aplicação de 10 e 100 μM de OMP, respetivamente.

2.7.4. Efeitos do omeprazol na expressão génica

Os efeitos do OMP na expressão de genes envolvidos nas respostas das plantas a determinados stresses abióticos têm sido estudados (e. g. Okamoto *et al.*, 2018). O metabolismo da ABA foi avaliados em plantas com e sem stress salino, observando-se que a aplicação de OMP aumentou a expressão do gene ABA Aldeído Oxidase (Cirillo *et al.*, 2019). Vários outros genes como a nitrito redutase e asparagina sintetase, envolvidos na absorção e translocação de azoto na planta e na absorção de nitrato do solo e na sua translocação para o caule (Garnett *et al.*, 2013) (Noguero *et al.*, 2016),

foram influenciados pela aplicação de OMP num estudo realizado com a cultura do milho sob stress de azoto (Van Oosten *et al.*, 2019).

Em plantas de hortelã-pimenta, sob condições de stress hídrico, a aplicação de OMP resultou num aumento da acumulação de mentol e mentona, através da indução da expressão de genes-chave associados à biossíntese de mentol, que resultou no aumento da sua qualidade (Elansary *et al.*, 2019). A expressão de genes induzidos pelo toque e o Fator de Resposta ao Etileno1, que codifica um fator de transcrição que regula os genes responsivos ao etileno e ao jasmonato, foram aumentados, num estudo realizado com *Arabidopsis* sob condições de stress mecânico (Okamoto *et al.*, 2018). Também foi comprovado o efeito positivo do OMP na regulação da expressão do ABA, diminuindo a sua concentração nas raízes e permitindo o crescimento de raízes laterais e consequentemente a absorção de nitrato, em plantas de tomate sob stress salino, sugerindo um melhor crescimento e desenvolvimento das plantas nesta situação de stress (Van Oosten *et al.*, 2017). É evidente que o OMP tem múltiplos efeitos na regulação de genes responsivos aos stresses abióticos (mecânicos, salino, hídrico e de azoto), mas até o momento não se sabe como estes genes se comportariam em condições de stress combinado, incluindo de água e azoto, em plantas de tomate.

2.7.5. Efeitos antagónicos da aplicação de omeprazol

Não obstante aos efeitos positivos do OMP, a sua aplicação pode resultar em efeitos antagónicos na planta. Foi demonstrado que em condições de stress salino, o crescimento da planta é inversamente proporcional à dose, sendo que as doses mais baixas (1µM de OMP) proporcionam maior comprimento e área das raízes, acumulação de biomassa e maior crescimento das plantas e, as mais altas, não estimulam o aumento destes parâmetros morfológicos (10µM de OMP) ou causam efeitos inibitórios (45µM de OMP) (Van Oosten *et al.*, 2019). Em plantas de manjerição, igualmente sob stress salino, apesar da aplicação da mesma dose (10µM) de OMP ter resultado em efeitos positivos na biomassa fresca e seca da parte aérea e da raiz (Carillo *et al.*, 2019c), efeitos antagónicos foram observados na área foliar, peso fresco dos rebentos e no conteúdo de iões (razão Na:K e concentração de nitrato) das plantas, em alguns génotipos de manjerição stressados (Cirillo *et al.*, 2019). O efeito positivo do OMP no aumento do tempo de prateleira pós-colheita de plantas em condições ótimas também foi observado, mas em condições de stress, ocorreram efeitos negativos (diminuição do tempo de vida de prateleira) em alguns génotipos de manjerição (Cirillo *et al.*, 2019). Assim, é necessário a realização de estudos que visem a determinação das doses

efetivas a serem aplicadas em diferentes espécies e genótipos, sob diferentes condições de stresses abióticos.

2.7.6. Custo económico e impacto da aplicação de OMP na agricultura

O facto do OMP ser um produto caro, com custo a volta de €1/mg (um euro por miligrama) isso poderia ser uma limitante para a sua aplicação na agricultura em grande escala, caso não fosse esta a estratégia mais eficiente para aumentar a WUE e o NUE. Não obstante a isso, a sua aplicação em grande escala na agricultura poderia criar, inicialmente, uma rotura no fornecimento para uso humano e animal, pois trata-se de um fármaco bastante utilizado no tratamento de doenças gastro intestinais (Al-Badr, 2010; Jewell, 2007; Sacks *et al.*, 2022). Entretanto, a questão económica poderá vir a ser ultrapassada com a criação de análogos de OMP mais baratos, se tiver efeito significativo na eficiência do uso de água e do azoto.

3. Materiais e métodos

O presente trabalho foi dividido em dois ensaios, com objetivos complementares, tendo estes sido realizados em dois lugares distintos (Vairão-Portugal e Chianga-Angola). O Ensaio 1 foi levado a cabo numa câmara de fitoclima onde diferentes concentrações de OMP foram aplicadas em plantas controlo e plantas sujeitas a deficit combinado de azoto e água. Esse ensaio terminou aos 20 dias após o transplante, tendo como objetivo selecionar a concentração de OMP a utilizar no Ensaio 2. O Ensaio 2 foi conduzido numa estufa e as plantas foram crescidas até à colheita do fruto, tendo sido analisados os efeitos do OMP quer em deficits individuais de azoto e água, quer o deficit combinado dos mesmos.

3.1. Ensaio 1: Otimização da dose de aplicação de OMP na mitigação dos efeitos negativos do déficit combinado de água e azoto na cultura do tomate

Neste ensaio foi analisado o efeito de diferentes doses de OMP (0, 1, 5, e 10 μM) em plantas controlo e sujeitas ao déficit combinado de água e azoto. A sua realização foi feita em condições controladas, numa câmara fitoclimática, (Aralab), no Campus de Vairão da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

3.1.1. Manutenção das plantas e condições de crescimento

As sementes de tomateiro cv. Moneymaker foram germinadas em tabuleiros alveolados, contendo como substrato vermiculite colocados numa câmara fitoclimática (fotoperíodo de 16h, intensidade luminosa de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, temperatura de 25°C durante período luminoso, e de 23°C no período de obscuridade e humidade relativa de 70%). Cada semente de tomate foi colocada a aproximadamente um centímetro de profundidade. Para evitar a sobreposição das canópias das plântulas, a sementeira foi feita deixando sempre um espaço sem semente entre os alvéolos. Após a sementeira foram feitas regas com 20 mL de água destilada por cada alvéolo, com um intervalo de rega de dois dias. A seguir a emergência as plantas foram fertilizadas três vezes (uma vez por semana) com um adubo líquido 6-3-6 (Universal), no qual aplicou-se a concentração de 7ml do fertilizante diluída em 1 litro de água. A emergência completa das plântulas ocorreu nove dias após a sementeira.

Aos 31 dias após a sementeira as plântulas foram transplantadas para vasos de 12cm de diâmetro de topo, 7,7cm de diâmetro de fundo e 9,8cm de altura, os quais foram preenchidos com 120g de vermiculite. Foi feita uma seleção das plântulas mais homogêneas, com pelo menos 3 folhas verdadeiras. Estes vasos foram regados até perfazer 100% da capacidade de campo, tendo sido aplicada para o efeito 420 mL de uma solução nutritiva completa ou uma solução com déficit de N (dependendo do tratamento) contendo diferentes concentrações de OMP (0, 1, 5 e 10 μM). Os vasos foram posteriormente cobertos com plásticos de polietileno de forma a não haver perdas de água por evaporação (Figura 2), pesados para determinação do peso a ser mantido ao longo do período experimental e transferidos novamente para a câmara climática.

As soluções nutritivas administradas tinham a seguinte composição:

- Solução nutritiva completa (100% de N): 10,5 de N (10,0 de NO_3 ; 0,5 de NH_4); 1,9 de P (1,9 de H_2PO_4); 6,1 de K; 3,6 de Ca; 1,6 de S; 1,6 de SO_4 ; 2,5 de Mg; 2,6 de Cl; 0,5 de HCO_3 (mmol/L)
- Solução nutritiva com carência de N (50% de N): 5,3 de N (5,0 de NO_3 ; 0,3 de NH_4); 1,9 de P (1,9 de H_2PO_4); 6,1 de K; 3,6 de Ca; 4,8 de S (4,8 de SO_4); 2,8 de Mg; 2,6 de Cl; 0,5 de HCO_3 (mmol/L)

Ambas a soluções tiveram a seguinte composição em micronutrientes: 35,9 de Fe; 10,0 de Mn; 20,1 de B; 0,9 de Cu; 5,0 de Zn; 0,5 de Mo ($\mu\text{mol/L}$) bem como um pH de 5,8 e condutividade elétrica de 1,9 dS/m.

No que respeita à rega adicional, os tratamentos controlo foram pesados diariamente e regados com água destilada para manter a capacidade de campo a 100% durante o período experimental, enquanto no caso das plantas em déficit combinado não foi administrada rega adicional, resultando numa diminuição progressiva da capacidade de campo até aos 50% (10 dias após o transplante). Do dia 10 até a colheita (20 dias pós-transplante), as plantas foram mantidas a 100% ou 50% de capacidade de campo do substrato, de acordo com o respetivo tratamento, tendo para isso sido diariamente regadas, com água destilada, as plantas de todos os tratamentos. Adicionalmente, 8 dias após o transplante, duas plantas de cada tratamento foram retiradas e pesadas e os valores obtidos foram subtraídos ao peso dos vasos (experimentais para obter o peso da solução nutritiva presente nos mesmos. Ao dia 16 de dezembro de 2021 (20 dias após o transplante) as plantas foram recolhidas e diversos parâmetros morfológicos e fisiológicos foram avaliados.



Figura 2. Aspeto geral do Ensaio 1, onde se podem observar os vasos cobertos com plástico para impedir a evaporação da água e disposição dos mesmos na câmara fitoclimática

3.1.2. Avaliação dos parâmetros morfológicos

No final da experiência foram pesados os vasos para determinação da quantidade de água consumida pelas plantas ao longo da experiência. As plantas foram recolhidas e lavadas, e o comprimento da raiz (medido do colo até a extremidade da raiz principal) e altura das plantas (medida do colo até ao ápice da planta) foram medidos com auxílio de uma régua graduada (cm). Seguidamente, a parte aérea foi separada em caule e folhas, tendo sido contado o número de folhas e determinada a sua área foliar (cm²) recorrendo ao LI3100 (Li- cor, USA). O peso fresco das raízes, caule e folhas (g) foi também registado, seguido do peso seco após a secagem em estufa de circulação de ar forçado (Binder) após secagem a uma temperatura de 80° C, durante 72 horas.

Para obtenção de outros indicadores morfológicos as seguintes equações foram aplicadas:

Equação 1. Área foliar específica (cm²/g)

$$\text{Área foliar específica} = \frac{\text{Área foliar}}{\text{Peso seco das folhas}}$$

Equação 2. Razão parte aérea/raiz (g/g peso seco)

$$\text{Razão parte aérea/raiz} = \frac{\text{Peso seco das folhas} + \text{Peso seco do caule}}{\text{Peso seco da raiz}}$$

Equação 3. Razão folhas/planta

$$\text{Razão folhas/planta} = \frac{\text{Peso seco das folhas}}{\text{Peso seco da planta}}$$

3.1.3. Avaliação dos parâmetros fisiológicos

No último dia do ensaio, foram avaliados os teores relativos de clorofila/índices SPAD (SPAD 502 plus Konica Minolta, Japão) em leituras obtidas em triplicado na folha mais jovem totalmente desenvolvida de cada planta.

Tendo em consideração a biomassa e área foliar produzidas pela planta e a água consumida ao longo do ensaio as seguintes equações foram aplicadas para determinação da eficiência do uso de água pelas plantas e consumo de água em função da área foliar:

Equação 4. Eficiência do uso da água (g/ml)

$$\text{Eficiência do uso de água} = \frac{\text{Massa seca da planta}}{\text{Consumo total de água}}$$

Equação 5. Consumo de água por área foliar (mL/cm²)

$$\text{Consumo de água por área foliar} = \frac{\text{Consumo de água}}{\text{Área foliar}}$$

3.1.4. Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e compreendeu 8 tratamentos com 5 réplicas cada. Os tratamentos consistiram em quatro doses de OMP (0, 1, 5 e 10 µM) aplicadas em plantas submetidas a duas condições de crescimento (com e sem déficit combinado de água e azoto). As médias foram comparadas recorrendo ao teste estatístico *one way anova* para cada condição de crescimento das plantas (uma para o controlo e outra para o déficit combinado) e, os resultados que apresentaram pelo menos uma diferença significativa entre os tratamentos no teste de F foram sujeitos a um teste Post-Hoc, utilizando a análise de Tukey (5% significância.); doses iguais de OMP foram comparadas entre si nas duas condições de crescimento, com recurso ao *T-Test* a 5% de significância. O tratamento estatístico foi feito com recurso ao programa IBM SPSS Statistics 26 e os gráficos foram construídos no programa Microsoft Excel 365.

3.2. Ensaio 2: Efeito do omeprazol no crescimento, desenvolvimento, produtividade e qualidade do fruto do tomate submetido ao déficit de água, de azoto e ao déficit combinado de água e azoto

Este ensaio teve como objetivo analisar o efeito do OMP no crescimento, desenvolvimento, produtividade e qualidade do fruto do tomate submetido ao déficit de água, de azoto e ao déficit combinado de água e azoto. Os referidos déficits foram de 50% de água e 50% de azoto. Neste ensaio utilizou-se a dose de 1 μM de OMP, correspondente ao tratamento de 1 μM de OMP do ensaio 1. A utilização desta dose deveu-se ao facto de esta ser a dose que apresentou melhores resultados nos parâmetros analisados no ensaio 1, não obstante ao facto de ser a dose mais baixa, o que a torna vantajosa do ponto de vista económico e eventualmente ambiental. No ensaio 1, as doses utilizadas foram definidas para atender as necessidades da planta durante 4 semanas após o início da experiência, assim, no ensaio 2 foi necessário a aplicação desta dose (1 μM de OMP) a cada 4 semana, até ao momento da colheita.

Este ensaio foi realizado numa estufa de vidro não aclimatizada, da Estação Experimental Agrícola do Instituto de Investigação Agronómica, na Chianga-Huambo, Angola, localizada a uma latitude e longitude de $\pm 12^\circ 44' 34'' \text{S}$ e $\pm 15^\circ 49' 49'' \text{S}$, respetivamente, e altitude de mais de 1700m (Figura 3).

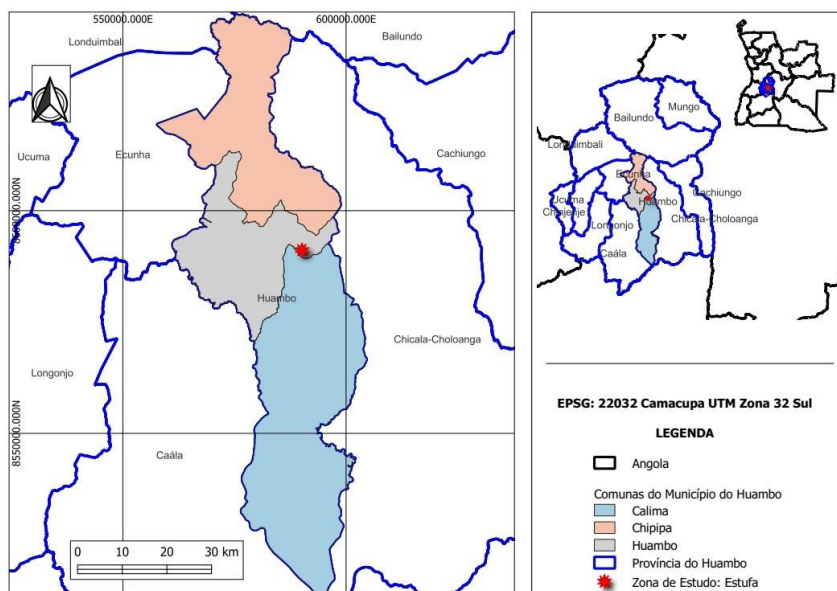


Figura 3. Mapa de localização da estufa onde foi realizada o ensaio

3.2.1. Recolha e tratamento do solo

Para este ensaio utilizou-se o solo ferralítico vermelho como substrato e o mesmo foi recolhido na localidade da Chianga, Huambo-Angola. A recolha foi efetuada numa área de 10 m² a uma profundidade de 0-30cm. Antes da mesma fez-se uma sacha na área para facilitar a escavação e retirou-se uma amostra complexa de solo. Adotou-se o método de amostragem em zigzag e, as referidas amostras foram enviadas ao Laboratório Analítico Bioclinico, S.L.U., onde se fez a análise física e química, cujo resultados aparecem no Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas e físicas do solo utilizado no ensaio

Resultados gerais do extrato de solo 1:2									
pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	(μS/cm)	meq/100g					mg/L		
5,4	95	0,07	0,12	0,36	0,21	0,76	8	<2,5	<2,5
Macronutrientes					Micronutrientes				
M.O	N	P ass.	K ass.	C/N	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	B ³⁺
%	mg/kg				mg/kg				
2,73	0,11	15,63	47,2	14,36	74,8	359	0,50	1,00	<0,25
Textura									
Areia	Limo	Argila	Classe						
%									
21,5	14,7	63,8	Argilosa						

CE-condutividade elétrica a 20°C, M.O-matéria orgânica, P ass.-fósforo assimilável (Olsen), K ass.-potássio assimilável, CTC-capacidade de troca catiónica

Antes de ser posto nos vasos, o solo recolhido para o ensaio foi colocado a secar, sobre lonas, dentro da estufa durante 72 horas e posteriormente foi destorroado, para o tornar mais homogéneo.

3.2.2. Manutenção das plantas e condições de crescimento

Neste ensaio as sementes de tomateiro cv. Moneymaker foram germinadas em tabuleiros alveolados contendo como substrato turfa, onde foi colocada uma semente por alvéolo a aproximadamente um centímetro de profundidade e, para evitar a sobreposição das canópi das plântulas, foi deixado sempre um espaço sem semente entre os alvéolos (Figura 4). Após a sementeira, foram feitas regas diárias com 2,5mL, 5mL e 10mL de água por cada alvéolo, antes da emergência das plântulas, da emergência aos 14 dias após a emergência e dos 14 aos 28 dias após a emergência

(momento do transplante-39 dias após a sementeira), respetivamente. A emergência completa das plântulas ocorreu onze dias após a sementeira.



Figura 4. Tabuleiro alveolado usado na sementeira do Ensaio 2, com alvéolos vazios entre plantas

Aos 39 dias após a sementeira as plântulas foram transplantadas para os vasos de 32cm de diâmetro de topo, 20,5cm de diâmetro de fundo e 30cm de altura, os quais foram preenchidos com 15 kg de solo ferralítico vermelho. O registo do número de folhas com mais de 3 cm de comprimento, altura da planta (em centímetros) medida a partir do colo até o ápice e o diâmetro do caule (em milímetros) foi feita momentos antes do transplante. As plântulas transplantadas estavam em média no estágio de crescimento de 5 folhas verdadeiras dando-se preferência aquelas que apresentavam melhor crescimento. Antes do transplante os solos foram regados com 50% da quantidade de água necessária, em função do tratamento e, após o transplante aplicou-se o restante da água necessária para atingir o 100%. Aos tratamentos com OMP foram aplicados 400mL de solução a 1uM de OMP e, a quantidade de água da solução foi previamente substituída da necessidade de água desses tratamentos. As aplicações de OMP foram feitas nos momentos de rega e no total foram realizadas 4 aplicações, num intervalo de 30 dias entre elas.

A adubação de acordo com a análise de solo e com as necessidades da cultura foi feita antes do transplante, tendo sido aplicado 240, 120 e 150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respetivamente, pois, segundo Wang *et al.* (2017), bons resultados foram obtidos com estas aplicações. O azoto foi fracionado em duas partes, sendo 50% aplicado em adubação de fundo, no momento do transplante, e outros 50% aplicados 35 dias após o transplante. Nas duas ocasiões o adubo aplicado foi o granular. A ureia (46%N),

superfosfato simples (16%P₂O₅; 16% Ca²⁺; 10% S) e o cloreto de potássio (50% K₂O; 39%Cl) foram utilizados como fonte de macronutrientes principais (N, P e K). Os micronutrientes foram aplicados via foliar, após o aparecimento das primeiras flores.

No que respeita a rega, inicialmente todos os tratamentos foram regados até a capacidade de campo do solo. Entretanto, a partir do dia a seguir à transplantação, a gestão da água foi feita mediante a evapotranspiração da cultura, calculada através a Equação 6. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) foi feita com base na temperatura média registada no interior da estufa (Tabela 3), tal como sugere (Santos, 2017), quando não se tem disponibilidade de dados das variáveis climáticas necessárias para o cálculo da ET₀ por outros métodos. Para a estimativa utilizou-se a região dos Trópicos e Subtrópicos de área húmida e subhúmida e temperaturas médias variáveis entre 20 e 30°C (temperaturas moderadas a quente), tendo resultado numa ET₀ de 5mm/dia (Allen, 2006). Os coeficientes da cultura (K_c) para as fases inicial, desenvolvimento, intermédia, final e de colheita foram 0,37; 0,72; 1,03; 1,1 e 0,75, respetivamente (de Santana *et al.*, 2011). A duração de cada fase foi de 10, 20, 30 e 30, respetivamente para as quatro primeiras fases e, a duração da fase de colheita foi em função do momento de colheita de cada tratamento variando de 0 a 19 (de Santana *et al.*, 2011). Os tratamentos com déficits de água e déficit combinado de água e azoto foram regados com 50% da evapotranspiração da cultura.

Equação 6. Evapotranspiração cultural

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

Durante o ensaio foram registadas as temperaturas e a humidade no interior da estufa (Tabela 3). Os dados internos foram obtidos com o auxílio de um Termo-higrómetro “Mi Temperature and Humidity Nonitor 2”, modelo WSD03MMC, instalado no interior da estufa.

Tabela 3. Temperaturas e humidade relativa registadas durante o ensaio no interior da estufa

Mês	Temperatura (°C)			Humidade Relativa (%)		
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média
Mar.	43,3	13,4	28,4 ± 2,05	99	26	62,5 ± 6,92
Abr.	42,3	11,5	26,9 ± 1,95	99	22	60,5 ± 7,05
Mai.	41,8	9,3	25,6 ± 2,12	89	18	53,5 ± 6,98
Jun.	39,9	8,4	24,2 ± 1,97	76	15	45,5 ± 6,75
Jul	38,9	10,4	24,7 ± 1,87	76	16	46,0 ± 6,98
Ago	41,7	11,7	26,7 ± 1,92	75	14	44,5 ± 7,12

Durante o crescimento e desenvolvimento da cultura foram feitos alguns trabalhos culturais: poda, limpeza ou remoção dos ramos axilares (ladrões ou verticais), tutoramento e sachas. A poda, que serviu para conduzir a planta com apenas uma haste, e a remoção dos ramos axilares teve início 14 dias após transplante (DAT). Foi realizada também uma sacha manual aos 25 DAT. Além disso, foi feito o tutoramento das plantas, que teve início aos 15 DAT. Aos 30 dias após o transplante as plantas começaram a apresentar sintomas de oídio, com maior incidência nos tratamentos com déficits de água e déficit combinado de água e azoto e, a partir desta data, foram feitas duas aplicações de azoxitrobina, num intervalo de 5 dias entre uma aplicação e outra, tendo resultado no controlo da situação. Devido à não correção do solo, aos 48 DAT as plantas começaram a apresentar déficit de ferro, com maior registo nos tratamentos com déficit de azoto e, para a intervenção foram feitas 6 aplicações foliares com micronutrientes (Cálcio, Boro, Zinco, Ferro), num intervalo de 5 dias entre uma aplicação e outra. Também foram registadas presenças de fundo negro (podridão apical) causado pela carência de cálcio e a intervenção com os micronutrientes acima referido solucionou o problema. Para acelerar a maturação, aos 69 dias após o transplante, foi feita a quebra da dominância apical através da decapitação do ápice da planta.

3.2.3. Avaliações realizadas à floração, frutificação e maturação

Aquando dos diferentes estados fenológicos (floração, frutificação e maturação) foram avaliados a nível morfológico a altura da planta, o número de folhas e o diâmetro do caule, sendo que para os dois primeiros usou-se o mesmo procedimento aplicado no ensaio 1 (secção 3.1.2). O diâmetro do caule foi medido com auxílio de um paquímetro digital, e esta determinação foi feita a 10 cm do colo da planta. Também foi feita, em cada um desses estados fenológicos, a análise fisiológica do teor relativo de clorofila foliar através do SPAD (como descrito no ensaio1-secção 3.1.3). Além destas

avaliações, também foi feita a determinação das datas de floração, frutificação e maturação (aparecimento do primeiro fruto maduro), mediante a contagem dos dias após o transplante (DAT) decorridos até a planta atingir um desses estágios de desenvolvimento.

3.2.4. Avaliações realizadas à colheita

3.2.4.1. Parâmetros morfológicos e de performance da planta

As plantas foram recolhidas quando tinham mais de cinco frutos maduros, tendo sido as raízes lavadas e registado o seu comprimento (medido do colo até a extremidade da raiz principal). Seguidamente, a parte aérea foi separada em caule, folhas, pedúnculos e frutos e foram registados os pesos frescos (g) de todos os órgãos de cada planta (incluindo da raiz) individualmente. Em seguida foram determinados os pesos secos (g) após a secagem em estufa de circulação de ar forçado (Binder), a uma temperatura de 80° C, durante 96 horas, para os frutos, e 72 horas, para os outros órgãos. Os órgãos retirados durante a poda não foram tidos em conta na determinação dos pesos frescos e secos. O peso fresco dos frutos correspondeu a produtividade, a qual foi expressa em quilogramas por planta. Por último, foi ainda avaliada a eficiência do uso da água (Kg/m³) em função da quantidade de água consumida pela planta durante todo seu ciclo e a sua produtividade (Equação 7).

Equação 7. Eficiência do uso da água em função da produtividade

$$Eficiência\ do\ uso\ de\ água = \frac{Produtividade}{Consumo\ total\ de\ água}$$

3.2.4.2. Avaliação da qualidade dos frutos

Foram selecionados três frutos uniformes, maduros e sem doenças de cada planta na colheita. Os frutos foram homogeneizados num almofariz, em seguida, o pH, o teor de sólidos solúveis de totais (SST) e a acidez titulável (% ácido cítrico) foram determinados. O pH dos frutos (potencial hidrogeniônico) foi determinado com auxílio de um potenciômetro de bancada (Tecnal, R-107PT-100) após diluídas uniformemente 10g da polpa da amostra em 100mL de água destilada. O TSS foi determinado com base na medição do índice de refração da amostra, realizada num refratômetro de mão (RHB-32ATC). Nesta análise gotículas das amostras foram adicionadas ao prisma do refratômetro e em seguida fez-se a leitura do valor expresso em °Brix. Para a determinação da acidez titulável fez-se a diluição de 10g da polpa da amostra em 100mL de água destilada, seguida de filtração em algodão e, ao filtrado foi adicionada 0,3mL

de solução alcoólica de fenolftaleína 1% (p/v), seguido de titulação com solução de hidróxido de sódio 0,01N sob agitação constante, até coloração rósea persistente por 30 segundos. Após isso, a concentração de ácido foi calculada de acordo com a Equação 8.

Equação 8. Acidez titulável (% ácido cítrico)

$$Acidez\ titulável = \frac{V * f * 100}{P * c}$$

Onde: V = nº de mL da solução de hidróxido de sódio 0,01N gasto na titulação; f = factor da solução de hidróxido de sódio 0,01N (f=1, quando não é conhecido); P = peso (g) da amostra usado na titulação; c = correcção para solução de NaOH 1N (c=100 para solução NaOH 0,01N)

Tendo em consideração o SST e a acidez titulável a Equação 8 foi aplicada para determinação do índice de maturação.

Equação 9. Índice de maturação

$$Índice\ de\ maturação = \frac{Sólido\ Solúveis\ Totais}{Acidez\ titulável}$$

3.2.5. Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado e fez um total de 8 tratamentos cada um com 6 réplicas (n=6). Os tratamentos consistiram em duas doses de OMP (0 e 1 µM) e diferentes situações de déficit (controlo, déficit de água, de azoto e combinação de ambos).

As médias foram comparadas recorrendo ao teste estatístico *two way anova* e, os resultados que apresentaram pelo menos uma diferença significativa entre os tratamentos no teste de F, foram sujeitos a um teste Post-Hoc, utilizando também a análise de Tukey a 5% significância. O tratamento estatístico foi feito com recurso ao programa IBM SPSS Statistics 26 e os gráficos foram construídos no programa Microsoft Excel 365

4. Resultados e discussão

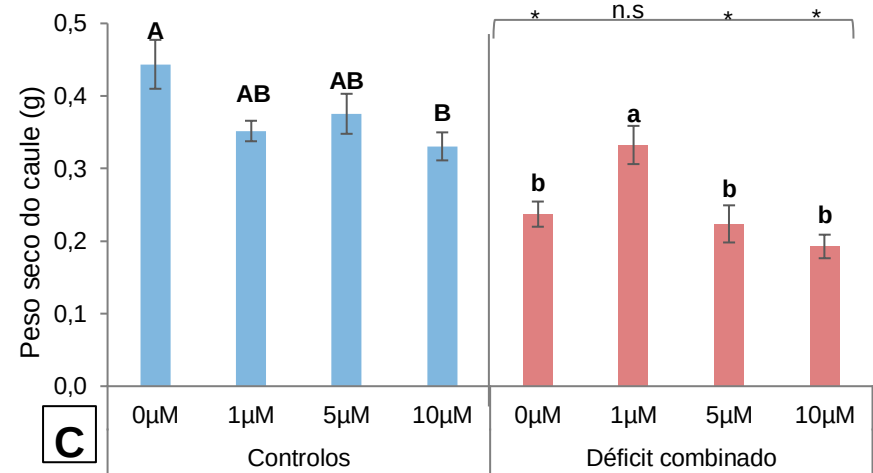
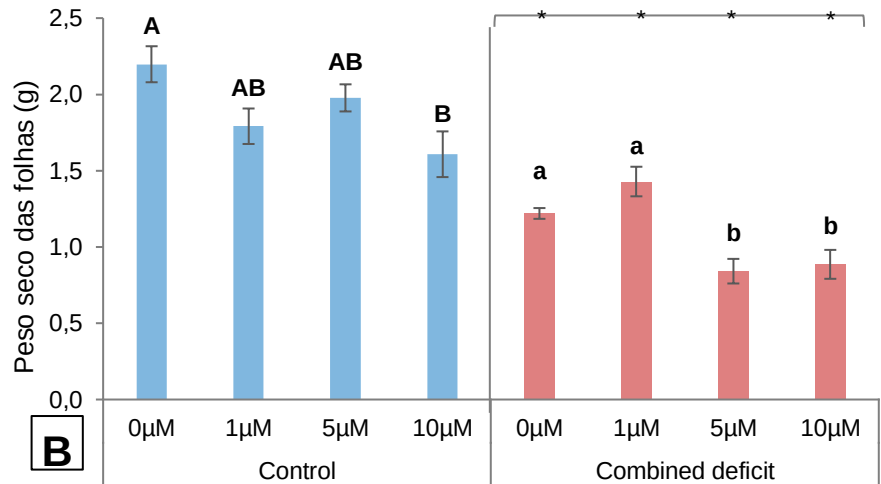
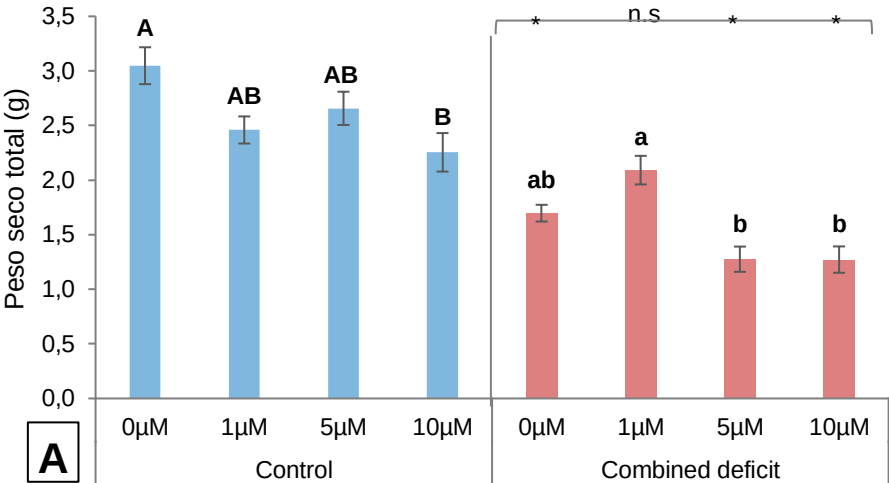
4.1. Ensaio 1: Otimização da dose de aplicação de omeprazol na mitigação dos efeitos negativos do déficit combinado de água e azoto na cultura do tomate

4.1.1. Peso seco total e peso seco dos órgãos

Nas plantas controlo (que não estiveram expostas a qualquer deficit) a aplicação de 10 μ M de OMP provocou uma redução significativa de mais de 23% na biomassa da planta, em comparação com o controlo sem OMP que não diferiu das demais doses aplicadas (Figura 9A). Em condições de déficit combinado a dose de 1 μ M de OMP, aumentou significativamente em mais de 38 e 39% o peso seco total em comparação com as doses de 5 e 10 μ M, respetivamente e tendencialmente aumentou 18% em relação ao tratamento sem OMP (Figura 9A). O aumento do peso seco da planta também foi relatado num estudo com a cultura de tomate em condições de stress salino (Van Oosten *et al.*, 2017). No peso seco das folhas e do caule (Figura 9B e 9C) também foram observados efeitos significativos do OMP nos tratamentos controlos e com déficit combinado. O OMP não apresentou efeitos positivos no peso seco das folhas de plantas controlo e, a dose de 10 μ M de OMP foi estatisticamente inferior ($\pm 27\%$) em relação ao controlo branco (sem OMP). E condições de déficit, a dose de 1 μ M de OMP aumentou tendencialmente o peso seco das folhas ($\pm 14\%$) comparativamente a plantas sem OMP (0 μ M), porém, doses mais elevadas de OMP (5 e 10 μ M) levaram a uma redução significativa (± 42 e 35% , respetivamente) quando comparados com a concentração de 1 μ M (Figura 9B). No peso seco do caule os resultados foram semelhantes aos observados no peso seco das folhas, mas, em condições de déficit combinado, as plantas que receberam uma dose de 1 μ M de OMP apresentaram um peso significativamente superior em relação aos restantes tratamentos, representando um aumento de 33% comparativamente à concentração de 0 μ M de OMP (Figura 9C). No peso seco das raízes (Figura 9D) não foram observadas diferenças significativas em plantas controlos ($p=0,193$) mas em plantas em condições de déficit combinado observaram-se efeitos significativos ($p=0,015$), no qual, a dose de 1 μ M de OMP foi estatisticamente superior, com aumentos de 36 e 42% em relação às doses de 5 e 10 μ M de OMP, respetivamente (Figura 9D). Em estudo anterior também foram observados efeitos significativos do OMP (10 μ M) no peso seco vegetal de plantas de manjerição sob stress salino (Carillo *et al.*, 2019c). O aumento do peso seco total

ocasionado pela dose de 1 μM de OMP, apesar de não ser significativo em relação ao tratamento sem OMP, denota efeitos positivos da aplicação de OMP na tolerância ao déficit combinado de água e azoto, pois, segundo Machado *et al.* (2022) em condições de baixa disponibilidade de água o peso seco da planta sofre uma redução significativa, e o OMP parece de alguma forma mimetizar esse efeito. De facto, resultados de trabalhos anteriores também sugerem um aumento do crescimento da planta, sob condições de stresses abióticos, com a aplicação de OMP (Rouphael *et al.*, 2018; Van Oosten *et al.*, 2017). No milho, em condições de stress de azoto, a aplicação de 1 μM de OMP também se apresentou como sendo ótima no melhoramento do crescimento da planta (Van Oosten *et al.*, 2019), com aumentos de 61 e 68% nos parâmetros biomassa da parte aérea e da raiz, respetivamente. O efeito antagónico provocado pela dose de 10 μM OMP corrobora com um estudo anterior realizado por Van Oosten *et al.* (2017) onde foi observado que doses altas não tiveram efeito estimulativo (10 μM) e, acima de 10 μM conduziram a reduções de 32% da massa seca.

A comparação entre doses iguais em condições diferentes de crescimento das plantas (com e sem déficit combinado), mostrou que, de forma geral, os tratamentos controlos são estatisticamente superiores aos tratamentos com déficit combinado, com exceção da dose de 1 μM de OMP onde esta diferença foi observada apenas no variável peso seco das folhas.



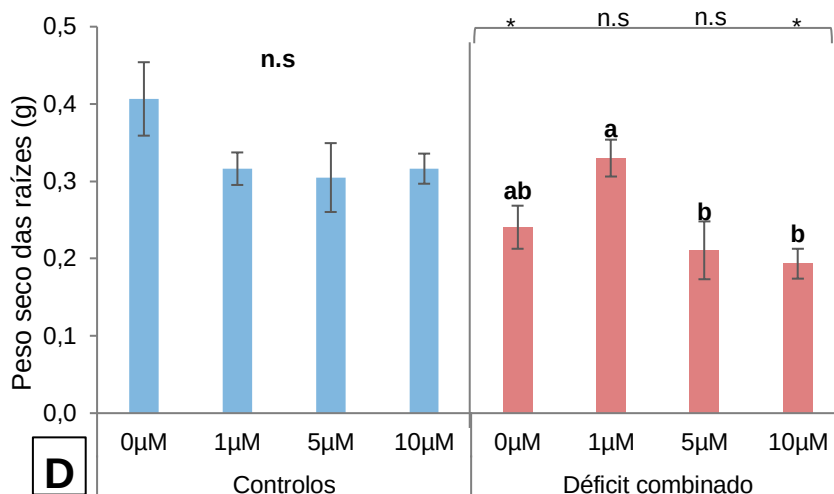


Figura 5. Peso seco total (A), peso seco das folhas (A), caule (B) e raiz (C), em gramas, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.1.2. Altura da planta

Neste estudo, o efeito do OMP na altura das plantas é diferente quando se trata de planta com e sem déficit (Figura 5). Nos tratamentos sem déficit (controlo) não foram verificados efeitos significativos do OMP ($p=0,458$), o que sugere a falta do seu efeito em plantas de tomate que cresçam em condições ótimas. A falta de efeitos significativos em condições ótimas de crescimento também foi observada num estudo onde se avaliaram as alterações morfológicas, fisiológicas e metabólicas que ocorrem no tomate de estufa, em condições controlo e sob stress salino (1mM NaCl), tratado com 10 e 100 μM de OMP (Rouphael *et al.*, 2018). Já nos tratamentos com déficit combinado de água e azoto o OMP teve efeitos significativos ($p=0,001$). A dose de 1 μM de OMP apresentou uma altura da planta significativamente superior em comparação com o tratamento sem OMP (18%) e as demais doses aplicadas (24 e 29% em relação a dose de 5 e 10 μM, respetivamente) (Figura 5). O efeito do OMP na altura de plantas crescidas em condições de déficit de água também foi observado por Elansary *et al.* (2019), em plantas de hortelã pimenta, onde as doses mais altas de OMP (100 e 200 μM), proporcionaram maior altura nas plantas crescidas com 50% de capacidade de campo. Porém, Van Oosten *et al.* (2017), ao estudar o efeito do OMP em plantas de tomate sob stress salino, constatou que doses baixas, 1μM, proporcionou aumentos significativos no crescimento, enquanto que doses de 10μM não apresentaram efeitos benéficos,

sendo que doses de 45 μ M originaram mesmo efeitos inibitórios ao crescimento, o que corrobora os resultados obtidos no presente estudo.

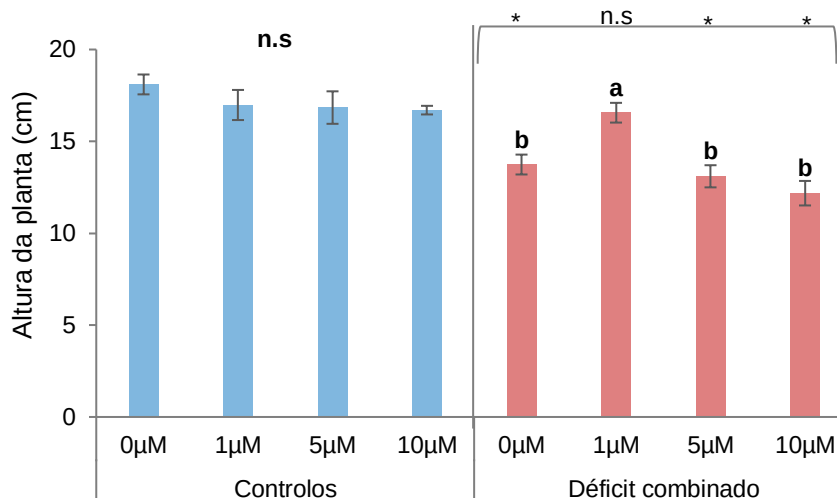


Figura 6. Altura da planta em centímetros, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μ M) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

Segundo Ullah *et al.* (2021), a altura das plantas de tomate diminuíram significativamente com a diminuição da quantidade de água e de azoto aplicado. Do mesmo modo, no presente estudo, a comparação direta entre tratamentos com a mesma dose de OMP mostrou que a altura da planta, nas duas condições de crescimento (com e sem déficit), é, de forma geral, estatisticamente superior nos tratamentos sem déficit, com exceção da dose de 1 μ M de OMP que não diferiu estatisticamente nas duas condições de crescimento a que as plantas foram submetidas (Figura 5). As diferenças significativas observadas entre doses iguais de OMP, nas duas condições de crescimento, foram de aproximadamente 22, 24 e 29% nas doses 0, 5 e 10 μ M, respetivamente. Esses resultados estão de acordo com Hou *et al.* (2016) que, também constatou um aumento significativo da altura da planta com o aumento da quantidade de água, em diferentes estágios de crescimento do tomate.

4.1.3. Comprimento das raízes

No presente estudo o comprimento da raiz não variou em função das doses de OMP aplicadas nas duas condições de crescimento a que as plantas foram submetidas (com e sem déficit combinado de água e azoto), pois, estatisticamente não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos das plantas controlos ($p=0,458$) e os das

plantas com déficit combinado ($p=0,511$) (Figura 6). A falta de efeitos significativos em plantas em situação controlo também foi observado em um estudo realizado por (Van Oosten *et al.*, 2017), no qual se analisou o efeito de diferentes doses de OMP (1, 10 e 45 μM) em plantas de tomate em situação de stress salino.

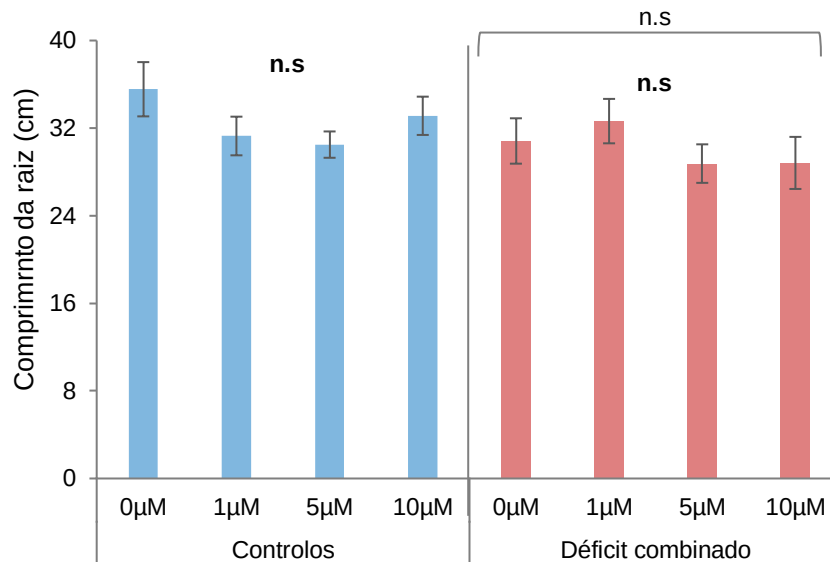


Figura 7. Comprimento da raiz em centímetros, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

Em condições em que as plantas não estiveram expostas a déficits as doses de 1, 5 e 10 μM de OMP, apesar de não terem causado diferenças estatisticamente significativas, levaram tendencialmente a uma redução do comprimento das raízes na ordem dos 14, 17 e 8%, respetivamente. (Figura 6). No estudo realizado por Van Oosten *et al.* (2017), a dose de até 45 μM de OMP inibiu severamente o crescimento das raízes, com uma redução de 53%, revelando que concentrações elevadas de OMP podem ter um efeito inibitório neste parâmetro. A análise direta entre doses iguais nas diferentes condições de crescimento (com e sem stress) também não apresentou diferenças significativas.

4.1.4. Número de folhas

As folhas são a unidade que constitui a arquitetura vegetal envolvida na fotossíntese, crescimento e rendimento de uma planta. A sua quantidade por planta é considerada como um dos traços fisiológicos e morfológicos essencial para diversos estudos (Vishal *et al.*, 2020). No presente trabalho foram observadas diferenças significativas tanto nos

tratamentos controlos ($p=0,008$), como nos tratamentos com déficit combinado ($p=0,027$).

Entre as plantas controlos (sem déficit) não foram observadas diferenças significativas entre as doses de 0 e 5 μM de OMP e, as plantas crescidas com 1 e 10 μM de OMP apresentaram uma redução do número de folhas em cerca de 13% em relação ao controlo (Figura 7). Por outro lado, em condições de déficit combinado não foram observadas diferenças significativas entre as doses de 0, 1 e 10 μM de OMP, entretanto, a dose de 1 μM de OMP apresentou um aumento significativo do número de folhas na dos 20% em relação à dose de 5 μM de OMP. Estes resultados corroboram com os obtidos por Rouphael *et al.* (2018) que observou uma redução dos impactos negativos do stress salino no número de folhas por plantas com a aplicação de OMP. Respostas do aumento do número de folhas à aplicação de OMP também foram observadas por Carillo *et al.* (2019b), num estudo com a cultura da alface em condições de stress salino.

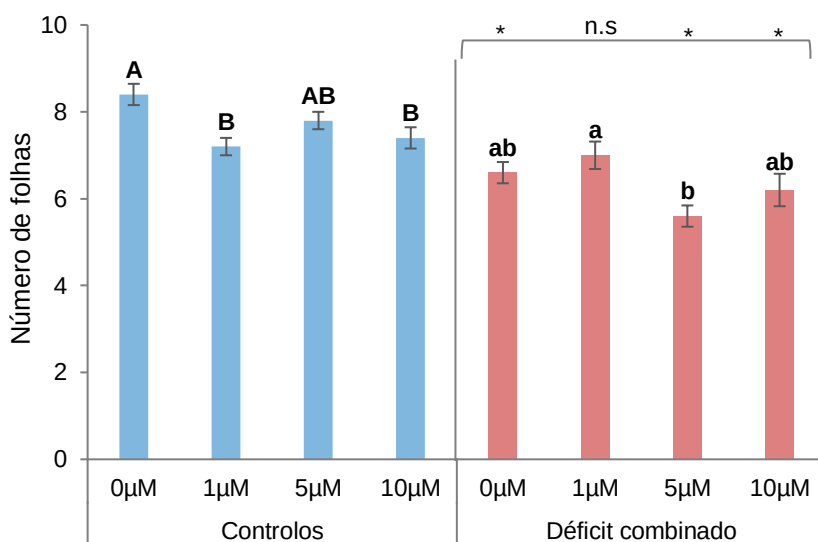


Figura 8. Número de folha por planta, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

A comparação entre as mesmas doses nas diferentes condições de crescimento mostrou diferenças significativas entre os tratamentos com e sem déficit, com exceção da dose de 1 μM de OMP que não diferiu nas duas condições de crescimento (Figura 7). As plantas em situação controlo apresentaram o maior número de folhas e, entre aquelas sem OMP foi registado uma redução significativa de aproximadamente 22%, nas plantas em situação de déficit combinado. Entre as plantas com 5 e 10 μM de OMP

as reduções foram de 28 e 16%, respetivamente. As reduções observadas podem ser devido à baixa quantidade de água nos tratamentos com déficit combinado, pois, resultados semelhantes foram observados por Medyouni *et al.* (2021) que, constataram uma redução do número de folhas na ordem de 9% em plantas sob stress hídrico, em relação às controlo.

4.1.5. Área foliar

Ao contrário dos resultados observados no número de folhas, as doses de OMP não apresentaram diferenças significativas na área foliar nos tratamentos controlo ($p=0,054$). Entretanto, diferenças significativas foram observadas nos tratamentos com déficit combinado ($p<0,001$), onde a dose 1 μM de OMP não teve um efeito significativo neste parâmetro, mas doses superiores resultaram num impacto significativamente negativo na área foliar (Figura 8). Elansary *et al.* (2019), não observaram efeitos do OMP na área foliar com a aplicação de 10 μM de OMP, em plantas de hortelã-pimenta crescidas com e sem déficit hídrico, porém, constataram aumentos significativos com a aplicação de 50 e 100 μM de OMP. No presente estudo, nas plantas com déficit combinado a dose de 5 μM de OMP apresentou uma redução de aproximadamente 37 e 40% e a de 10 μM de OMP reduziu em 30 e 33%, em relação às doses de 0 e 1 μM de OMP, respetivamente. O OMP apresentou efeitos significativos superiores nos tratamentos sem déficit quando se comparou as mesmas doses nas diferentes condições de crescimento, com exceção da dose de 1 μM que não apresentou diferenças significativas entre as duas condições de crescimento (com e sem déficit). Cirillo *et al.* (2019), verificaram efeitos antagónicos do OMP (1 μM) em genótipos de manjerição crescidos em condições de stress salino, tendo a dose 1 μM de OMP reduzido a área foliar em cerca de 16% em plantas submetidas ao stress salino em comparação com controlos não stressados.

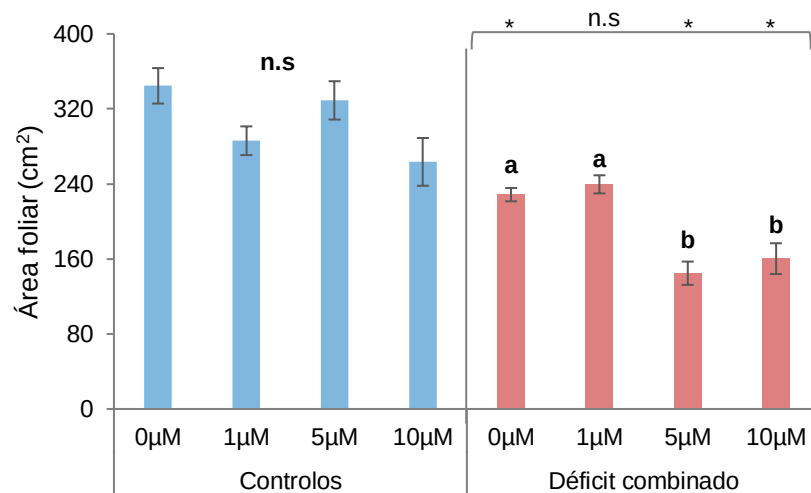


Figura 9. Área foliar em centímetros quadrado, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 µM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.1.6. Razão parte aérea/raiz

A razão parte aérea/raiz não foi significativamente influenciada pela aplicação de OMP nas duas condições de crescimento, controlo ($p=0,321$) e com déficit combinado ($p=0,671$). Nesta mesma variável a comparação de doses iguais em condições de crescimento diferentes, mostrou que as doses de 1 e 5 µM de OMP apresentam efeitos significativamente inferiores nos tratamentos com déficit combinado remetendo para um maior crescimento do sistema radicular comparativamente à parte aérea (Figura 10).

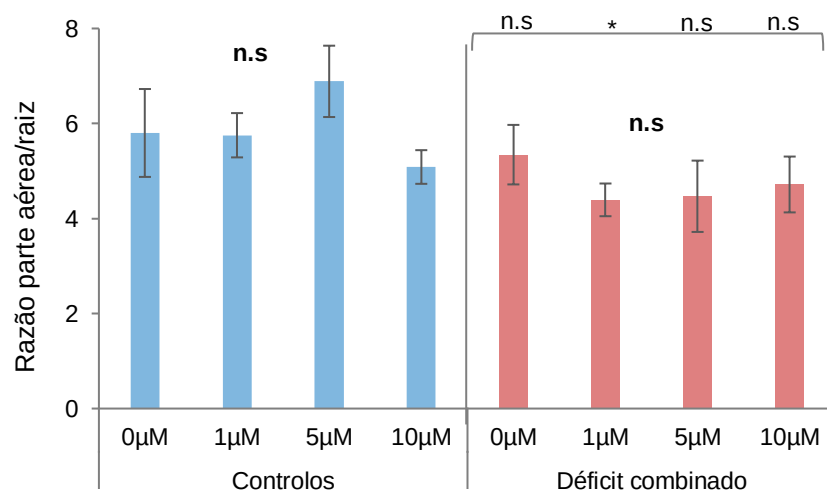


Figura 10. Razão parte aérea/raiz em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 µM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.1.7. Área foliar específica

A área foliar específica é uma variável de grande importância devido à sua influência sobre a eficiência de assimilação da radiação fotossintética ativa, e por estar intimamente associada à concentração de azoto nas folhas e taxa de crescimento relativo (He *et al.*, 2018; Perez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Neste estudo, a aplicação de OMP não teve efeitos significativos na área foliar específica em condições de déficit combinado ($p=0,075$), nem em condições controlo ($p=0,452$). A comparação entre doses iguais mostrou que plantas expostas a deficit combinado (quando comparadas com plantas controlo) apresentam maior área foliar específica (menor espessura) quando não se aplicou OMP e quando se aplicou 10 μM de OMP (Figura 11).

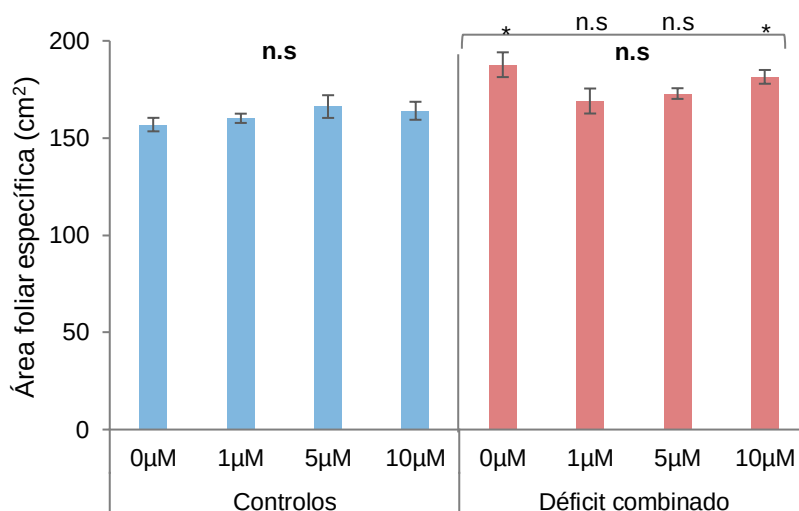


Figura 11. Área foliar específica, em centímetros quadrado por grama, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.1.8. Índice SPAD

O índice SPAD é um indicador do teor de clorofila foliar, estando estreitamente correlacionado com a taxa fotossintética da planta, podendo ser utilizado para estimar a capacidade fotossintética das folhas (Janušauskaitė *et al.*, 2014). No presente estudo, o OMP não teve efeitos sobre o teor de clorofila foliar (Índice SPAD) em plantas controlo ($p=0,235$), porém, em condições de déficit foi possível observar efeitos desse elicitor ($p=0,008$) (Figura 12). Nessas condições a dose de 1 μM de OMP aumentou significativamente o índice SPAD em cerca de 12,3 e 11,2%, em relação as doses de 5 e 10 μM de OMP, respetivamente. Esses resultados sugerem que o aumento da dose

não é a melhor estratégia para a otimização da aplicação desse elicitor nas condições estudadas. Tal como já mencionado, em estudos anteriores foi demonstrado que doses altas inibem o efeito do OMP e quando muito, causam efeitos contrários aos esperados (Van Oosten *et al.*, 2019). Noutro estudo foi demonstrado redução do teor de clorofila em condições de deficiência de azoto, pois as clorofilas são compostas por azoto e podem ser destruídas para a sua remobilização (Mu *et al.*, 2021; Perchlik *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018a). A dose de 1 μM de OMP não apresentou resultados estatisticamente diferentes na comparação entre doses iguais em condições de crescimento diferentes, sugerindo um potencial positivo da aplicação dessa dose em condições de déficit combinado.

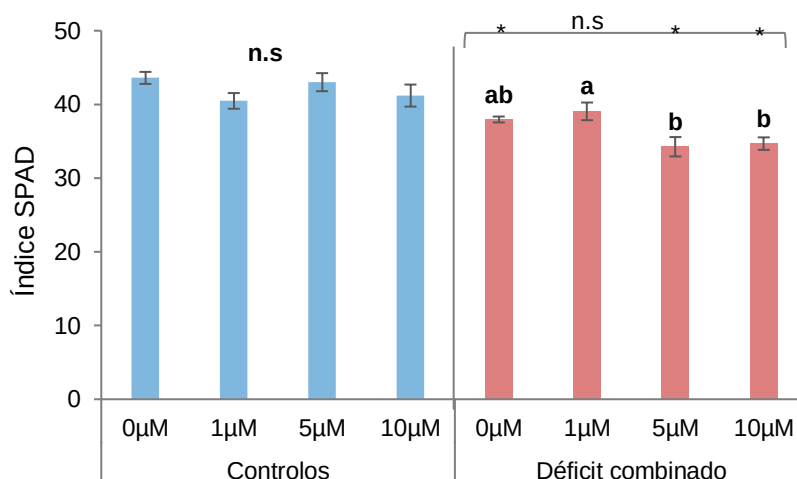


Figura 12. Índice SPAD, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.1.9. Eficiência do uso da água

A eficiência do uso da água é um parâmetro fisiológico que está relacionado com a quantidade de carbono assimilado para a produção de biomassa ou grão por unidade de água utilizada pela cultura (Hatfield *et al.*, 2019). Por esta razão, este parâmetro permite estimar a quantidade de água usada no metabolismo da planta e a quantidade perdida pela transpiração da mesma (Zahoor *et al.*, 2019). Neste ensaio não foi possível demonstrar o potencial do OMP como elicitor capaz de melhorar a eficiência do uso da água, pois, não foram observados efeitos significativos da utilização do OMP tanto nos tratamentos controlos ($p=0,744$), como nos tratamentos com déficit combinado ($p=0,454$) (Figura 13). Apesar do déficit hídrico ser apontado como estratégia para aumentar a eficiência do uso da água (Liu *et al.*, 2019a), na comparação entre doses

iguais também não foram observadas diferenças significativas, talvez porque o ensaio durou mais do que 10 dias, pois Sousa (2019), no estudo sobre o efeitos de stress combinado de água e azoto em tomate encontrou diferenças entre plantas controlos e plantas com déficit combinado de água e azoto (maior eficiência) aos 10 dias e aos 16 não houve diferenças.

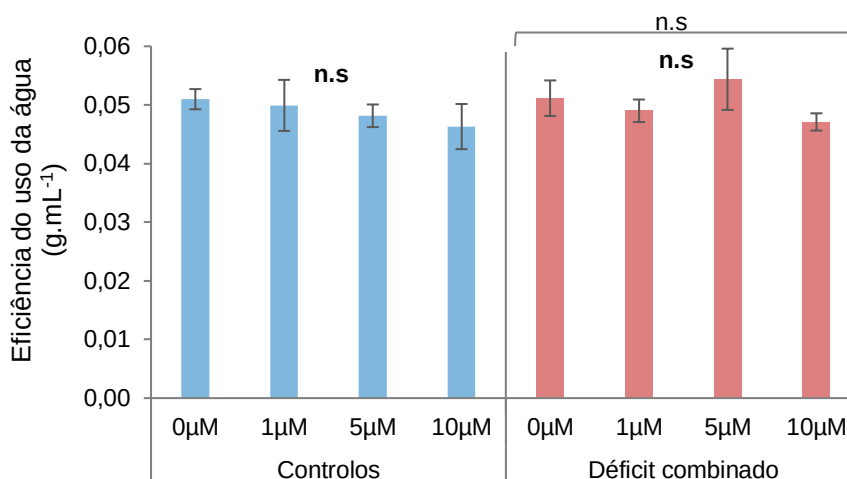


Figura 13. Eficiência do uso da água, em gramas por mililitro, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.1.10. Consumo de água por área foliar

À semelhança do observado no parâmetro eficiência do uso da água, no consumo de água por área foliar não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos controlos ($p=0,640$) e nem entre os com déficit combinados ($p=0,251$) (Figura 14). A comparação entre doses iguais nas duas condições de crescimento (com e sem déficit combinado) não resultou em diferenças significativas. Duas razões podem estar na origem desses resultado, a primeira pode ser a duração do ensaio que foi maior do que 10 dias, pois (Sousa, 2019) ao estudar o efeitos de stress combinado de água e azoto, apenas observou apenas efeitos significativos, entre plantas controlos e com stress combinado, na avaliação realizada aos 10 após o transplante.

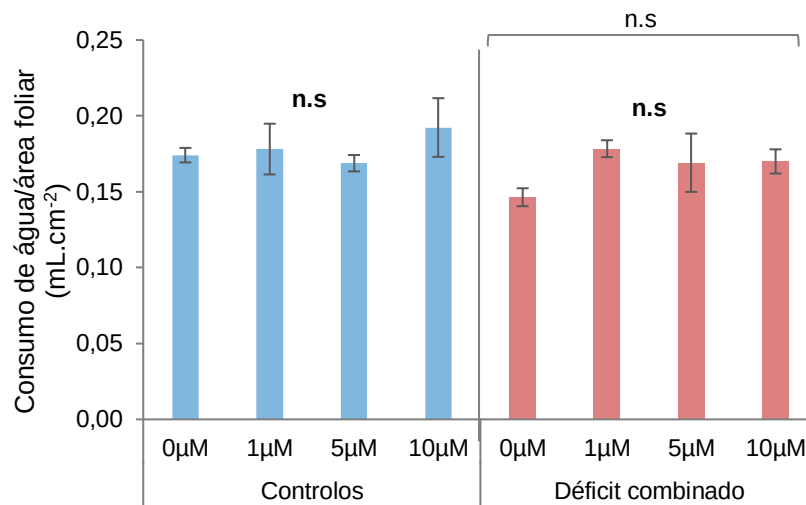


Figura 14. Consumo de água/área foliar, mililitros por centímetro quadrado, em função de diferentes doses de OMP (0, 1, 5 e 10 μM) aplicados nos tratamentos controlos (100% de N e 100% de Capacidade de Campo) e com déficit combinado de água e azoto (50% de N e 50% de Capacidade de Campo). Os valores indicados correspondem à média de 5 réplicas e as barras ao erro padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos e n.s e * indicam ausência e presença de diferenças significativas, respetivamente, a $p \leq 0,05$. A análise estatística dos dois tratamentos foi feita de maneira independente.

4.2. Ensaio 2: Efeito do omeprazol no crescimento, desenvolvimento, produtividade e qualidade do fruto do tomate submetido ao déficit de água, de azoto e ao déficit combinado de água e azoto

4.2.1. Data de floração, frutificação e maturação

O déficit hídrico ou déficit de irrigação é uma estratégia que tem sido usada para maximizar a eficiência do uso da água que, apesar de não melhorar o crescimento e o rendimento, modifica os processos fisiológicos das plantas, entre os quais o aumento da economia da água, melhoria da qualidade dos frutos, redução dos custos de produção (Khapte *et al.*, 2019) e altera as fases fenológicas, envolvendo processos ou estratégias que possam acelerar a reprodução para a tolerância a stresses exógenos (Ayenan *et al.*, 2019; Cappetta *et al.*, 2020). No presente estudo, na data de floração, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos e o OMP não teve efeitos positivos em nenhuma das condições de crescimento estudadas (Figura 15). Em situação controlo com OMP e em situação de déficit de azoto, com e sem OMP, a frutificação da planta ocorreu significativamente 11, 10 e 12 dias, respetivamente, mais cedo do que em plantas com déficit combinado com OMP. O OMP também acelerou 9 dias a data de frutificação de plantas em condições de déficit de azoto em relação a plantas sob déficit combinado sem OMP (Figura 15). Em relação à data de maturação, plantas em condições de déficit de água sem OMP apresentaram maturação

significativamente atrasada, em relação aos demais tratamentos, porém, a aplicação de OMP reduziu essa data em cerca de 6 dias. Em condições de déficit de azoto sem OMP, a maturação ocorreu mais cedo em relação a plantas controlos sem OMP (5 dias), com déficit de água com e sem OMP e com déficit combinado sem OMP (6 dias em cada caso) (Figura 15).

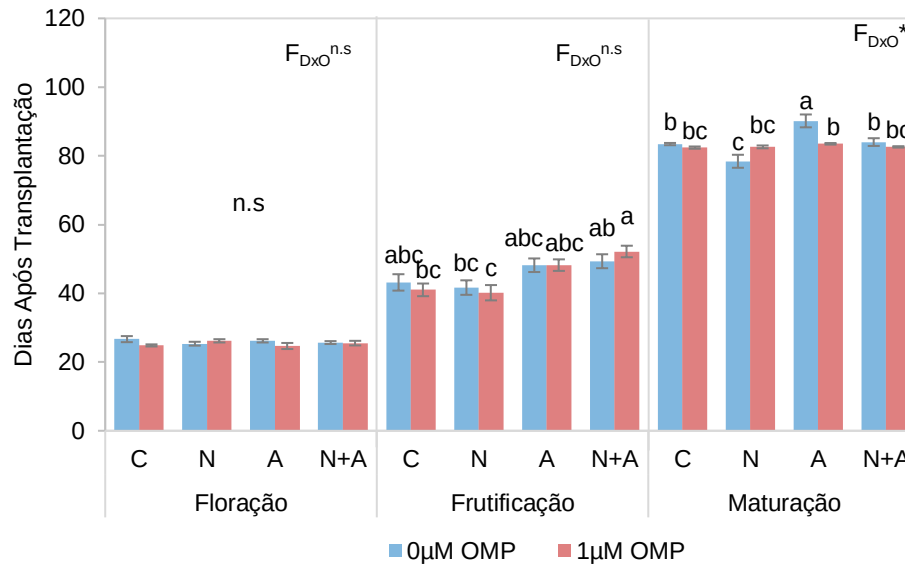


Figura 15. Data de floração, frutificação e maturação em dias após transplantação, em função das doses de OMP (0 e 1 µM) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.2. Peso seco total e peso seco dos órgãos

Na Figura 20A são observados os valores referentes o peso seco total da planta, na qual os tratamentos com déficit de água e combinado foram significativamente inferiores em relação aos demais tratamentos aplicados, sugerindo que o déficit hídrico contribui mais para o déficit combinado. De acordo com Wang *et al.* (2019), reduções significativas da água no solo causaram diminuição do peso seco das plantas, dentre elas o tomate. Isto pode ocorrer porque a deficiência de água afeta a transpiração e consequentemente limita a absorção da água e nutrientes essenciais para o crescimento da planta (Zhang *et al.*, 2017). Num estudo anterior o déficit hídrico diminuiu o peso seco do tomate em relação às plantas de controlo (Medyouni *et al.*, 2021), o que corrobora com os dados do presente estudo. Apesar de vários trabalhos terem sugerido um melhoramento na biomassa de plantas de tomate sob stress salino, o efeito estimulador esperado do OMP não foi evidenciado no presente estudo, provavelmente por diferenças na duração do ensaio e tipo de stress aplicado ou ainda, no caso das

plantas com déficits de água e déficit combinado de água e azoto, devido ao facto de terem sido atacados com maior incidência por oídio. No entanto e apesar de que na ausência de OMP o peso seco total das plantas em déficit de azoto ter sido significativamente inferior (± 21 e 31%) em comparação às plantas controlos, a aplicação de OMP minimizou o efeito do déficit de azoto ao ocasionar peso seco total estatisticamente igual em relação ao controlo sem OMP. Em termos de efeitos percentuais do OMP, foram observados aumentos de ± 13 , 12, 25 e 32%, nos tratamentos controlo, com déficit de azoto, déficit de água e déficit combinado, respetivamente.

Quanto ao peso seco dos frutos (Figura 20B), em condições de déficit de água e déficit combinado, com e sem OMP, a massa dos frutos foi mais uma vez mais estatisticamente inferior (± 80 a 88%) em relação às obtidas em outras condições estudadas. Num estudo realizado por Wang *et al.* (2019), o déficit de água e o déficit combinado de água e azoto reduziram significativamente o peso seco dos frutos de tomate devido a menor absorção de azoto que se verificou nessas condições o que possivelmente afetou a fotossíntese e, em consequência, a produção de biomassa. Segundo Chen *et al.* (2015) e Klunklin *et al.* (2017) os efeitos do déficit hídrico podem ser diferentes dependendo da sua intensidade e do estágio de desenvolvimento do fruto quando o mesmo é aplicado. Quando o déficit ocorre na fase de floração pode provocar efeitos mais graves pelo facto deste afetar negativamente a abscisão dos órgãos florais que, em consequência causam menor número e tamanho dos frutos e certamente menor peso seco (Fernandes *et al.*, 2022). Nas plantas controlos o OMP aumentou significativamente o peso seco dos frutos em relação aos tratamentos com déficit de azoto com e sem OMP. Em todas as condições de crescimento o OMP promoveu aumentos não significativos do peso seco dos frutos na ordem de $\pm 18\%$ (nos controlos), $\pm 14\%$ (em déficit de azoto), ± 15 (em déficit de água) e $\pm 28\%$ (em déficit combinado). Em relação ao peso seco dos pedúnculos (Figura 20C), os tratamentos com déficit de água e déficit combinado foram iguais entre si, e significativamente inferiores (± 87 a 89%) em relação aos tratamentos controlos e com déficit de azoto que, por sua vez não diferiram entre si. A aplicação de OMP promoveu aumentos não significativos de ± 16 , 50 e 41% nos tratamentos com déficit de azoto, de água e com déficit combinado, respetivamente.

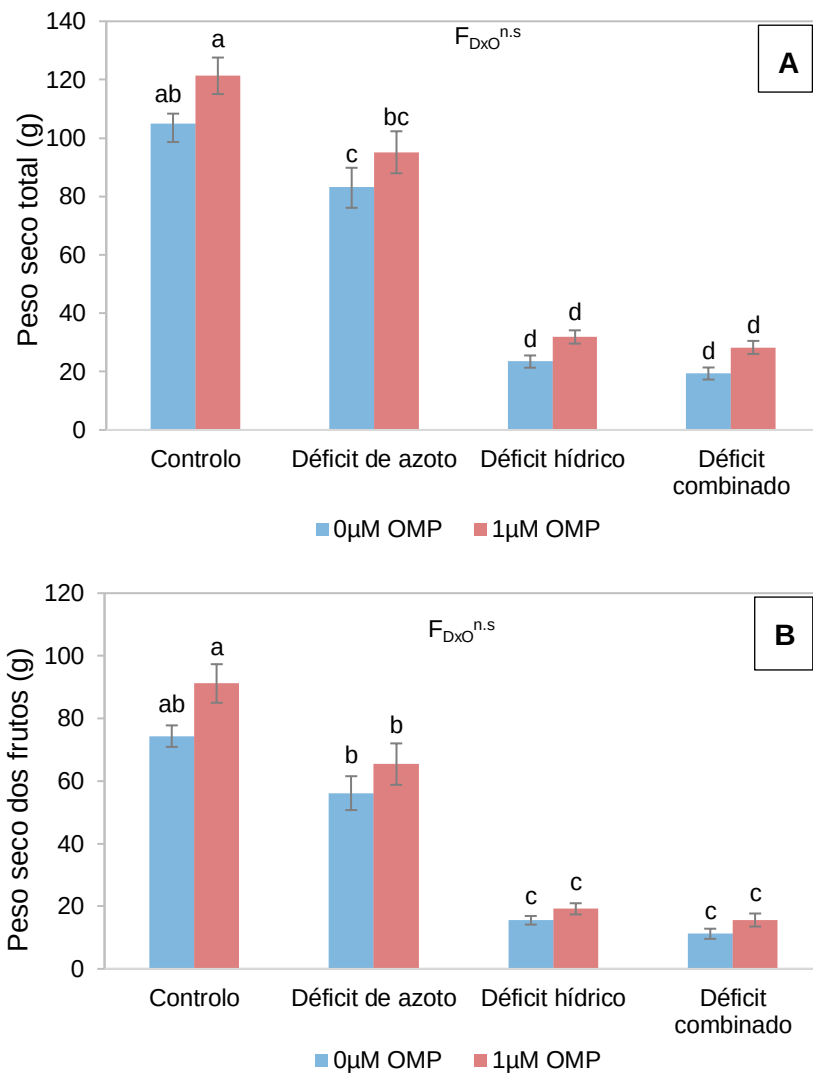
O peso seco das folhas (Figura 20D) apresentou resultados ligeiramente diferentes dos apresentados anteriormente, pois, houve uma redução significativa de 21% em plantas sob déficit de azoto comparativamente às mantidas em condições controlo, ambas sem OMP. Esta redução do peso seco das folhas de plantas com déficit de azoto corrobora

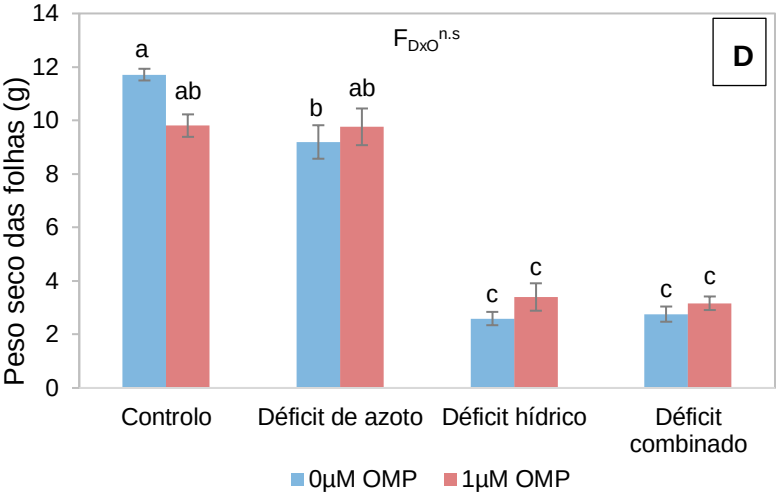
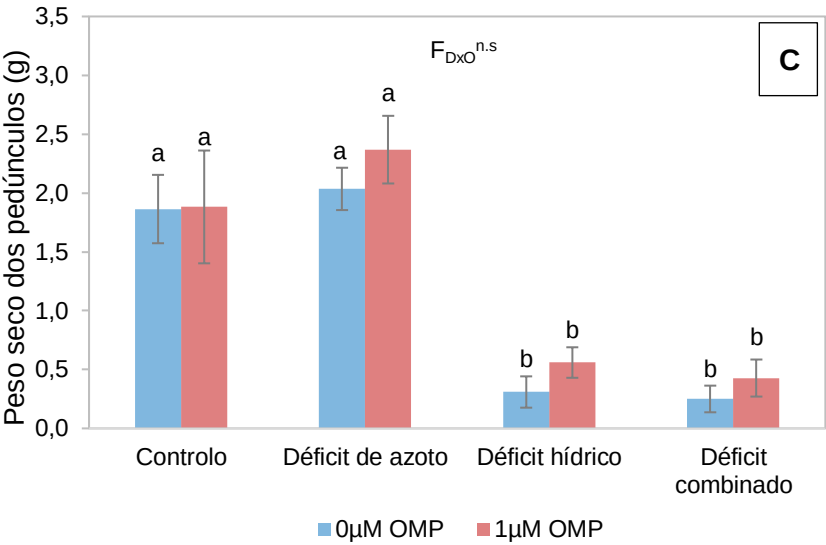
com resultados obtidos em estudos anteriores (Sestili *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019), pois o azoto é um constituinte da clorofila e quando a deficiência desse elemento ocorre, o teor de clorofila e a taxa de assimilação de CO₂ diminuem significativamente, causando redução da área foliar e da taxa fotossintética e consequentemente uma menor produção de biomassa (Scholberg *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2022). O peso seco das folhas das plantas crescidas em condições de déficit de água e déficit combinado, com e sem OMP, foram estatisticamente inferiores (± 72 a 78%) em comparação com as plantas crescidas noutras condições estudadas. Num outro estudo, a aplicação de 55% de déficit de água também ocasionou menor peso seco em relação ao controlo (Fawzy, 2019). No estudo onde se analisou o efeito da humidade do solo no transporte de água, ganho de carbono fotossintético e eficiência do uso da água no tomate em função da demanda evaporativa, o déficit hídrico proporcionou menor peso seco das folhas em comparação com o controlo (Li *et al.*, 2019a), corroborando com os resultados do presente estudo. A presença de OMP em plantas sob déficit de azoto proporcionou aumento não significativo do peso seco das folhas, mas que ocasionou igualdade estatística em comparação com as plantas controlos. Nas plantas controlos o OMP reduziu $\pm 12\%$ o peso seco das folhas, entretanto, em condições de déficit de azoto, de água e combinado, o OMP aumentou ± 6 , 23 e 12%, respetivamente.

No que diz respeito o peso seco do caule (Figura 20E), os resultados assemelham-se aos observados no peso seco dos cachos, onde todos os tratamentos com déficit de água e déficit combinado foram iguais entre si, tendo sido significativamente inferiores (± 71 a 75%) em relação aos tratamentos controlos e com déficit de azoto que, por sua vez não diferiram entre si. Neste parâmetro o OMP também promoveu aumentos de 43 e 44% em condições de déficit de água e déficit combinado, respetivamente.

Quanto ao peso seco da raiz (Figura 20F), nenhuma diferença significativa foi observada entre os tratamentos controlos e os tratamentos com déficit de azoto, porém, estes foram significativamente superiores em relação aos tratamentos com déficit de água (com e sem OMP) (± 68 a 72%) e ao déficit combinado sem OMP (± 47 e 54% em relação aos controlos e ao déficit de azoto, respetivamente). Num estudo com a cultura de tomate, a deficiência de água também ocasionou redução significativa do peso seco da raiz (Khoshmanzar *et al.*, 2020). Resultados diferentes foram obtidos por Wang *et al.* (2019), num estudo onde os tratamentos com déficit de azoto diferiram significativamente dos tratamentos controlos. Nos tratamentos com déficit combinado, o OMP minimizou o impacto do déficit ao promover aumentos que resultaram em igualdade estatística em relação aos controlos e superioridade ($\pm 62\%$) em reação ao

tratamento com déficit de água sem OMP. O aumento do peso seco da raiz por ação do OMP já tinha sido relatado em estudos anteriores na cultura do milho em situação de déficit de azoto (Van Oosten *et al.*, 2019) e na cultura de tomate sem condições de déficit salino (Rouphael *et al.*, 2018). À semelhança do peso seco total, o OMP promoveu aumentos, apesar de não significativos, do peso seco raiz em todas as condições de crescimento, na ordem de ± 42 e 37% em condições de déficit de água e déficit combinado, respetivamente.





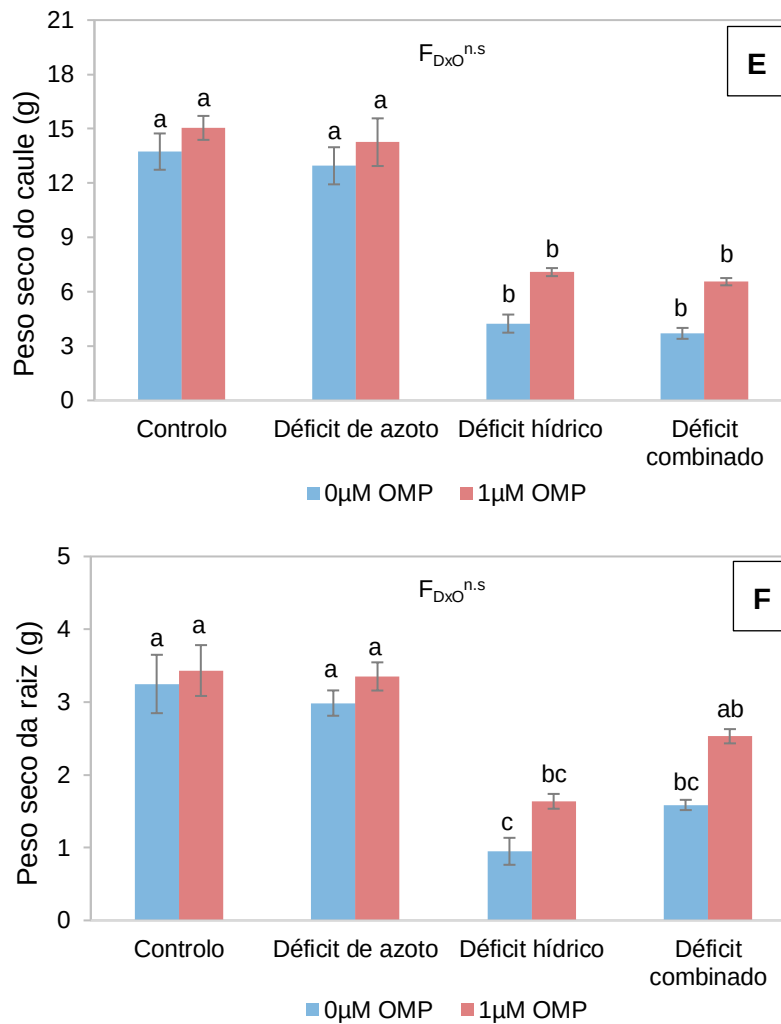


Figura 16. Peso seco total (A), Peso seco dos frutos (B), peso seco dos pedúnculos (C), peso seco das folhas (D), peso seco do caule (E) e peso seco da raiz (F), em gramas, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}* e F_{DxO}^{n.s} indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a p ≤ 0,05.

4.2.3. Altura da planta e diâmetro do caule

Na Figura 16A podem ser observados os dados referentes à altura da planta nos diferentes estágios de desenvolvimento (floração, frutificação e maturação). No primeiro estágio foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que, os tratamentos sem limitação de água (controlo e déficit de azoto), na presença e ausência de OMP, não diferiram entre si, mas foram significativamente superiores em relação a plantas com déficit de água. Entre as plantas com déficit combinado de água e azoto, a aplicação de OMP proporcionou um aumento significativo na altura das plantas ($\pm 20\%$). Comportamento semelhante foi observado no estágio de frutificação, porém, nesta fase, o OMP, em plantas em condições de déficit combinado, levou a uma altura da planta

estatisticamente igual à das plantas controlos e com déficit de azoto. No estágio de maturação, o OMP não teve efeitos significativos na altura da planta e, plantas crescidas em situação controlo e com déficit de azoto apresentaram altura significativamente superior em relação às demais testadas neste estudo. Efeitos positivos do OMP na altura da planta submetidas a stresses exógenos foram apresentados em estudos anteriores (Cirillo *et al.*, 2019; Elansary *et al.*, 2019). A igualdade estatística observada entre as plantas com déficit de azoto e as controlos, corrobora com os dados descritos por Mwinuka *et al.* (2021), no seu estudo sobre otimização da aplicação de água e azoto para espécies hortícolas negligenciadas, como a beringela africana, em áreas climáticas tropicais sub-húmidas. Porém, não corrobora com os resultados de Ullah *et al.* (2021), que observou que uma redução de azoto reduziu significativamente a altura da planta de tomate em comparação com as plantas controlos. Num estudo anterior sobre crescimento, rendimento dos frutos e qualidade do tomate afetado pela irrigação deficitária regulada em base fenológica, as plantas que cresceram com déficit hídrico (60%) apresentaram menor altura em relação as plantas controlos (Nangare *et al.*, 2016), corroborando com os dados deste estudo. No estudo realizado por Wu *et al.* (2021), o fornecimento adequado de água (100%) melhorou a taxa máxima de crescimento da planta de tomate mas a aplicação de déficit hídrico, em todos os níveis de déficit aplicados (50 e 75% da ET_c), levaram a uma redução da altura da planta.

Quanto ao diâmetro do caule, os resultados apresentam-se semelhantes aos observados para a altura da planta (Figura 16B). Nesta variável, em todas as fases, os tratamentos com limitações de água (déficit de água e déficit combinado) não diferiram entre si, independentemente da aplicação do OMP, e foram estatisticamente inferiores em comparação aos demais tratamentos que, de forma geral, também não diferiram entre si, com exceção do estágio de floração onde a aplicação de OMP reduziu de forma significativa ($\pm 20\%$) o diâmetro do caule de plantas em condições de déficit de azoto em comparação com as controlos sem OMP. Num estudo anterior, o diâmetro do caule das plantas de tomate crescidas com déficit de água e déficit de azoto também foram inferiores em comparação às plantas controlos e às plantas com déficit individual de azoto (Ullah *et al.*, 2021). Nesse mesmo estudo, o déficit de azoto reduziu significativamente o diâmetro do caule, não corroborando com os dados aqui apresentados. Também não corrobora com os dados do presente estudo Cirillo *et al.* (2019), pois, no seu estudo com dois genótipos de manjerição submetidos ao stress salino, a aplicação de OMP aumentou significativamente o diâmetro do caule. Estes resultados disparem podem-se dever a vários fatores como a cultura utilizada, a

aplicação e concentração de OMP e a duração do estudo. De um modo geral, nestes parâmetros, as plantas de déficit combinado apresentaram uma resposta semelhante ao déficit hídrico remetendo para um déficit mais acentuado por parte do stress hídrico comparativamente ao déficit de azoto.

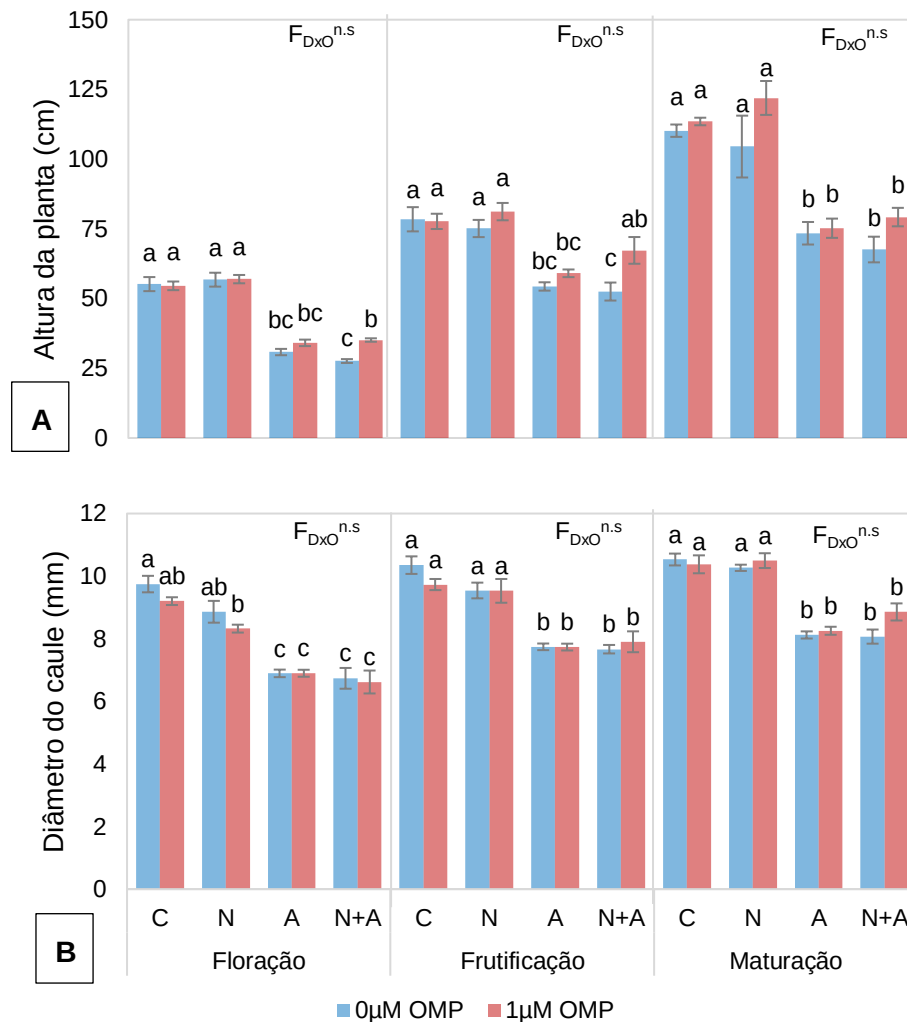


Figura 17. Altura da planta (A), em centímetros, e Diâmetro do caule (B), em milímetros, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc), durante o estágio de floração, frutificação e maturação do fruto. Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}* e F_{DxO}^{n.s} indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a p < 0,05.

4.2.4. Número de folhas

No presente estudo foram observados efeitos significativos entre os tratamentos no estágio de floração e maturação relativamente ao número de folhas (Figura 17). No primeiro estágio, o número de folhas das plantas controlo não diferiu estatisticamente das plantas em condições de déficit de azoto. Independentemente da aplicação do

OMP, as plantas em condições controlo e com déficit de azoto apresentaram número de folhas significativamente superior (30 a 34,2%) em relação às plantas em condições de déficit de água e déficit combinado que, não diferiram entre si (Figura 17). No estágio de frutificação, não foram observadas diferenças significativas no número de folhas. Entretanto, no estágio de maturação verificou-se comportamento semelhante aos observados na floração, porém, a aplicação de OMP minimizou o déficit de azoto, pois aumentou em $\pm 18\%$ o número de folhas das plantas, o que poderá ser traduzido num melhor desenvolvimento da mesma (Figura 17). Anteriormente, um estudo realizado por Fawzy (2019) concluiu que níveis baixos de disponibilização de água (55%) também apresentaram uma redução significativa do número de folhas por planta de tomate, indo de encontro ao presente estudo. Num outro estudo, onde se analisou o efeito do déficit hídrico nas folhas e qualidade do fruto durante o período de desenvolvimento da planta do tomate, a redução do fornecimento de água em 60% proporcionou declínio de 9% do número de folhas por planta (Medyouni *et al.*, 2021), valor abaixo dos obtidos no presente estudo (30 e 20% na floração e maturação, respetivamente). De forma geral, no momento da maturação, o OMP proporcionou ligeiros aumentos do número de folhas (± 7 a 18%) em todas as condições de crescimento, sendo elas significativas apenas na condição de stress de azoto. Em plantas de tomate, em condições de stress salino (75mM NaCl), a aplicação de OMP (10 μ M) também aumentou o número de folhas por planta (Rouphael *et al.*, 2018), corroborando com os resultados obtidos nos tratamentos com déficit de azoto, no estágio de maturação, do presente estudo.

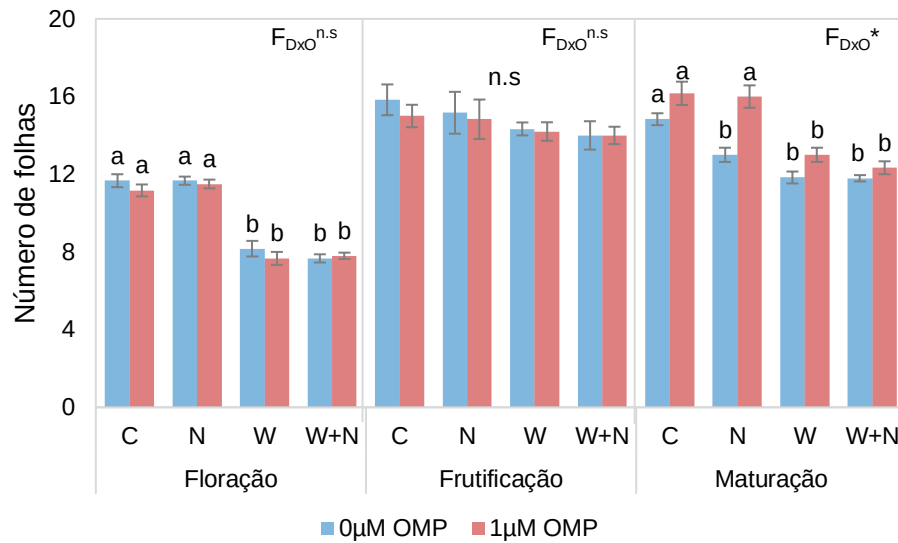


Figura 18. Número de folhas, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc), durante o estágio de floração, frutificação e maturação do fruto. Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{DxO}^{n.s.}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s. indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.5. Índice SPAD

O índice SPAD é um parâmetro fisiológico que tem sido frequentemente usado para estimar a quantidade relativa de clorofilas presente na folha e com isso estimar a quantidade de azoto (Dinh *et al.*, 2017). Os dados da Figura 18, referentes ao índice SPAD, mostram efeitos significativos dos tratamentos aplicados, nos distintos estágios de determinação (floração, frutificação e maturação). No estágio de floração, as plantas crescidas em condições de déficit de água e déficit combinado apresentaram, significativamente, maior índice SPAD (± 25 a 28%) em relação às demais condições de crescimento (controlo e déficit de azoto). O maior índice SPAD em plantas com déficit de água e déficit combinado, pode ser justificado pelo facto da planta, em situação de stress hídrico, fechar os seus estomas e, em consequência reduz o crescimento que, por sua vez, pode levar à redução do gasto do azoto (Kuromori *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019a). Num estudo com cana-de-açúcar, a redução da disponibilidade de água e a redução combinada de água e azoto, não reduziu significativamente o índice SPAD em relação às plantas controlos (Dinh *et al.*, 2017). Nesta mesma fase (floração), as plantas controlos (com e sem OMP), apresentaram índice SPAD maior em comparação com as plantas em condições de déficit de azoto sem OMP (± 14 com OMP e 18% sem OMP), que foi estatisticamente inferior (± 14 a 28%) em relação a todos dos tratamentos. A aplicação de OMP em plantas com déficit de azoto, minimizou o efeito do déficit ao

proporcionar valores que não diferiram estatisticamente dos obtidos em situação de controlo, com e sem OMP na mesma fase de floração. No estágio de frutificação, não foram observadas diferenças significativas entre plantas controlos e plantas com déficit de água e déficit combinado. O índice SPAD das plantas com déficit de azoto sem OMP foi estatisticamente inferior (± 15 a 25%) em comparação aos observados em plantas crescidas nas outras condições estudadas. No entanto, a aplicação de OMP (em plantas com déficit de azoto) minimizou o déficit, tendo ocasionado índices SPAD estatisticamente iguais aos do controlo sem OMP. No estágio de maturação as plantas com déficit de azoto sem OMP voltaram a apresentar valores estatisticamente inferiores (± 17 a 21%) aos demais tratamentos, exceto em relação às plantas com déficit combinado sem OMP. Num estudo sobre características físico-químicas e produtividade do tomateiro em função de fontes e doses de azoto, o déficit de azoto (100kg/ha) também afetou negativamente o índice SPAD (Assunção *et al.*, 2020). Neste estágio (maturação), novamente o OMP minimizou o déficit de azoto, tendo apresentado valores estatisticamente iguais aos dos tratamentos controlos, com e sem OMP. Num estudo anterior, também foram observados aumentos do índice SPAD com a aplicação de OMP ($1\text{ }\mu\text{M}$), em plantas de milho crescidas com baixo teor de azoto (Van Oosten *et al.*, 2019). No entanto, o OMP não teve efeitos significativos num estudo onde se analisou o seu efeito em plantas de manjerição submetidas a stress salino (Carillo *et al.*, 2019c). Mais uma vez, as plantas sob stress combinado de água e azoto apresentaram respostas semelhantes ao déficit individual de água, principalmente na floração, remetendo para uma maior severidade deste stress comparativamente ao stress de azoto.

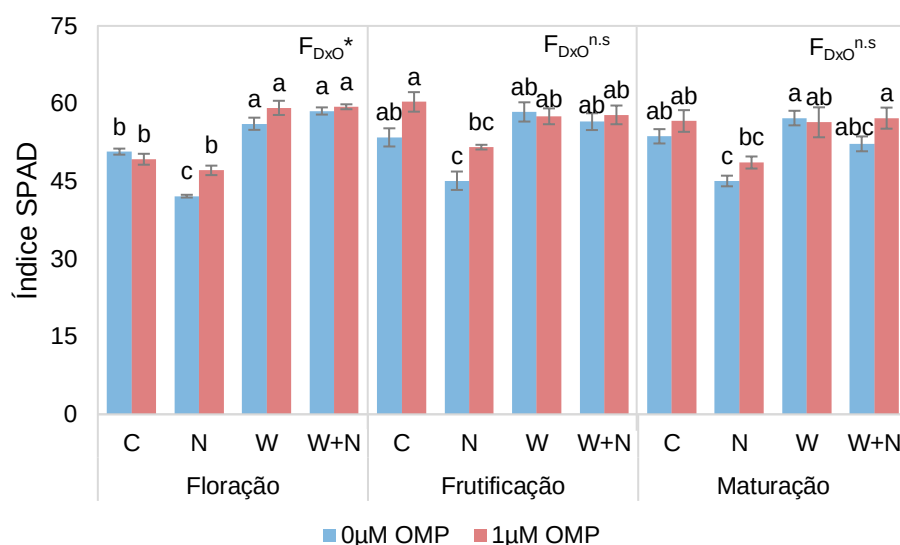


Figura 19. Índice SPAD, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos-C (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto-N (50%N e 100%ETc), déficit hídrico-A (100%N e 50%ETc) e déficit combinado-N+A (50%N e 50%ETc), durante o estágio de floração, frutificação e maturação do fruto. Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.6. Comprimento da raiz

As plantas sob déficit combinado tiveram menor comprimento de raiz em comparação às plantas crescidas nas distintas condições testadas que, por sua vez não diferiram entre si na ausência de OMP (Figura 19). Essa redução que se verificou em plantas com déficit combinado, pode ter sido ocasionada pelo facto de a planta estar a sofrer dois tipos de déficits simultâneos. Resultados semelhantes foram apresentados por Ullah *et al.* (2021), que observaram uma redução do comprimento da raiz em plantas com déficit simultâneo de água e de azoto. Na presença de OMP, o comprimento da raiz das plantas sob condições de déficit de azoto tendeu a aumentar $\pm 14\%$ em relação ao mesmo tratamento sem OMP e aumentou significativamente em comparação com plantas com déficit hídrico (± 26 e 38%) e combinado (± 42 e 52%), com e sem OMP. A aplicação de OMP minimizou o impacto do déficit combinado, pois com a sua aplicação, as plantas crescidas nessa condição não diferiram significativamente daquelas que cresceram em condições controlo sem OMP. Entretanto, em plantas em condições de déficit hídrico, o OMP reduziu significativamente o comprimento da raiz ($\pm 30\%$), em relação às plantas controlo com OMP (Figura 19). Apesar do OMP não ter proporcionado aumentos significativos entre as plantas com o mesmo tipo de déficit, aumentos percentuais na ordem dos ± 11 , 15 e 6% para condições controlo, déficit de azoto e déficit combinado, respetivamente, foram observados. O aumento do comprimento da raiz ocasionado pelo

OMP (10 μ M) foi relatado, em estudo anterior, na cultura do tomate em condições de stress salino (Maggio *et al.*, 2018; Rouphael *et al.*, 2018), não se tendo verificado no presente estudo talvez pela dose aplicada, cultivar utilizada ou pela altura da aplicação do OMP.

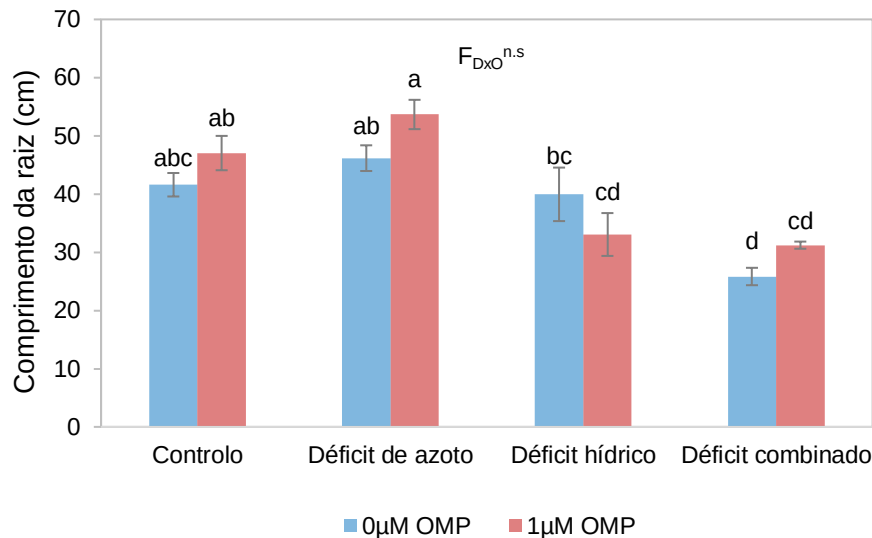


Figura 20. Comprimento da raiz, em centímetros, em função das doses de OMP (0 e 1 μ M) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.7. Produtividade

A produtividade do tomate em plantas controlos e com déficit de azoto foi significativamente influenciada pela presença de OMP, tendo aumentado a produtividade do tomate em relação aos tratamentos sem OMP nas mesmas condições por $\pm 19\%$ e $\pm 15\%$, respetivamente (Figura 21). Esse aumento pode ser reflexo do efeito desse elicitor nas variáveis estudadas como o número de folhas e o comprimento da raiz, pois, plantas com sistema radicular mais profundo e com maior número de folhas têm a vantagem de aumentar a absorção de nutrientes e a área fotossinteticamente ativa da planta e com isso apresentar maior crescimento em relação a outras plantas. A aplicação de OMP em plantas controlos promoveu uma produtividade significativamente maior em relação a todos os tratamentos estudados. Em condições de déficit salino (30mM NaCl) a aplicação de OMP (10 μ M) aumentou a biomassa fresca de alface, aumentando a sua produtividade (Carillo *et al.*, 2019b). Noutros estudos, novamente em condições de stress salino, o OMP (10 μ M) também proporcionou aumento da produtividade na cultura do manjerição (Carillo *et al.*, 2019c) e do tomate (Rouphael *et*

al., 2018). Apesar de ser em condições de crescimento diferente e, em alguns casos, culturas diferentes, este resultado sustenta o efeito positivo do OMP na produtividade da cultura, tal como foi apresentado no presente trabalho. A falta de OMP em plantas com déficit de azoto afetou significativamente a produtividade de tomate, sendo estatisticamente inferior em relação ao controlo sem OMP (Figura 21). Plantas com déficit de azoto também apresentaram redução de produtividade em relação aos controlos, num estudo realizado por Choi *et al.* (2022). A semelhança de muitas variáveis anteriores, os tratamentos com déficit de água e déficit combinado não diferiram entre si, mas foram estatisticamente inferiores em relação aos demais tratamentos. Este resultado corrobora com um estudo anterior que mostrou impacto negativo do déficit combinado de água e azoto na produtividade (Wang *et al.*, 2019). Por fim, o déficit de água e o déficit combinado de água e azoto também proporcionaram menor produtividade relativamente à situação controlo sem OMP que também foi verificado num estudo realizado por Ullah *et al.* (2021) na mesma cultura.

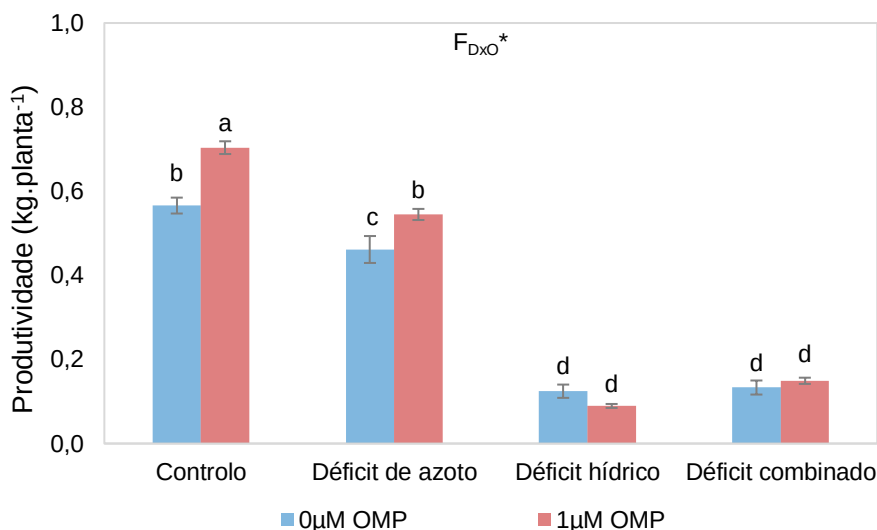


Figura 21. Produtividade, em quilogramas por planta, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. $F_{D \times O}^*$ e $F_{D \times O}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.8. Eficiência do uso da água

Na Figura 22 são apresentados os resultados referentes a eficiência do uso da água, no qual se pode observar maior eficiência do uso da água em plantas crescidas em situação controlo com OMP ($\pm 23\%$) relativamente às crescidas sem esta suplementação, que foi estatisticamente superior a todos dos tratamentos utilizados. Em

situações de stress o OMP não aumentou a eficiência do uso de água independentemente do stress aplicado. O mesmo foi verificado por Carillo *et al.* (2019b) e Rouphael *et al.* (2018) na cultura da alface e do tomate em condições de déficit salino. As plantas controlos sem OMP e as plantas com déficit de azoto com e sem OMP não diferiram entre si, e foram estatisticamente superiores em relação as crescidas com déficit de água e déficit combinado independentemente da presença do OMP.

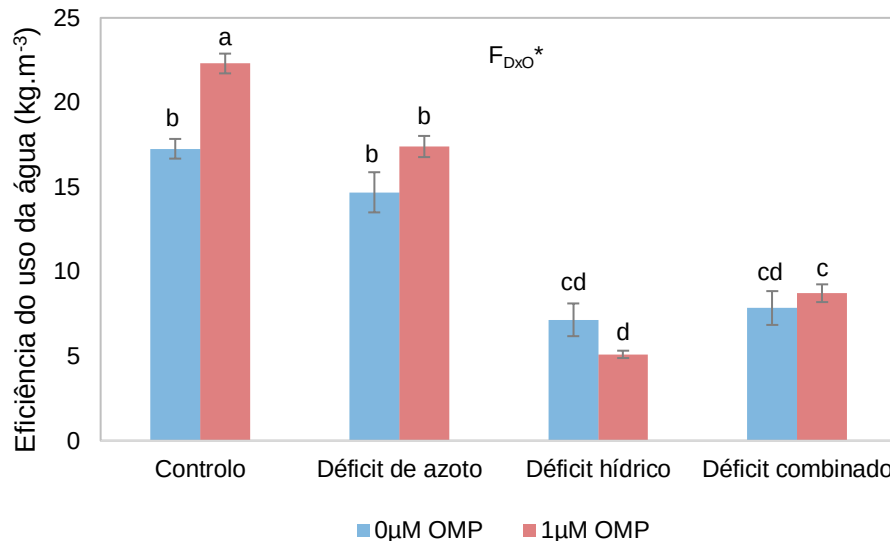


Figura 22. Eficiência do uso da água, em quilogramas por metro cúbico, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{DxO}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.9. pH do fruto

No presente estudo o efeito das condições de déficit de água e déficit combinado sobre o pH do tomate não foi significativo e, isso confirma os resultados de um estudo anteriormente realizado por (Klunklin *et al.*, 2017). Os frutos de plantas crescidas em condições de déficit de azoto sem OMP tiveram maior pH em comparação aos demais frutos, com exceção dos frutos de plantas controlo sem OMP (Figura 23). Esse resultado foi semelhante aos achados por Assunção *et al.* (2020), que avaliaram as características físico-químicas e produtividade do tomateiro em função de fontes e doses de azoto, e não observaram aumento do pH do fruto com o aumento da dose de azoto comparativamente a situações controlo. Todos os tratamentos com OMP não diferiram entre si, e nem diferiram do controlo sem OMP. Em estudo anterior o OMP aumentou o teor de cálcio nas folhas (Rouphael *et al.*, 2018) e esperava-se que no presente estudo ocasionasse esse aumento nos frutos e com isso subisse o pH, mas, nesse estudo o

OMP em plantas com déficit de azoto reduziu significativamente o pH por 11%. Não obstante, o efeito direto do OMP no pH de frutos de tomateiro não foi explorado anteriormente a este estudo em condições controlo, déficit de azoto, déficit de água e déficit combinado.

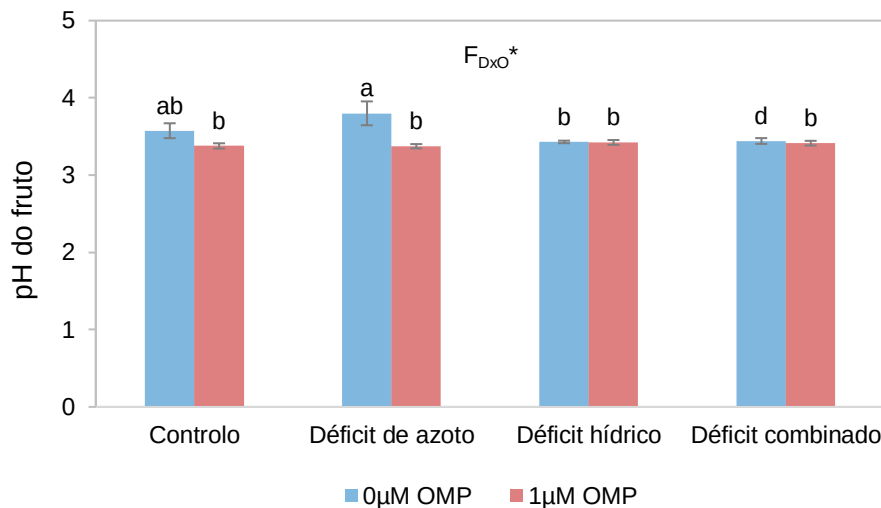


Figura 23. pH do fruto, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{DxO}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

4.2.10. Sólidos solúveis totais (SST)

Os sólidos solúveis totais também foram influenciados pelos tratamentos aplicados, em plantas crescidas em condições de déficit de azoto (com e sem OMP), o conteúdo de sólido solúveis totais foi estatisticamente inferiores em relação a todos os restantes tratamentos, com exceção do controlo com OMP e do déficit combinado sem OMP (Figura 24). A aplicação de azoto até ao nível ótimo aumentou o teor de SST, num estudo realizado por Cheng *et al.* (2021) em plantas de tomate. Num outro estudo, a redução do fornecimento de azoto afetou significativamente o teor de SST, ao proporcionar menor °Brix (Assunção *et al.*, 2020), corroborando com o presente estudo. Segundo Colla *et al.* (2001), o azoto tem um papel importante na biossíntese de açúcares nas folhas, o qual pode ser transcolado para os frutos e aumentar, aumentando o teor de SST. Os tratamentos com déficit hídrico (com e sem OMP) e déficit combinado com OMP não diferiram significativamente do controlo sem OMP e, o tratamento com déficit hídrico com OMP foi significativamente superior em relação ao controlo com OMP. Num estudo anterior, a diminuição do fornecimento de água de mais

de 50%, também não resultou em diferenças significativas entre os tratamentos com déficit e o controle, o que vai de encontro ao presente estudo (Klunklin *et al.*, 2017).

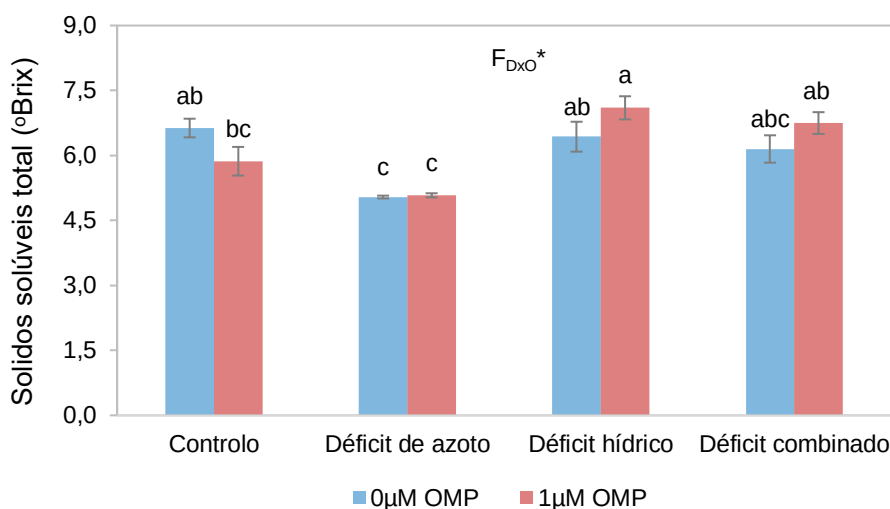


Figura 24. Sólidos solúveis total, em °Brix, em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}* e F_{DxO}^{ns} indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a p ≤ 0,05.

4.2.11. Acidez titulável e índice de maturação

A acidez titulável (AT) é um parâmetro de qualidade que depende de vários fatores, dentre os quais a variedade e as condições de crescimento das plantas (Kumar *et al.*, 2015). Estudos anteriores mostram associação do stress hídrico severo com a maior concentração de acidez titulável nos frutos e diminuição da AT resultante do stress de azoto (Abdel *et al.*, 2019). Além disso, num estudo realizado por Zhao *et al.* (2022), a AT também aumentou à medida que o nível do stress hídrico aumentou. Neste estudo, o tratamento com déficit de água teve maior teor de AT, entre os tratamentos sem OMP, mas não diferiu significativamente dos demais tratamentos (Figura 25A). Esse resultado talvez se deva ao nível de déficit aplicado que não foi suficientemente intenso para aumentar os níveis de AT, nas condições ambientais estudadas. Contudo, não é a primeira vez que tal facto se verifica visto que Mohammed *et al.* (2018) e Urić *et al.* (2020) na cultura de tomate observaram a mesma falta de diferenças significativas relativamente ao stress hídrico. Apesar da aplicação de OMP não ter ocasionado efeitos significativos, tendencialmente aumentou a acidez titulável nos tratamentos com déficit de azoto (±16%) e déficit combinado (±13%).

O índice de maturação é um parâmetro de qualidade que relaciona os SST e a AT e é obtido pela divisão algébrica entre estes parâmetros (SST/AT) (Peripolli *et al.*, 2020). É usado para descrever a maturação da fruta, e quanto maior for o seu valor, maior é o teor de SST e mais doce é a fruta (Farid *et al.*, 2021). Segundo Heine *et al.* (2015) e Peripolli *et al.* (2020), um fruto de boa qualidade deve apresentar, para além dos valores de referências de SST e AT, um índice de maturação (SST/AT) maior do que 10. No presente estudo, os resultados referentes ao índice da maturação assemelham-se aos observados na variável acidez titulável, pois, também não se obteve diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 25B). Resultados semelhantes foram apresentados por Dos Santos *et al.* (2019). Diferente da variável anterior, ligeiros aumentos percentuais, ocasionados pela aplicação de OMP, foram observados apenas no tratamento de déficit de água ($\pm 25\%$). Nos tratamentos com déficit de azoto e déficit combinado, foram registados diminuição do índice de maturação ($\pm 17\%$ em déficit de azoto e $\pm 5\%$ em déficit de combinado) com a aplicação de OMP.

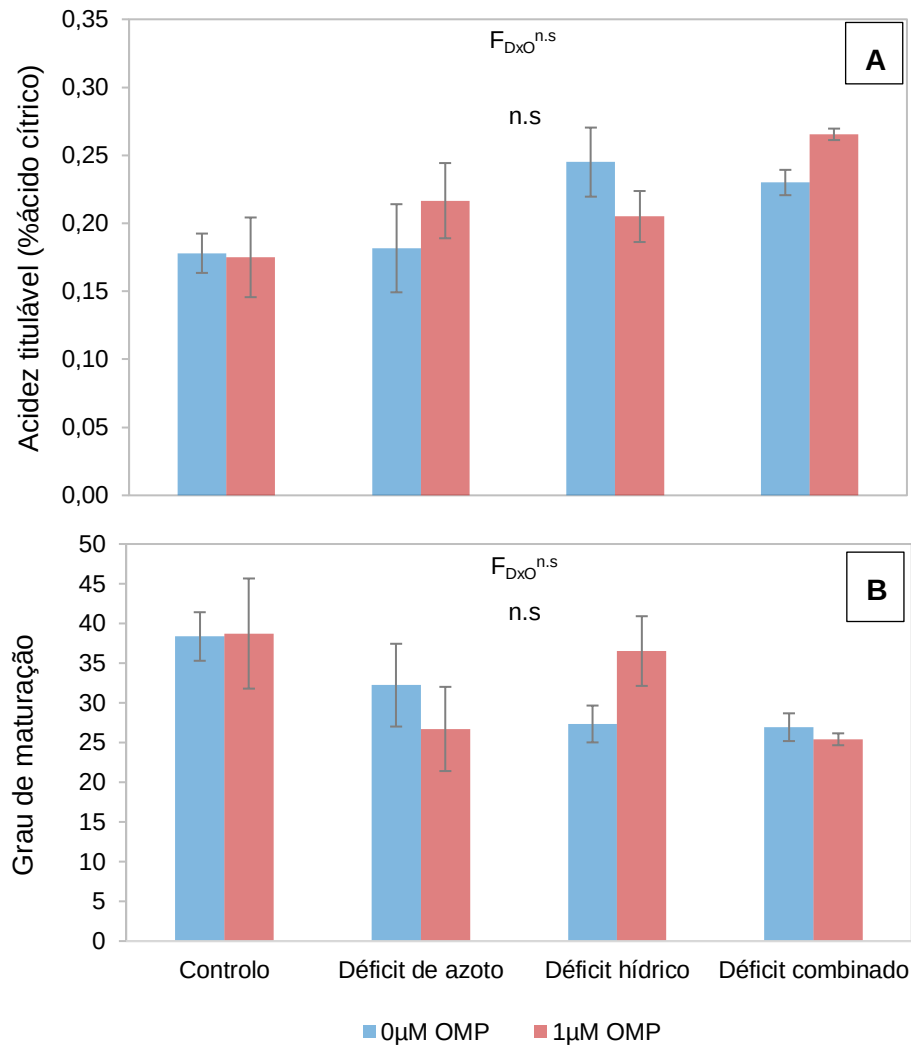


Figura 25. Acidez titulável (A), em percentagem de ácido cítrico, e Grau de maturação (B), em função das doses de OMP (0 e 1 μM) aplicadas nos tratamentos controlos (100% de azoto-N e 100% de evapotranspiração cultural-ETc), com déficit de azoto (50%N e 100%ETc), déficit hídrico (100%N e 50%ETc) e déficit combinado (50%N e 50%ETc). Os valores indicados correspondem à média de 6 réplicas e as barras ao erro padrão. F_{DxO}^* e $F_{DxO}^{n.s}$ indicam, respetivamente, presença e ausência de efeitos significativo da interação do déficit e dose de OMP; letras diferentes e n.s indicam, respetivamente, presença e ausência de diferenças significativas entre os tratamentos a $p \leq 0,05$.

5. Conclusões e estudos futuros

O aumento da eficiência do uso da água e dos fertilizantes, particularmente os azotados, é um dos principais desafios para o setor agrícola, pelo que a comunidade científica continua a explorar estratégias sustentáveis que visam maximizar a produção com a menor utilização desses recursos (água e fertilizantes). De entre as estratégias possíveis a serem estudadas, a utilização de moléculas bioativas naturais ou sintéticas como elicitadores para mitigar os efeitos negativos da redução do fornecimento desses fatores tem vindo a ganhar interesse. O OMP está recentemente a ser explorada como uma dessas moléculas, e tem sido estudado com o objetivo de aumentar a tolerância das plantas a diversos stresses exógenos. Entretanto, este é o primeiro estudo sobre o seu potencial na tolerância do déficit individual de água, de azoto e combinado (de água e azoto) na cultura do tomate.

Na primeira parte deste estudo o objetivo foi de otimizar a dose de aplicação de OMP na mitigação dos efeitos negativos do déficit combinado de água e azoto na cultura do tomate. Os resultados obtidos mostram que em condições de déficit combinado, a dose mais baixa (1 μ M) de OMP aumentou significativamente a altura da planta ($\pm 18\%$), peso seco do caule ($\pm 33\%$) e levou a um aumento de $\pm 18\%$ do peso total da planta (embora esse aumento não seja significativo, está presente). Já a aplicação de doses mais elevadas de OMP (5 e 10 μ M) levaram à redução da altura da planta, número de folhas (apenas em relação a dose de 5), área foliar, massa seca vegetal (peso seco das folhas, caule, raízes e total) e o índice SPAD mostrando um efeito antagonista. Esses resultados permitiram concluir que a aplicação de 1 μ M OMP parece promissora e deverá ser melhor explorada. Como tal, a mesma foi a concentração utilizada para a realização do segundo ensaio que visou analisar o efeito do OMP no crescimento, desenvolvimento, produtividade e qualidade do fruto do tomate submetido ao déficit de água, de azoto e ao déficit combinado de água e azoto.

Neste segundo ensaio o OMP aumentou a altura das plantas (em condições de déficit combinado), o número de folhas, o índice SPAD, o peso seco total e o peso seco das folhas (em condições de déficit de azoto), o peso seco das raízes (em condições de déficit combinado). A produtividade e a eficiência do uso da água também foram positivamente influenciadas pela aplicação de OMP. Em condições controlos, o OMP aumentou a produtividade do tomate e minimizou o efeito do déficit de azoto neste parâmetro. O OMP reduziu o pH dos frutos ($\pm 11\%$) em plantas sob déficit de azoto, entretanto, não pareceu ter grande efeitos nos parâmetros de qualidade dos frutos

estudados. A eficiência do uso da água foi maior em planta controlos tratados com OMP. Esses resultados indicam que o OMP pode minimizar o déficit de água, de azoto e o déficit combinado, em alguns parâmetros morfológicos e fisiológicos. Sugerem ainda que o OMP pode aumentar a produtividade e a eficiência do uso da água em plantas crescidas em condições controlos (sem déficit). Porém, como algumas das plantas sofreram algum stress biótico (nomeadamente ataque de oídio), será importante repetir este estudo em condições de plantas totalmente saudáveis e comparar o efeito do OMP com outros potenciais elicitadores em condições idênticas de crescimento. Cientes das limitações do uso do OMP em grande escala, devido ao custo elevado da molécula, um comprovado efeito significativo do mesmo, abriria portas para a identificação de análogos mais baratos para o uso em grande escala. Entretanto, ainda há a necessidade de se realizar mais estudos onde se possa testar o seu efeito quando aplicado por outras vias (por exemplo a foliar), em outras espécies e em outros tipos de stresses.

Paralelamente, os mecanismos pelos quais o OMP atua nas plantas ainda estão pouco estudados e deverão ser melhor compreendidos para otimizar a aplicação deste elicitador tirando o máximo partido do mesmo.

6. Referências Bibliográficas

- Abdel, H. H., Abozed, S. S., & Mohammed, K. A. (2019). Impact of nitrogen and water status within plant on dry matter formation and nutritional values of tomatoes. *Plant Archives*, 19, 665-673. http://plantarchives.org/PDF%20SUPPLEMENT%202019/109_665-673_.pdf
- Abhyankar, V. V., Gavade, S. A., & Bhole, K. S. (2019). System Development for Simultaneous Measurement and Control of pH and Moisture of Soil. 2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE),
- Abu-Alrub, I., Saleh, S., & Awaga, A. (2019). Effect of different rates of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and quality of greenhouse tomato Under the UAE condition. *EC Agriculture*, 5(3), 139-146.
- Aci, M. M., Lupini, A., Mauceri, A., Sunseri, F., & Abenavoli, M. R. (2021). New insights into N-utilization efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under N limiting condition. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 634-644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.046>
- Aguilar Pezo, E. T. (2021). Evaluación de la relación fenotipo ambiente de seis cultivares de tomate (*solanum lycopersicum* L.) en el cantón machala.
- Al-Badr, A. A. (2010). Omeprazole. In *Profiles of drug substances, excipients and related methodology* (Vol. 35, pp. 151-262). Elsevier.
- Allen, R. G., Pereira, Luis S., Raes, Dirk and Smith, Martin (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego e Drenaje 56. <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>
- Almaroai, Y. A., & Eissa, M. A. (2020). Role of Marine Algae Extracts in Water Stress Resistance of Onion Under Semiarid Conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1092-1101. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00195-0>
- Amalfitano, C., Del Vacchio, L., Somma, S., Cuciniello, A., & Caruso, G. (2017). Effects of cultural cycle and nutrient solution electrical conductivity on plant growth, yield and fruit quality of 'Friariello' pepper grown in hydroponics. *Horticultural Science*, 44(2), 91-98. <https://doi.org/10.17221/172/2015-hortsci>
- Aranda, A. L. V., Caicedo-López, L. H., Márquez, E. E., Zepeda, H. R., & Gómez, C. E. Z. (2021). Elicidores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana. *Revista Bioética*, 29(1), 76-86. <https://doi.org/10.1590/1983-80422021291448>
- Assunção, N. S., Silva, N. O., Fernandes, F. L., Aquino, L. A. d., & Fernandes, M. E. d. S. (2020). Physico-chemical characteristics and productivity of tomato plants in function of nitrogen sources and doses. *Biosci. j.(Online)*, 1274-1282.
- Ayenon, M. A. T., Danquah, A., Hanson, P., Ampomah-Dwamena, C., Sodedji, F. A. K., Asante, I. K., & Danquah, E. Y. (2019). Accelerating breeding for heat tolerance

in tomato (*Solanum lycopersicum* L.): an integrated approach. *Agronomy*, 9(11), 720. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110720>

- Babazadeh, H., Ardalani, H., Kisekka, I., & Hoogenboom, G. (2021). Simultaneous water, salinity and nitrogen stresses on tomato (*Solanum lycopersicum*) root water uptake using mathematical models. *Journal of Plant Nutrition*, 44(2), 282-295. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822400>
- Bahloul, N., Balti, M. A., Guellouze, M. S., & Kechaou, N. (2018, Sep 11-14). Coupling of microwave to convective drying for improving fruit quality. [Ids'2018: 21st international drying symposium]. 21st International Drying Symposium (IDS), Valencia, SPAIN.
- Bahmani Jafarlou, M., Pilehvar, B., Modarresi, M., & Mohammadi, M. (2021). Performance of Algae Extracts Priming for Enhancing Seed Germination Indices and Salt Tolerance in *Calotropis procera* (Aiton) W.T. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 45(2), 493-502. <https://doi.org/10.1007/s40995-021-01071-x>
- Basit, A., Hassnain, M. A., Ullah, I., Shah, S. T., Zuhair, S. A., & Ullah, I. (2020). 13. Quality indices of tomato plant as affected by water stress conditions and chitosan application. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 9(2), 1364-1375.
- Bilalis, D., Krokida, M., Roussis, I., Papastylianou, P., Travlos, I., Cheimona, N., & Dede, A. (2018). Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Horticulturae*, 30(2), 321-332. <https://doi.org/10.2478/fhort-2018-0027>
- Boch, S., Kurtogullari, Y., Allan, E., Lessard-Therrien, M., Rieder, N. S., Fischer, M., De Leon, G. M., Arlettaz, R., & Humbert, J. Y. (2021). Effects of fertilization and irrigation on vascular plant species richness, functional composition and yield in mountain grasslands. *Journal of Environmental Management*, 279, Article 111629. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111629>
- Borba, M. E. A., Maciel, G. M., Fraga, E. F., Machado, C. S., Marquez, G. R., Silva, I. G., & Almeida, R. S. (2017). Gas exchanges and water use efficiency in the selection of tomato genotypes tolerant to water stress. *Genetics and Molecular Research*, 16(2), Article 16029685. <https://doi.org/10.4238/gmr16029685>
- Brunetti, G., Traversa, A., De Mastro, F., & Coccozza, C. (2019). Short term effects of synergistic inorganic and organic fertilization on soil properties and yield and quality of plum tomato. *Scientia Horticulturae*, 252, 342-347. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.002>
- Buttaro, D., Santamaria, P., Signore, A., Cantore, V., Boari, F., Montesano, F. F., & Parente, A. (2014, Nov 26-28). Irrigation Management of Greenhouse Tomato and Cucumber Using Tensiometer: Effects on Yield, Quality and Water Use. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* [Efficient irrigation management and its effects in urban and rural landscapes]. 1st International Symposium on Efficient Irrigation Management and its Effects on Urban and Rural Landscapes (IRLA), Local Govt Olympiaki S A, Western Greece Reg S A, Dev Agcy, Patras, GREECE.

- Cahimba, I. G. (2012). *Avaliação de diferentes fórmulas de adubos minerais na cultura de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) variedade Marglobe nas condições da fazenda experimental* [Monografia, Universidade José Eduardo dos Santos]. Huambo.
- Calvo-Polanco, M., Sanchez-Romera, B., Aroca, R., Asins, M. J., Declerck, S., Dodd, I. C., Martinez-Andujar, C., Albacete, A., & Ruiz-Lozano, J. M. (2016). Exploring the use of recombinant inbred lines in combination with beneficial microbial inoculants (AM fungus and PGPR) to improve drought stress tolerance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 131, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.06.015>
- Cammarano, D., Ronga, D., Di Mola, I., Mori, M., & Parisi, M. (2020). Impact of climate change on water and nitrogen use efficiencies of processing tomato cultivated in Italy. *Agricultural Water Management*, 241, Article 106336. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106336>
- Cappetta, E., Andolfo, G., Di Matteo, A., Barone, A., Frusciante, L., & Ercolano, M. R. (2020). Accelerating tomato breeding by exploiting genomic selection approaches. *Plants*, 9(9), 1236. <https://doi.org/10.3390/plants9091236>
- Carillo, P., Colla, G., El-Nakhel, C., Bonini, P., D'Amelia, L., Dell'Aversana, E., Pannico, A., Giordano, M., Sifola, M. I., Kyriacou, M. C., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2019a). Biostimulant Application with a Tropical Plant Extract Enhances *Corchorus olitorius* Adaptation to Sub-Optimal Nutrient Regimens by Improving Physiological Parameters. *Agronomy*, 9(5), 249. <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/5/249>
- Carillo, P., Raimondi, G., Kyriacou, M. C., Pannico, A., El-Nakhel, C., Cirillo, V., Colla, G., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2019b). Morpho-physiological and homeostatic adaptive responses triggered by omeprazole enhance lettuce tolerance to salt stress. *Scientia Horticulturae*, 249, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.038>
- Carillo, P., Woodrow, P., Raimondi, G., El-Nakhel, C., Pannico, A., Kyriacou, M. C., Colla, G., Mori, M., Giordano, M., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2019c). Omeprazole Promotes Chloride Exclusion and Induces Salt Tolerance in Greenhouse Basil. *Agronomy*, 9(7), 355. <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/7/355>
- Carvalho, M. D. R. P. (2017). *Efeito do regime hídrico e da fertilização azotada no rendimento e qualidade da cultura do tomate* [Tesi, Instituto Politecnico de Braganca (Portugal)].
- Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2014, Nov 26-28). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* [Efficient irrigation management and its effects in urban and rural landscapes]. 1st International Symposium on Efficient Irrigation Management and its Effects on Urban and Rural Landscapes (IRLA), Local Govt Olympiaki S A, Western Greece Reg S A, Dev Agcy, Patras, GREECE.
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutierrez-Soto, M. V. (2017). Crop physiological responses to high temperature stress. I. Molecular, biochemical and physiological aspects.

- Agronomia Mesoamericana*, 28(1), 237-253.
<https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Chen, J., Lu, S. Y., Zhang, Z., Zhao, X. X., Li, X. M., Ning, P., & Liu, M. Z. (2018). Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of the Total Environment*, 613, 829-839.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186>
- Chen, J. L., Kang, S. Z., Du, T. S., Qiu, R. J., Guo, P., & Chen, R. Q. (2013). Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural Water Management*, 129, 152-162.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.011>
- Chen, S., Zhou, Z.-j., Andersen, M. N., & Hu, T.-t. (2015). Tomato yield and water use efficiency—coupling effects between growth stage specific soil water deficits. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(5), 460-469.
<https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1024279>
- Chen, Z., Xu, J. Y., Wang, F. Z., Wang, L., & Xu, Z. C. (2019). Morpho-physiological and proteomic responses to water stress in two contrasting tobacco varieties. *Scientific Reports*, 9, Article 18523. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54995-1>
- Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Xiang, Y., Tang, Z., Pei, S., Zeng, H., Zhang, C., Dai, Y., Li, Z., Zou, Y., & Zhang, F. (2021). Effects of nitrogen supply on tomato yield, water use efficiency and fruit quality: A global meta-analysis. *Scientia Horticulturae*, 290, 110553.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110553>
- Chitarra, W., Pagliarani, C., Maserti, B., Lumini, E., Siciliano, I., Cascone, P., Schubert, A., Gambino, G., Balestrini, R., & Guerrieri, E. (2016). Insights on the Impact of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis on Tomato Tolerance to Water Stress. *Plant Physiology*, 171(2), 1009-1023. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00307>
- Choi, S., Colla, G., Cardarelli, M., & Kim, H.-J. (2022). Effects of Plant-Derived Protein Hydrolysates on Yield, Quality, and Nitrogen Use Efficiency of Greenhouse Grown Lettuce and Tomato. *Agronomy*, 12(5), 1018.
<https://www.mdpi.com/2073-4395/12/5/1018>
- Cirillo, V., Van Oosten, M. J., Izzo, M., & Maggio, A. (2019). Omeprazole treatment elicits contrasting responses to salt stress in two basil genotypes. *Annals of Applied Biology*, 174(3), 329-338. <https://doi.org/10.1111/aab.12496>
- Colla, G., Mitchell, J. P., Poudel, D. D., & Saccardo, F. (2001). Impacts of Farming Systems and Soil Characteristics on Processing Tomato Fruit Quality.
- Cui, J., Shao, G., Lu, J., Keabetswe, L., & Hoogenboom, G. (2019). Yield, quality and drought sensitivity of tomato to water deficit during different growth stages. *Scientia agrícola*, 77.
- Dam, B. v., Goffau, M. d., Lidth de Jeude, J. v., & Naika, S. (2006). A cultura do tomate: produção, processamento e comercialização. *Agrodok*.
- Dawood, M. F. A., Zaid, A., & Latef, A. A. H. A. (2022). Salicylic Acid Spraying-Induced Resilience Strategies Against the Damaging Impacts of Drought and/or Salinity

- Stress in Two Varieties of *Vicia faba* L. Seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(5), 1919-1942. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10381-8>
- de Jesús, R. L. O., Ibáñez, A. T. G., Pale, J. R. S., Berasain, M. D. M., Campos, C. A. E., & Cerda, A. L. (2018). Persistencia, internalización y translocación de *Escherichia coli* O157: H7, O157: H16 y O105ab en plantas y frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Argentina de Microbiología*, 50(4), 408-416.
- de Oliveira Hott, M., dos Reis, E. F., de Souza Lima, V. L., Pereira, L. B., & de Oliveira Garcia, G. (2018). Development of tomato plants under different water tensions in soil during the productive stage. *Idesia*, 36(3), 63-68.
- de Santana, M. J., Pereira, U. d. C., Beirigo, J. D. C., de Souza, S. S., Campos, T. M., & Vieira, T. A. (2011). COEFICIENTES DE CULTURA PARA O TOMATEIRO IRRIGADO. *IRRIGA*, 16(1), 11-20. <https://doi.org/10.15809/irriga.2011v16n1p11>
- Ding, L., Wang, K. J., Jiang, G. M., Biswas, D. K., Xu, H., Li, L. F., & Li, Y. H. (2005). Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Annals of Botany*, 96(5), 925-930. <https://doi.org/10.1093/aob/mci244>
- Dinh, T. H., Watanabe, K., Takaragawa, H., Nakabaru, M., & Kawamitsu, Y. (2017). Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. *Plant Production Science*, 20(4), 412-422. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>
- Dinu, M., Soare, R., & Dumitru, M. G. (2017). The effect of foliar fertilization with organic products on some nutritional value during post-harvest storage of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Archivos Latinoamericanos De Nutricion*, 67(3), 218-226. <Go to ISI>://WOS:000437233600007
- Djidonou, D., Zhao, X., Koch, K. E., & Zotarelli, L. (2019). Nitrogen Accumulation and Root Distribution of Grafted Tomato Plants as Affected by Nitrogen Fertilization. *Hortscience*, 54(11), 1907-1914. <https://doi.org/10.21273/hortsci14066-19>
- Djurovic, N., Cosic, M., Stricevic, R., Savic, S., & Domazet, M. (2016). Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of tomato. *Scientia Horticulturae*, 201, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.017>
- Dos Santos, A., da Costa, A. R., Silva, P. C., Giongo, P. R., Mesquita, M., & Drumond, A. A. (2019). Irrigation depth and nitrogen fertilization on production and quality of cherry tomatoes. *Journal of Agricultural Science*, 11(6). <https://doi.org/10.5539/jas.v11n6p547>
- Du, Y. D., Cao, H. X., Liu, S. Q., Gu, X. B., & Cao, Y. X. (2017). Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern China. *Journal of integrative agriculture*, 16(5), 1153-1161. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(16\)61371-0](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(16)61371-0)
- Eitel Canales, C. (2021). Efecto del estrés salino en la producción y calidad de semillas de tomate. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/52676>

- El-Aziz, A. (2020). The Effect of Silicon on Minimizing the Implications of Water Stress on Tomato Plants. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 4(2020), 137-148.
- El-Katony, T. M., Deyab, M. A., El-Adl, M. F., & Ward, F. M. E.-N. (2020). The aqueous extract and powder of the brown alga *Dictyota dichotoma* (Hudson) differentially alleviate the impact of abiotic stress on rice (*Oryza sativa* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(6), 1155-1171. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00805-2>
- Elansary, H. O., & El-Abedin, T. K. Z. (2019). Omeprazole alleviates water stress in peppermint and modulates the expression of menthol biosynthesis genes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 578-586. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.018>
- FAO. (2021). *Tomato Production Worldwide* FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#compare>
- Farid, E.-K., Mohamed, E. B., Abdelhak, T., Ouia, C., Rachid, B., & Hamid, B. (2021). Comparative Analysis of Nutritional Composition of 61 Varieties of Mandarins (*Citrus Reticulata* Blanco). *NVEO-NATURAL VOLATILES & ESSENTIAL OILS Journal* NVEO, 12801-12815. <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/3987>
- Fawzy, Z. (2019). Effect of irrigation systems on vegetative growth, fruit yield, quality and irrigation water use efficiency of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) grown under water stress conditions. *Acta Scientific Agriculture*, 3, 172-183.
- Fernandes, A., Machado, J., Fernandes, T., Vasconcelos, M., & Carvalho, S. (2022). Water and nitrogen fertilization management in light of climate change: impacts on food security and product quality. *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change*, 147-178.
- Florke, M., Schneider, C., & McDonald, R. I. (2018). Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nature Sustainability*, 1(1), 51-58. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>
- García Chate, R. (2021). Fertilización en tomate indeterminado (*Solanum lycopersicum* L.) para semilla comercial, bajo condiciones de turba y casa malla en Villacurí, Ica.
- Garnett, T., Conn, V., Plett, D., Conn, S., Zanghellini, J., Mackenzie, N., Enju, A., Francis, K., Holtham, L., Roessner, U., Boughton, B., Bacic, A., Shirley, N., Rafalski, A., Dhugga, K., Tester, M., & Kaiser, B. N. (2013). The response of the maize nitrate transport system to nitrogen demand and supply across the lifecycle. *New Phytologist*, 198(1), 82-94. <https://doi.org/10.1111/nph.12166>
- Ghassemi-Golezani, K., Maghferati, R., Zehtabsalmasi, S., & Dastborhan, S. (2016). Influence of water deficit and nitrogen supply on grain yield and yield components of safflower. *Adv. Biores*, 7, 132-136.
- Gonçalves, F. T. T. (2014). *Desenvolvimento da cultura do tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) var. Roma SL/HS cultivado sob diferentes tipos de coberturas do solo* [Monografia, Universidade José Eduardo dos Santos]. Huambo.

- Hao, S. X., Cao, H. X., Wang, H. B., & Pan, X. Y. (2019). The physiological responses of tomato to water stress and re-water in different growth periods. *Scientia Horticulturae*, 249, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.045>
- Hasler, K., Broring, S., Omta, S. W. F., & Olfs, H. W. (2015). Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. *European Journal of Agronomy*, 69, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.001>
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in plant science*, 10, 103. <https://doi.org/doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- He, D., Chen, Y., Zhao, K., Cornelissen, J. H. C., & Chu, C. (2018). Intra- and interspecific trait variations reveal functional relationships between specific leaf area and soil niche within a subtropical forest. *Annals of Botany*, 121(6), 1173-1182. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx222>
- Heine, A. J. M., Moraes, M. O. B., Porto, J. S., Souza, J. R., Rebouças, T. N. H., & Santos, B. S. R. (2015). Número de haste e espaçamento na produção e qualidade do tomate. *Scientia Plena*, 11(9). <https://doi.org/doi:10.14808/sci.plena.2015.090202>
- Hernandez-Espinoza, L. H., & Barrios-Masias, F. H. (2020). Physiological and anatomical changes in tomato roots in response to low water stress. *Scientia Horticulturae*, 265, Article 109208. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109208>
- Hernandez, V., Hellin, P., Fenoll, J., & Flores, P. (2019). Interaction of nitrogen and shading on tomato yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 255, 255-259. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.040>
- Heuvelink, E. (2018). *Tomatoes* (2 ed., Vol. 27). CABI.
- Hou, M., Zhu, L., & Jin, Q. (2016). Surface drainage and mulching drip-irrigated tomatoes reduces soil salinity and improves fruit yield. *Plos one*, 11(5), e0154799.
- Jalpa, L., Mylavarapu, R. S., Hochmuth, G. J., Wright, A. L., & van Santen, E. (2020). Apparent Recovery and Efficiency of Nitrogen Fertilization in Tomato Grown on Sandy Soils. *Horttechnology*, 30(2), 204-211. <https://doi.org/10.21273/horttech04480-19>
- Jangid, K. K., & Dwivedi, P. (2016). Physiological responses of drought stress in tomato: a review. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 9(1), 53-61.
- Janušauskaitė, D., & Auškalnienė, O. (2014). Photosynthetic traits of spring barley throughout development stages under field conditions. *Communications in soil science and plant analysis*, 45(3), 284-296.
- Jewell, R. (2007). Omeprazole. In S. J. Enna & D. B. Bylund (Eds.), *xPharm: The Comprehensive Pharmacology Reference* (pp. 1-5). Elsevier.
- Jureková, Z., Németh-Molnár, K., & Paganová, V. (2011). Physiological responses of six tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars to water stress. *Journal of Horticulture and Forestry*, 3(10), 294-300.

- Kalaitzoglou, P., van Ieperen, W., Harbinson, J., van der Meer, M., Martinakos, S., Weerheim, K., Nicole, C. C. S., & Marcelis, L. F. M. (2019). Effects of Continuous or End-of-Day Far-Red Light on Tomato Plant Growth, Morphology, Light Absorption, and Fruit Production. *Frontiers in plant science*, 10, Article 322. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00322>
- Kaplan, M., Kara, K., Unlukara, A., Kale, H., Beyzi, S. B., Varol, I., Kizilsimsek, M., & Kamalak, A. (2019). Water deficit and nitrogen affects yield and feed value of sorghum sudangrass silage. *Agricultural Water Management*, 218, 30-36.
- Karami, S., Nadi, H., Tajbaksh, M., & Modarres-Sanavy, S. A. M. (2020). Effect of Zeolite on Nitrogen Use Efficiency and Physiological and Biomass Traits of Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) Under Water-Deficit Stress Conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1427-1441. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00223-z>
- Kavroulakis, N., Doupis, G., Papadakis, I. E., Ehalotis, C., & Papadopoulou, K. K. (2018). Tolerance of tomato plants to water stress is improved by the root endophyte *Fusarium solani* FsK. *Rhizosphere*, 6, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.04.003>
- Khan, A., Kamran, M., Imran, M., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., Al-Amri, I., Lee, I. J., & Khan, A. L. (2019). Silicon and salicylic acid confer high-pH stress tolerance in tomato seedlings. *Scientific Reports*, 9, Article 19788. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55651-4>
- Khan, M., Khan, M. J., Sarwar, T., & Khan, M. (2018). Simulation of Nitrate Leaching under Different Irrigation Deficit and Nitrogen Levels in Tomato Crop using HYDRUS 1-D. *Sarhad Journal of Agriculture*, 35(1), 126-133.
- Khapte, P., Kumar, P., Burman, U., & Kumar, P. (2019). Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical. *Agronomical and physio-biochemical*.
- Khoshmanzar, E., Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M. R., Khoshru, B., Arzanlou, M., & Asgari Lajayer, B. (2020). Effects of Trichoderma isolates on tomato growth and inducing its tolerance to water-deficit stress. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(2), 869-878. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02405-4>
- Klem, K., Zahora, J., Zemek, F., Trunda, P., Tuma, I., Novotna, K., Hodanova, P., Rapantova, B., Hanus, J., Vavrikova, J., & Holub, P. (2018). Interactive effects of water deficit and nitrogen nutrition on winter wheat. Remote sensing methods for their detection. *Agricultural Water Management*, 210, 171-184. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.004>
- Klunklin, W., & Savage, G. (2017). Effect on Quality Characteristics of Tomatoes Grown Under Well-Watered and Drought Stress Conditions. *Foods*, 6(8), 56. <https://www.mdpi.com/2304-8158/6/8/56>
- Knapp, S., & Peralta, I. E. (2016). The tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) and its botanical relatives. In *The tomato genome* (pp. 7-21). Springer.
- Kumar, P. S., Singh, Y., Nangare, D. D., Bhagat, K., Kumar, M., Taware, P. B., Kumari, A., & Minhas, P. S. (2015). Influence of growth stage specific water stress on the

- p>yield, physico-chemical quality and functional characteristics of tomato grown in shallow basaltic soils.
- Scientia Horticulturae*
- , 197, 261-271.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.054>
- Kunrath, T. R., Lemaire, G., Sadras, V. O., & Gastal, F. (2018). Water use efficiency in perennial forage species: Interactions between nitrogen nutrition and water deficit. *Field Crops Research*, 222, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.031>
- Kuromori, T., Seo, M., & Shinozaki, K. (2018). ABA Transport and Plant Water Stress Responses. *Trends in Plant Science*, 23(6), 513-522. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.04.001>
- Li, H., Liu, H., Gong, X., Li, S., Pang, J., Chen, Z., & Sun, J. (2021). Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato. *Agricultural Water Management*, 245, 106570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106570>
- Li, M. X., Xu, J. S., Wang, X. X., Fu, H., Zhao, M. L., Wang, H., & Shi, L. X. (2018). Photosynthetic characteristics and metabolic analyses of two soybean genotypes revealed adaptive strategies to low-nitrogen stress. *Journal of Plant Physiology*, 229, 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.07.009>
- Li, Q., Wei, M., Li, Y., Feng, G., Wang, Y., Li, S., & Zhang, D. (2019a). Effects of soil moisture on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in tomato are influenced by evaporative demand. *Agricultural Water Management*, 226, 105818. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105818>
- Li, Q. M., Liu, Y. P., Tian, S. B., Liang, Z. W., Li, S. H., Li, Y. M., Wei, M., & Zhang, D. L. (2019b). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 256, Article 108630. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108630>
- Li, Y. M., Sun, Y. X., Liao, S. Q., Zou, G. Y., Zhao, T. K., Chen, Y. H., Yang, J. G., & Zhang, L. (2017). Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 186, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.006>
- Liang, J., & He, J. X. (2018). Protective role of anthocyanins in plants under low nitrogen stress. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 498(4), 946-953. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.03.087>
- Lin, W., Zai-qiang, Y., Shi-qiong, Y., Jun, L., Kai-wei, L., & Meng-yuan, H. (2017). Effects of high temperature and different air humidity on growth and senescence characteristics for tomato seedlings. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 38(12), 761.
- Liu, J., Hu, T., Feng, P., Wang, L., & Yang, S. (2019a). Tomato yield and water use efficiency change with various soil moisture and potassium levels during different growth stages. *Plos one*, 14(3), e0213643.
- Liu, Q. X., Ren, T., Zhang, Y. W., Li, X. K., Cong, R. H., White, P. J., & Lu, J. W. (2019b). Yield loss of oilseed rape (*Brassica napus* L.) under nitrogen deficiency is

- associated with under-regulation of plant population density. *European Journal of Agronomy*, 103, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.11.006>
- Liu, X. D., Feng, Z. W., Zhao, Z. Y., Zhu, H. H., & Yao, Q. (2020a). Acidic soil inhibits the functionality of arbuscular mycorrhizal fungi by reducing arbuscule formation in tomato roots. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(2), 275-284. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1721320>
- Liu, X. X., Wang, S. W., Deng, X. P., Zhang, Z. Y., & Yin, L. N. (2020b). Comprehensive evaluation of physiological traits under nitrogen stress and participation of linolenic acid in nitrogen-deficiency response in wheat seedlings. *Bmc Plant Biology*, 20(1), Article 501. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02717-5>
- Lu, J., Shao, G. C., Cui, J. T., Wang, X. J., & Keabetswe, L. (2019). Yield, fruit quality and water use efficiency of tomato for processing under regulated deficit irrigation: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 222, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.008>
- Lu, T., Meng, Z., Zhang, G., Qi, M., Sun, Z., Liu, Y., & Li, T. (2017). Sub-high Temperature and High Light Intensity Induced Irreversible Inhibition on Photosynthesis System of Tomato Plant (*Solanum lycopersicum* L.) [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 8(365). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00365>
- Lv, X. M., Zhang, Y. X., Hu, L., Zhang, Y., Zhang, B., Xia, H. Y., Du, W. Y., Fan, S. J., & Kong, L. A. (2021). Low-Nitrogen Stress Stimulates Lateral Root Initiation and Nitrogen Assimilation in Wheat: Roles of Phytohormone Signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(1), 436-450. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10112-5>
- Machado, J., Fernandes, A., Fernandes, T., Heuvelink, E., Vasconcelos, M., & Carvalho, S. (2022). Drought and nitrogen stress effects and tolerance mechanisms in tomato: a review. *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change*, 315-359.
- Maggio, A., & Cirillo, V. (2018). *Omeprazole, a proton-pump inhibitor on humans, acts as a growth enhancer and stress protectant in plants* Università Degli Studi di Napoli “Federico II”. Napoli. http://www.fedoa.unina.it/12494/1/V.Cirillo_PhD_Thesis.pdf
- Martina, M., Tikunov, Y., Portis, E., & Bovy, A. G. (2021). The Genetic Basis of Tomato Aroma. *Genes*, 12(2), 226. <https://www.mdpi.com/2073-4425/12/2/226>
- Masabni, J., Sun, Y. P., Niu, G. H., & Del Valle, P. (2016). Shade Effect on Growth and Productivity of Tomato and Chili Pepper. *Horttechnology*, 26(3), 344-350. <https://doi.org/10.21273/horttech.26.3.344>
- Mata-Nicolás, E., Montero-Pau, J., Gimeno-Paez, E., Garcia-Carpintero, V., Ziarsolo, P., Menda, N., Mueller, L. A., Blanca, J., Cañizares, J., van der Knaap, E., & Díez, M. J. (2020). Exploiting the diversity of tomato: the development of a phenotypically and genetically detailed germplasm collection. *Horticulture Research*, 7(1), 66. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0291-7>

- Medyouni, I., Zouaoui, R., Rubio, E., Serino, S., Ben Ahmed, H., & Bertin, N. (2021). Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. *Food Science & Nutrition*, 9(4), 1949-1960. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2160>
- Meise, P., Seddig, S., Uptmoor, R., Ordon, F., & Schum, A. (2019). Assessment of Yield and Yield Components of Starch Potato Cultivars (*Solanum tuberosum* L.) Under Nitrogen Deficiency and Drought Stress Conditions. *Potato Research*, 62(2), 193-220. <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9407-y>
- Mohammadi, M. H. S., Etemadi, N., Arab, M. M., Aalifar, M., Arab, M., & Pessarakli, M. (2017). Molecular and physiological responses of Iranian Perennial ryegrass as affected by Trinexapac ethyl, Paclobutrazol and Absciscic acid under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.014>
- Mohammed, H., Mahmud, T., & Puteri Edaroyati, M. (2018). Deficit Irrigation for Improving the Postharvest Quality of Lowland Tomato Fruits. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 41(2).
- Morais, T. B. (2020). *Respostas morfo-fisiológicas da soja submetida à estresse hídrico e aplicação de bioestimulante* Universidade Federal de Santa Maria]. <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/23357>
- Morsy, N. M. (2019). Reducing water requirement for tomato crop in late summer through field shading. *Middle East J. Agric. Res*, 8(3), 808-819.
- Mu, X. H., & Chen, Y. L. (2021). The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.019>
- Mwinuka, P. R., Mbilinyi, B. P., Mbungu, W. B., Mourice, S. K., Mahoo, H. F., & Schmitter, P. (2021). Optimizing water and nitrogen application for neglected horticultural species in tropical sub-humid climate areas: A case of African eggplant (*Solanum aethiopicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 276, 109756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109756>
- Nahar, K., & Ullah, S. M. (2018). Drought stress effects on plant water relations, growth, fruit quality and osmotic adjustment of tomato (*Solanum lycopersicum*) under subtropical condition. *Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research*, 1-14.
- Nangare, D. D., Singh, Y., Kumar, P. S., & Minhas, P. S. (2016). Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Agricultural Water Management*, 171, 73-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.016>
- Nguyen, G. N., Joshi, S., & Kant, S. (2017). Chapter 13 - Water availability and nitrogen use in plants: effects, interaction, and underlying molecular mechanisms. In M. A. Hossain, T. Kamiya, D. J. Burritt, L.-S. P. Tran, & T. Fujiwara (Eds.), *Plant Macronutrient Use Efficiency* (pp. 233-243). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811308-0.00013-2>

- Ning, P., Yang, L., Li, C. J., & Fritschi, F. B. (2018). Post-silking carbon partitioning under nitrogen deficiency revealed sink limitation of grain yield in maize. *Journal of Experimental Botany*, 69(7), 1707-1719. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx496>
- Noguero, M., & Lacombe, B. (2016). Transporters Involved in Root Nitrate Uptake and Sensing by Arabidopsis [Mini Review]. *Frontiers in plant science*, 7(1391). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01391>
- Nuruddin, M. M., Madramootoo, C. A., & Dodds, G. T. (2003). Effects of water stress at different growth stages on greenhouse tomato yield and quality. *HortScience*, 38(7), 1389-1393.
- Ochoa-Velasco, C. E., Valadez-Blanco, R., Salas-Coronado, R., Sustaita-Rivera, F., Hernandez-Carlos, B., Garcia-Ortega, S., & Santos-Sanchez, N. F. (2016). Effect of nitrogen fertilization and *Bacillus licheniformis* biofertilizer addition on the antioxidants compounds and antioxidant activity of greenhouse cultivated tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L. var. Sheva). *Scientia Horticulturae*, 201, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.015>
- Odunayo, A., Galyon, G., Price, J., Hecht, S., & Tolbert, M. K. (2022). Evaluation of a long-acting injectable formulation of omeprazole in healthy dogs. *Journal of Veterinary Internal Medicine*. <https://doi.org/10.1111/jvim.16440>
- Okamoto, T., Takatani, S., Noutoshi, Y., Motose, H., & Takahashi, T. (2018). Omeprazole enhances mechanical stress-induced root growth reduction in *Arabidopsis thaliana*. *Plant and Cell Physiology*, 59(8), 1581-1591.
- Osorio-Gracia, N., Ortiz-Gonzalez, D., Sandoval-Contreras, H., Gomes, C., & de Toledo-Picoli, E. (2020). Produtividade de tomates oriundos da polinização natural e mecânica em duas épocas de plantio: Tomato productivity resulting from natural and mechanical pollination in two planting seasons. *Revista Agronômica del Noroeste Argentino*, 40(1), 51-61.
- Patane, C., & Cosentino, S. L. (2010). Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 97(1), 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.021>
- Pedro, J. H. M. (2015). *Estudo de diferentes variedades de tomateiro (Lycopersicum esculentum) nas condições edafo-climáticas do Huambo* [Monografia, Universidade José Eduardo dos Santos].
- Perchlik, M., & Tegeder, M. (2018). Leaf Amino Acid Supply Affects Photosynthetic and Plant Nitrogen Use Efficiency under Nitrogen Stress. *Plant Physiology*, 178(1), 174-188. <https://doi.org/10.1104/pp.18.00597>
- Pereira, I. I. S. (2020). *Produção de tomate de indústria com elevada eficiência azotada* [ISA].
- Perez-Harguindeguy, N., Diaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M., Cornwell, W., Craine, J., & Gurvich, D. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. Bot.* 61, 167–234. In.

- Perin, L., Peil, R. M. N., Trentin, R., Streck, E. A., da Rosa, D. S. B., Hohn, D., & Schaun, W. S. (2018). Solar radiation threshold and growth of mini tomato plants in mild autumn/winter condition. *Scientia Horticulturae*, 239, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.037>
- Peripolli, M., SILVA, A. C. F. D., Dornelles, S. H. B., SANCHOTENE, D., & Trivisio, V. S. (2020). USE OF SEED+® AND CROP+® BIOESTIMULANTS ON THE QUALITY OF TOMATO FRUITS UNDER WATER STRESS. *Revista Caatinga*, 33, 266-273. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n129rc>
- Rahman, K. M. A., & Zhang, D. F. (2018). Effects of Fertilizer Broadcasting on the Excessive Use of Inorganic Fertilizers and Environmental Sustainability. *Sustainability*, 10(3), Article 759. <https://doi.org/10.3390/su10030759>
- Rasool, G., Guo, X. P., Wang, Z. C., Ali, M. U., Chen, S., Zhang, S. X., Wu, Q. J., & Ullah, M. S. (2020). Coupling fertigation and buried straw layer improves fertilizer use efficiency, fruit yield, and quality of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 239, Article 106239. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106239>
- Ren, X. L., Weitzel, M., O'Neill, B. C., Lawrence, P., Meiyappan, P., Levis, S., Balistreri, E. J., & Dalton, M. (2018). Avoided economic impacts of climate change on agriculture: integrating a land surface model (CLM) with a global economic model (iPETS). *Climatic Change*, 146(3-4), 517-531. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1791-1>
- Rouphael, Y., Raimondi, G., Lucini, L., Carillo, P., Kyriacou, M. C., Colla, G., Cirillo, V., Pannico, A., El-Nakhel, C., & De Pascale, S. (2018). Physiological and Metabolic Responses Triggered by Omeprazole Improve Tomato Plant Tolerance to NaCl Stress [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 9(249). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00249>
- Sá, F. E. S. C. e. (2021). *Estratégias sustentáveis para o aumento da eficiência do uso da água e de azoto em tomate (Solanum lycopersicum L.)* [Dissertação, Universidade do Porto]. Porto. <https://hdl.handle.net/10216/139035>
- Sacks, M., Byrne, D., & McConnell, E. (2022). Bromide intoxication in a 3-year-old Thoroughbred filly. *Equine Veterinary Education*, 34(9), e359-e362. <https://doi.org/10.1111/eve.13603>
- Salvi, L., Brunetti, C., Cataldo, E., Niccolai, A., Centritto, M., Ferrini, F., & Mattii, G. B. (2019). Effects of *Ascophyllum nodosum* extract on *Vitis vinifera*: Consequences on plant physiology, grape quality and secondary metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.002>
- Santos, A. J. d. A. (2017). *Princípios de rega agrícola*. Publindústria, Edições Técnicas.
- Sarker, M. R., Choudhury, S., Islam, N., Zeb, T., Zeb, B. S., & Mahmood, Q. (2020). The effects of climatic change mediated water stress on growth and yield of tomato. *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*, 1(2), 85-92.
- Scholberg, J., McNeal, B. L., Boote, K. J., Jones, J. W., Locascio, S. J., & Olson, S. M. (2000). Nitrogen stress effects on growth and nitrogen accumulation by field-

- grown tomato. *Agronomy Journal*, 92(1), 159-167. <Go to ISI>://WOS:000089407800024
- Semenov, M. V., Krasnov, G. S., Semenov, V. M., & van Bruggen, A. H. C. (2020). Long-term fertilization rather than plant species shapes rhizosphere and bulk soil prokaryotic communities in agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, 154, Article 103641. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103641>
- Sestili, F., Roupahel, Y., Cardarelli, M., Pucci, A., Bonini, P., Canaguier, R., & Colla, G. (2018). Protein hydrolysate stimulates growth in tomato coupled with N-dependent gene expression involved in N assimilation. *Frontiers in plant science*, 9, 1233. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01233>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, 32(2), 287-302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sharma, N., & Singhvi, R. (2017). Effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment: a review. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 10(6), 675-680. <https://doi.org/10.5958/2230-732X.2017.00083.3>
- Shi, Y., Zhang, Y., Han, W., Feng, R., Hu, Y., Guo, J., & Gong, H. (2016). Silicon Enhances Water Stress Tolerance by Improving Root Hydraulic Conductance in *Solanum lycopersicum* L [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 7(196). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00196>
- Shibuya, T., Nishiyama, M., Kato, K., & Kanayama, Y. (2021). Characterization of the FLAVIN-BINDING, KELCH REPEAT, F-BOX 1 Homolog SIFKF1 in Tomato as a Model for Plants with Fleshy Fruit. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), 1735. <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/4/1735>
- Shin, J. M., Munson, K., Vagin, O., & Sachs, G. (2009). The gastric HK-ATPase: structure, function, and inhibition. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, 457(3), 609-622. <https://doi.org/10.1007/s00424-008-0495-4>
- Sibomana, I., Aguyoh, J., & Opiyo, A. (2013). Water stress affects growth and yield of container grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) plants. *Gjbb*, 2(4), 461-466.
- Silva, J. M. P. D. A. d. (2019). *Metodologias para a condução da rega na cultura do tomate industrial na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira* ISA/UL].
- Silva, M. M. d. (2016). *Estudo e quantificação dos resíduos da rega da cultura do tomate* ISA-UL].
- Sousa, D. G. C. (2019). *Efeitos de stress combinado de água e azoto em tomate (cv.'Micro-Tom')* [Dissertação, Universidade do Porto]. Porto.
- Sun, H., Shi, Q., Zhang, S. B., & Huang, W. (2022). The response of photosystem I to fluctuating light is influenced by leaf nitrogen content in tomato. *Environmental*

and *Experimental Botany*, 193, Article 104665.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104665>

- Sun, L., Chen, J., Xiao, K., & Yang, W. C. (2017). Origin of the Domesticated Horticultural Species and Molecular Bases of Fruit Shape and Size Changes during the Domestication, Taking Tomato as an Example. *Horticultural Plant Journal*, 3(3), 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2017.07.007>
- Suniaga Quijada, J., Bonafous, M., & Dumas, Y. (1991). Growth and development of young tomato plants under nitrogen deficiency. IV International Symposium on Processing Tomatoes 301,
- Suzuki, M., Umeda, H., Matsuo, S., Kawasaki, Y., Ahn, D., Hamamoto, H., & Iwasaki, Y. (2015). Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Scientia Horticulturae*, 187, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.035>
- Sweadner, K. J., & Donnet, C. (2001). Structural similarities of Na,K-ATPase and SERCA, the Ca²⁺-ATPase of the sarcoplasmic reticulum. *Biochemical Journal*, 356(3), 685-704. <https://doi.org/10.1042/bj3560685>
- Tavallali, V., Esmaili, S., & Karimi, S. (2018). Nitrogen and potassium requirements of tomato plants for the optimization of fruit quality and antioxidative capacity during storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(2), 755-762. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9689-9>
- Tembe, K. O., Chemining'wa, G. N., Ambuko, J., & Owino, W. (2017). Effect of water stress on yield and physiological traits among selected African tomato (*Solanum lycopersicum*) land races.
- Ting-ting, W., Zai-qiang, Y., Ming-tian, W., He-li, Z., Xu-ran, Z., Jia-shuai, L., Qing, S., & Lin, W. (2019). Effects of high temperature and different air humidity on water physiology of flowering tomato seedlings. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 40(05), 317.
- Ullah, I., Mao, H., Rasool, G., Gao, H., Javed, Q., Sarwar, A., & Khan, M. I. (2021). Effect of Deficit Irrigation and Reduced N Fertilization on Plant Growth, Root Morphology and Water Use Efficiency of Tomato Grown in Soilless Culture. *Agronomy*, 11(2), 228. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/2/228>
- Urlić, B., Runjić, M., Mandušić, M., Žanić, K., Vuletin Selak, G., Matešković, A., & Dumičić, G. (2020). Partial root-zone drying and deficit irrigation effect on growth, yield, water use and quality of greenhouse grown grafted tomato. *Agronomy*, 10(9), 1297. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091297>
- Urrestarazu, M., Najera, C., & Gea, M. D. (2016). Effect of the Spectral Quality and Intensity of Light-emitting Diodes on Several Horticultural Crops. *Hortscience*, 51(3), 268-271. <https://doi.org/10.21273/hortsci.51.3.268>
- Valle-Castillo, C., Valdez-Morales, M., Medina-Godoy, S., Segoviano-León, J., García-Ulloa, M., Valverde-Juárez, F., & Espinosa-Alonso, L. (2021). Physicochemical, microbiological and nutritional quality of a tomato industrial by-product and its valorization as a source of oil rich in carotenoids. *Agroproductividad*, 14(1).

- Van Oosten, M. J., Dell'Aversana, E., Ruggiero, A., Cirillo, V., Gibon, Y., Woodrow, P., Maggio, A., & Carillo, P. (2019). Omeprazole Treatment Enhances Nitrogen Use Efficiency Through Increased Nitrogen Uptake and Assimilation in Corn [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 10(1507). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01507>
- Van Oosten, M. J., Silletti, S., Guida, G., Cirillo, V., Di Stasio, E., Carillo, P., Woodrow, P., Maggio, A., & Raimondi, G. (2017). A Benzimidazole Proton Pump Inhibitor Increases Growth and Tolerance to Salt Stress in Tomato [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 8(1220). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01220>
- Vishal, M. K., Banerjee, B., Saluja, R., Raju, D., Chinnusamy, V., Kumar, S., Sahoo, R. N., Adinarayana, J., & Ieee. (2020, Sep 26-Oct 02). LEAF COUNTING IN RICE (*ORYZA SATIVA* L.) USING OBJECT DETECTION: A DEEP LEARNING APPROACH. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing IGARSS* [Igarss 2020 - 2020 ieee international geoscience and remote sensing symposium]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Electr Network.
- Vitale, L., Tedeschi, A., Polimeno, F., Ottaiano, L., Maglione, G., Arena, C., De Marco, A., & Magliulo, V. (2018). Water regime affects soil N₂O emission and tomato yield grown under different types of fertilisers. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 74-79. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.989>
- Volpe, V., Chitarra, W., Cascone, P., Volpe, M. G., Bartolini, P., Moneti, G., Pieraccini, G., Di Serio, C., Maserti, B., Guerrieri, E., & Balestrini, R. (2018). The Association With Two Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi Differently Affects Water Stress Tolerance in Tomato [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 9(1480). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01480>
- Wang, J., Villar-Salvador, P., Li, G., & Liu, Y. (2018a). Moderate water stress does not inhibit nitrogen remobilization, allowing fast growth in high nitrogen content *Quercus variabilis* seedlings under dry conditions. *Tree Physiology*, 39(4), 650-660. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy130>
- Wang, X. K., & Xing, Y. Y. (2016). Evaluation of the Effect of Irrigation and Fertilization by Drip Fertigation on Tomato Yield and Water Use Efficiency in Greenhouse. *International Journal of Agronomy*, 2016, Article Unsp 3961903. <https://doi.org/10.1155/2016/3961903>
- Wang, X. K., & Xing, Y. Y. (2017). Evaluation of the effects of irrigation and fertilization on tomato fruit yield and quality: a principal component analysis. *Scientific Reports*, 7, Article 350. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00373-8>
- Wang, X. K., Yun, J., Shi, P., Li, Z. B., Li, P., & Xing, Y. Y. (2019). Root Growth, Fruit Yield and Water Use Efficiency of Greenhouse Grown Tomato Under Different Irrigation Regimes and Nitrogen Levels. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 400-415. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9850-7>
- Wang, Y., Zhu, Y. C., Zhang, S. X., & Wang, Y. Q. (2018b). What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? *Journal of Cleaner Production*, 199, 882-890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.222>

- Wang, Y. Y., Zhang, P., Li, M. S., Guo, Z. L., Ullah, S., Rui, Y. K., & Lynch, I. (2020). Alleviation of nitrogen stress in rice (*Oryza sativa*) by ceria nanoparticles. *Environmental Science-Nano*, 7(10), 2930-2940. <https://doi.org/10.1039/d0en00757a>
- Wemans, A. M. P. (2017). *Influência da gestão da rega e da fertilização na cultura de tomate de indústria na Região do Ribatejo ISA*.
- Wu, Y., Yan, S. C., Fan, J. L., Zhang, F. C., Xiang, Y. Z., Zheng, J., & Guo, J. J. (2021). Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation. *Scientia Horticulturae*, 275, Article 109710. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109710>
- Wu, Y. W., Li, Q., Jin, R., Chen, W., Liu, X. L., Kong, F. L., Ke, Y. P., Shi, H. C., & Yuan, J. C. (2019). Effect of low-nitrogen stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of maize cultivars with different low-nitrogen tolerances. *Journal of integrative agriculture*, 18(6), 1246-1256. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(18\)62030-1](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62030-1)
- Xu, P., Chen, A., Houlton, B. Z., Zeng, Z., Wei, S., Zhao, C., Lu, H., Liao, Y., Zheng, Z., & Luan, S. (2020). Spatial variation of reactive nitrogen emissions from China's croplands codetermined by regional urbanization and its feedback to global climate change. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2019GL086551. <https://doi.org/10.1029/2019GL086551>
- Yang, H., Cao, H. X., Hao, X. M., Guo, L. J., Li, H. Z., & Wu, X. Y. (2017). Evaluation of tomato fruit quality response to water and nitrogen management under alternate partial root-zone irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(5), 85-94. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171005.2622>
- Yuan, X. K., Yang, Z. Q., Li, Y. X., Liu, Q., & Han, W. (2016). Effects of different levels of water stress on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of greenhouse tomato. *Photosynthetica*, 54(1), 28-39. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0122-5>
- Zahoor, S. A., Ahmad, S., Ahmad, A., Wajid, A., Khaliq, T., Mubeen, M., Hussain, S., Din, M. S. U., Amin, A., & Awais, M. (2019). Improving water use efficiency in agronomic crop production. *Agronomic crops*, 13-29. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_2
- Zhang, D. L., Jiao, X. C., Du, Q. J., Song, X. M., & Li, J. M. (2018a). Reducing the excessive evaporative demand improved photosynthesis capacity at low costs of irrigation via regulating water driving force and moderating plant water stress of two tomato cultivars. *Agricultural Water Management*, 199, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.11.014>
- Zhang, Y., Shi, Y., Gong, H. J., Zhao, H. L., Li, H. L., Hu, Y. H., & Wang, Y. C. (2018b). Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *Journal of integrative agriculture*, 17(10), 2151-2159. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62038-6)
- Zhang, Z., Cao, B., Gao, S., & Xu, K. (2019). Grafting improves tomato drought tolerance through enhancing photosynthetic capacity and reducing ROS accumulation. *Protoplasma*, 256(4), 1013-1024. <https://doi.org/10.1007/s00709-019-01357-3>

- Zhang, Z., Han, M., Zhang, Y., Wang, Y., Liu, C., Cao, B., & Xu, K. (2017). Effect of water stress on development and H₂O and CO₂ exchange in leaves of tomato grafted with different drought resistant rootstocks. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(2), 391-398.
- Zhao, F., Yoshida, H., Goto, E., & Hikosaka, S. (2022). Development of an Irrigation Method with a Cycle of Wilting–Partial Recovery Using an Image-Based Irrigation System for High-Quality Tomato Production. *Agronomy*, 12(6), 1410. <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/6/1410>
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A., & Munne-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289, Article 110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>