

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Aplicação de calcário, gesso agrícola e fósforo afeta o metabolismo vegetal de plantas de tomate: um estudo ecofisiológico

Ednângelo Duarte Pereira
Doctor Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024

EDNÂNGELO DUARTE PEREIRA

Aplicação de calcário, gesso agrícola e fósforo afeta o metabolismo vegetal de plantas de tomate: um estudo ecofisiológico

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Derly J. H. da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P436a
2024

Pereira, Ednângelo Duarte, 1988-

Aplicação de calcário, gesso agrícola e fósforo afeta o metabolismo vegetal de plantas de tomate: um estudo ecofisiológico / Ednângelo Duarte Pereira. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (77 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Derly José Henriques da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.472>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Solanum lycopersicum*. 2. Estresse (Fisiologia). 3. Solos - Manejo. 4. Irrigação. 5. Fotossíntese. I. Silva, Derly José Henriques da, 1961-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 635.642

EDNÂNGELO DUARTE PEREIRA

Aplicação de calcário, gesso agrícola e fósforo afeta o metabolismo vegetal de plantas de tomate: um estudo ecofisiológico

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 24 de julho de 2024.

Assentimento:

Ednângelo Duarte Pereira
Autor

Derly Jose Henriques da Silva
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 13/08/2026 às 17:00:22 e pelo orientador em 13/08/2026 às 17:06:06. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **FU3O.66HD.7WXY** e clique no botão 'Validar documento'.

A Helena, Edil, Angélica, Isabelly e Edicarlos (in memoriam) as pessoas que são a
minha base

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a vida, que me permitiu conhecer pessoas maravilhosas, que fazem ou fizeram parte da minha vida.

A toda a minha família, especialmente aos meus pais Edil e Helena, aos meus irmãos Angelica e Edicarlos (in memoriam) e a minha sobrinha Isabelly que são as pessoas mais importantes na minha vida.

A todos os professores que passaram pelo meu caminho e contribuíram com um pouquinho de si, deixando suas marcas e aprendizados que me tornaram uma pessoa melhor. Em especial aos professores da UFV por todo o conhecimento compartilhado.

Ao Professor Derly, uma pessoa ímpar na minha formação, sempre contribuindo com sua sabedoria e sempre fazendo as perguntas mais difíceis, as quais muito contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos membros da banca, Albanise Marinho, Herika Pessoa, Samuel Valadares, Toshik Iarley, por terem aceitado o convite e fazerem parte deste momento.

Ao grupo GPEAM que colaborou muito com este trabalho, seja com discussões, análises de campo e laboratório ou mesmo aquele café no meio do dia, de onde saíam muitas boas ideias e risadas.

A todos os funcionários da UFV, em especial aos funcionários do PPG-FIT, Jamilton e Lídia e aos funcionários da Horta velha Adriano, Alex, Anderson, Reginaldo os quais possuem participação direta nessa tese, sem o esforço e o auxílio de todos, jamais conseguiria.

E a todos que auxiliaram de forma direta e indireta durante a minha trajetória, seja com boas risadas, festas, estudos. Saibam que vocês são fundamentais em minha vida.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

PEREIRA, Ednângelo Duarte, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2024. **Aplicação de calcário, gesso agrícola e fósforo afeta o metabolismo vegetal de plantas de tomate: um estudo ecofisiológico.** Orientador: Derly Jose Henriques da Silva.

Um dos maiores desafios das últimas décadas é fornecer alimentos suficientes para alimentar a crescente população mundial; ao mesmo tempo que os recursos de água doce disponíveis para a agricultura se tornam limitados. No entanto, a gestão eficaz para aumentar a eficiência de uso dos nutrientes também tem um papel fundamental para melhorar a qualidade e a quantidade da produção. Estratégias combinadas de manejo de água e solo podem ser práticas de combate importantes para superar esses desafios. O déficit hídrico controlado é uma técnica utilizada para economizar água, aumentar a eficiência do uso da água e de nutrientes nas plantas. Esta prática pode ser potencializada quando combinada com o manejo do solo. Além disso, a melhoria da arquitetura do sistema radicular e a melhoria da absorção de água e nutrientes em zonas mais profundas podem ser alcançadas através da aplicação de fósforo em profundidade. No entanto, há escassez de estudos que avaliem o efeito integrado de diferentes práticas de manejo de água e solo na arquitetura do sistema radicular, variáveis fotossintéticas, variáveis de estresse oxidativo e acúmulo de solutos compatíveis de tomateiro destinado à indústria.

Diante do exposto, a presente tese possui dois capítulos. O primeiro capítulo teve como objetivo avaliar diferentes frequências de irrigação diária (I1) e a cada sete dias (I7) e manejos de solo com aplicação exclusiva de calcário (SM1); calcário + gesso agrícola (SM2); calcário + gesso agrícola + fósforo aplicado em profundidade (SM3) no aprofundamento radicular e como esta característica poderia alterar o potencial hídrico foliar, a fotossíntese e a produção do tomateiro. A frequência I7 combinada com o manejo de solo SM3 aumentou a arquitetura do sistema radicular em profundidade, melhorou o estado hídrico da planta, aprimorou as trocas gasosas e, conseqüentemente, aumentou a produtividade de frutos de tomate. Com relação ao segundo capítulo o objetivo foi avaliar ao longo do dia o papel benéfico do uso integrado da calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado em profundidade na biossíntese de pigmentos fotossintéticos, fotossíntese, biossíntese de prolina e alívio do estresse oxidativo causados pelo déficit de irrigação controlado em plantas de tomate. As estratégias de solo calcário + gesso agrícola (SM2); calcário + gesso agrícola + fósforo aplicado em

profundidade (SM3) combinadas a frequência de irrigação de sete dias (I7) melhorou o declínio no índice de clorofilas e fotossíntese ao longo do dia. O acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), prolina e o conteúdo de componentes antioxidantes não enzimáticos também foram reduzidas com uso de SM2 e SM3 tanto em condições de irrigação diária como em sete dias. Esses resultados reforçam o potencial uso das estratégias de manejo do solo SM2 e SM3 combinadas com irrigação de sete dias, promovendo maior produtividade e resiliência a condições ambientais adversas em plantas de tomate cultivadas a campo.

Palavras-chave: estresse abiótico; fotossíntese; manejo do solo; irrigação com déficit regulado; *Solanum lycopersicum* L.

ABSTRACT

PEREIRA, Ednângelo Duarte, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2024. **Application of limestone, gypsum and phosphorus affects plant metabolism of tomato plants: an ecophysiological study.** Adviser: Derly Jose Henriques da Silva.

One of the biggest challenges of recent decades is providing enough food to feed the world's growing population, while at the same time freshwater resources available for agriculture become limited. However, effective management to increase nutrient use efficiency also plays a fundamental role in improving the quality and quantity of production. Combined water and soil management strategies can be important combative practices to overcome these challenges. Controlled water deficit is a technique used to save water and increase the efficiency of water and nutrient use in plants. This practice can be enhanced when combined with soil management. Furthermore, improving root system architecture and improving water and nutrient absorption in deeper zones can be achieved through deep application of phosphorus. However, there is a lack of studies that evaluate the integrated effect of different water and soil management practices on the architecture of the root system, photosynthetic parameters, oxidative stress parameters and accumulation of compatible solutes in tomato plants destined for industry. Given the above, this thesis has two chapters. The first chapter aimed to evaluate different frequencies of daily irrigation (I1) and every seven days (I7) and soil management with exclusive application of limestone (SM1); limestone + agricultural gypsum (SM2); limestone + agricultural gypsum + phosphorus applied in depth (SM3) in root deepening and how this characteristic could alter leaf water potential, photosynthesis and tomato production. The results revealed that the I7 frequency combined with SM3 soil management increased the architecture of the root system in depth, maintained a better water status of the plant, improved gas exchange and consequently increased the productivity of tomato fruits. Regarding the second chapter, the objective was to evaluate throughout the day the beneficial role of the integrated use of limestone, agricultural gypsum and phosphorus applied in depth in the biosynthesis of photosynthetic pigments, photosynthesis, proline biosynthesis and relief of oxidative stress caused by irrigation deficit controlled in tomato plants. The results showed that the strategies of limestone soil + agricultural gypsum (SM2); limestone + agricultural gypsum + deeply applied phosphorus (SM3) combined with a seven-day irrigation frequency (I7) improved the decline in chlorophyll index and photosynthesis throughout the day. The accumulation of reactive oxygen

species (ROS), proline and the content of non-enzymatic antioxidant components were also reduced with the use of SM2 and SM3 both under daily and seven-day irrigation conditions. These findings reinforce the potential of using of soil management strategies SM2 and SM3, combined with a seven-day irrigation interval, to promote higher productivity and resilience to adverse environmental conditions in field-grown tomato plants.

Keywords: abiotic stress; photosynthesis; soil management; regulated deficit irrigation; *Solanum lycopersicum* L

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	14
CAPÍTULO 1	18
1. INTRODUÇÃO	21
2. MATERIAL E MÉTODOS	23
2.1. Área de estudo	23
2.2. Delineamento experimental e tratamentos	24
2.3. Preparo de mudas e manejo da cultura	25
2.4. Manejo da irrigação	25
2.5. Gradiente hídrico e térmico do solo	26
2.6. Amostragem de raízes e medidas morfológicas	27
2.7. Relações hídricas	27
2.8. Trocas gasosas	28
2.9. Produtividade	28
3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
4. RESULTADOS	28
5. DISCUSSÃO	38
6. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO 2	50
1. INTRODUÇÃO	53
2. MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1. Descrição da planta e delineamento experimental	55
2.2. Preparo do solo e plantio	55
2.3. Manejo da irrigação	57
2.4. Condições do tempo	58
2.5. Análise do Índice de clorofila	59
2.6. Trocas gasosas	59
2.7. Análises bioquímicas	59
2.8. Análises estatísticas	61

3. RESULTADOS	61
4. DISCUSSÃO	67
5. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICE.....	76

INTRODUÇÃO GERAL

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é cultivado no mundo todo, devido sua importância socioeconômica e nutricional (Tang et al. 2020). Pode ser consumido in natura ou processado, na forma de molhos, extratos, purês, conservas, desidratados, sopas, dentre outros (Sidhu et al. 2019). É uma planta herbácea pertencente à família Solanaceae, originária da Cordilheira dos Andes, na região entre Equador e Chile (Clemente e Boiteux, 2012).

Em 2018 foram produzidos mundialmente 182 milhões de toneladas de tomate, e aproximadamente 38 milhões de toneladas foram destinadas ao processamento. A China lidera o ranking de maior produtor com aproximadamente 60 milhões de toneladas, produção superior a brasileira, décima do ranking, que é de 4,2 milhões de toneladas (Faostat, 2019; Wptc, 2019). Nos últimos 50 anos houve um grande incremento na produtividade da cultura, e é esperado que esse aumento continue ocorrendo devido à utilização de novas cultivares, aumento da tecnologia empregada na produção e no processamento, resultando em melhoria da qualidade (Euro Fresh Distribution, 2016). Entretanto, diversos fatores causadores de estresses às plantas como períodos de seca, temperaturas muito baixas no inverno ou muito elevadas no verão ou solos com problema de salinidade são fatores que limitam fortemente a produção agrícola em escala global (Lambers e Oliveira, 2019).

A baixa disponibilidade de água e nutrientes são os fatores mais limitantes à produtividade de muitos ecossistemas naturais, particularmente em regiões tropicais (Ali et al. 2019). Além disso, perdas na produção agrícola devido ao estresse hídrico excedem as perdas devido a todos os outros fatores bióticos e ambientais combinados (Felton et al. 2020). Assim, para explicar os padrões de produtividade ou aumentar a produtividade das culturas, é crucial compreender os controles sobre as relações hídricas e as consequências de um suprimento inadequado de água e nutrientes para o crescimento das plantas.

O decréscimo na disponibilidade hídrica ocasiona queda no potencial de água nas folhas, levando a perda de turgescência e fechamento estomático, como consequência, a taxa fotossintética é reduzida (Ferraz et al. 2012). Os estômatos possuem a função de otimizar a taxa de difusão de CO₂ na folha para a fotossíntese, reduzindo simultaneamente a taxa de perda de água mediante a transpiração (Leakey et al. 2009). Contudo, a regulação eficiente da abertura estomática é essencial, para que não ocorra perda excessiva de água na transpiração e nem limitação na entrada de CO₂. Esta regulação pode ser alcançada mediante controle da sensibilidade das células-guarda em relação aos sinais ambientais e endógenos (Anjum et al. 2011). O excesso de água no solo, por outro lado, impede o suprimento de oxigênio, a respiração

das raízes, captação de água e a condutância hidráulica, o que resulta no fechamento estomático (Aroca et al. 2011; Limani et al. 2014). Sob essas condições, o fechamento estomático resulta na redução da fotossíntese líquida, devido à diminuição da condutância estomática, fluorescência da clorofila e teor de clorofila das folhas (Zhu et al. 2016).

A oferta da água para as plantas nas regiões tropicais é bastante comprometida, principalmente nas primeiras camadas do solo, tornando importante desenvolver um sistema de produção que maximize a absorção de água, para que o metabolismo da planta não seja afetado (Christina et al. 2018). Estes processos têm sido o foco das mais variadas pesquisas no mundo, com destaque para o uso eficiente da água, nutrientes e CO₂ (Zhu et al. 2016; Fara et al. 2019; Guo et al. 2019; Fanourakis et al. 2020; Lawson e Matthews, 2020). A utilização eficiente de CO₂, água e nutrientes pelas plantas são controlados pela manutenção da abertura estomática (Almeida et al. 2017), condição que pode ser alcançada utilizando práticas de manejo que garantam que níveis adequados destes recursos estejam sendo absorvidos e utilizados eficientemente pela planta.

A variação na disponibilidade hídrica no solo gera uma rede complexa de mudanças morfológicas e fisiológicas na planta (Morales et al. 2015). O déficit de água regulado promove maior alocação relativa de fotoassimilados para o crescimento radicular, resultando em plantas mais resilientes, com raízes mais profundas, garantindo maior capacidade de absorção de água e nutrientes (Jin et al. 2014; Kozłowski e Pallardy, 2002). A dimensão, a distribuição e a densidade radicular são fatores determinantes para absorção de água e nutrientes (Kahlon e Khurana, 2017). Neste sentido, manejos que conferem maior eficiência às culturas para aumentar a capacidade de captação de água e nutrientes têm recebido maior atenção na agricultura moderna (Fara et al. 2019).

O uso integrado de estratégias de manejo de irrigação e fertilização apropriadas podem aumentar significativamente a produtividade dos frutos de tomate. O tomateiro tem a capacidade de se adaptar morfológicamente a ambientes tanto com extrema escassez como em ambientes com excesso de água (Preece e Peñuelas, 2016) e isto muitas vezes depende de um melhor crescimento das raízes e das condições de umidade do solo (Koevoets et al. 2016). Isso ocorre porque uma boa estrutura de raiz beneficiará a absorção de nutrientes pelas plantas e ajudará a obter maior área foliar, e consequentemente, mais matéria seca (Ayi et al. 2016; Faucon et al. 2017).

Na prática, é um fato bem conhecido que a maioria das raízes das plantas requer um suprimento adequado e contínuo de água e nutrientes do solo para crescer, se desenvolver e funcionar normalmente. Em outras palavras, as raízes atuam como dutos que ajudam na

translocação da umidade e dos nutrientes absorvidos do solo para os órgãos nutritivos e reprodutivos das plantas. Portanto, é necessário quantificar a distribuição radicular em diferentes condições para compreender os processos de absorção de água e nutrientes do solo (Gregory 1979). O progresso na compreensão desses processos foi inibido pela dificuldade dos métodos envolvendo os estudos dos complexos sistemas radiculares. No entanto, muitos pesquisadores tentam resolver esse problema. Zotarelli et al. (2009) relataram que o comprimento da raiz e a distribuição da densidade foram afetados por quantidades variáveis de irrigação. Da mesma forma, do Rosário et al. (1996) observou uma proporção maior de raízes foi distribuída em áreas úmidas próximas do gotejador, enquanto quantidades menores foram encontradas a uma distância maior dos gotejadores. Além disso, um suprimento preciso de N combinado com uma boa irrigação reduziu a perda por lixiviação de nitrato-N, ajudando o sistema radicular a crescer de forma saudável e com melhor absorção de nutrientes, garantindo assim aumentos de produtividade (Wang et al. 2019).

Embora muitas informações estejam disponíveis sobre a combinação de irrigação e fertilização controlando a produção de frutos e características de qualidade (Pascale et al. 2001; Topçu et al. 2007; Zaller 2007; Akhtar et al. 2014; Li et al. 2017;), muito pouco se sabe como as modificações na arquitetura do sistema radicular, estado nutricional das plantas e as trocas gasosas são afetadas por diferentes manejos de solo e frequências de irrigação. Responder a essas perguntas ajudará a maximizar a eficiência do uso da água e de fertilizantes para a produção de tomate e dará uma melhor compreensão da inter-relação entre a produção de frutos e as características da raiz em condições de solo com fertilidade quimicamente corrigida.

Diante do exposto, a presente tese teve como objetivo *i)* analisar a influência de intervalos de irrigação e de manejos do solo no crescimento radicular para favorecer a manutenção da abertura estomática e produção de tomateiro para processamento; *ii)* relacionar indicadores fisiológicos (clorofila, fotossíntese, condutância estomática, transpiração) e bioquímicos (concentração de peróxido de hidrogênio, óxido nítrico, compostos fenólicos e prolina) aos diferentes intervalos de irrigação e manejos do solo em diferentes horários ao longo do dia.

REFERÊNCIAS

- Akhtar, S.S., Li, G., Andersen, M.N., Liu, F. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, 37-44.
- Ali, A., Lin, S.L., He, J.K., Kong, F.M., Yu, J.H., Jiang, H.S. 2019. Climatic water availability is the main limiting factor of biotic attributes across large-scale elevational gradients in tropical forests. *Science of The Total Environment*, 647, 1211-1221.
- Almeida, V.S., Delazari, F.T., Nick, C., Araújo, W.L., Silva, D.J.H. 2017. Optimizing yields in tomato cultivation: maximizing tomato plant use of resources Universidade Federal de Viçosa, Brazil. In *Achieving sustainable cultivation of tomatoes*, Burleigh Dodds Science Publishing, 45-62.
- Anjum, S.A., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M.F., Man, C., Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Aroca, R., Porcel, R., Ruiz-Lozano, J.M. 2011. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. *Journal of experimental botany*, 63(1), 43-57.
- Ayi, Q., Zeng, B., Liu, J., Li, S., van Bodegom, P.M., Cornelissen, J.H. 2016. Oxygen absorption by adventitious roots promotes the survival of completely submerged terrestrial plants. *Annals of Botany*, 118(4), 675-683.
- Christina, M., le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordon, B., Battie-Laclau, P., Goncalves, J.L.M., Delgado-Rojas, J.S., Bouillet, J.P., Laclau, J.P. 2018. Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. *Forest Ecology and Management*. 148, 4–14.
- Clemente, F., Boiteux, L.S. 2012. *Produção de tomate para processamento industrial*. Brasília: Embrapa, 2012.
- Distribution, E.F. Consumer satisfaction key to increasing tomato consumption. Disponível em: <<https://www.eurofresh-distribution.com/news/consumer-satisfaction-key-increasing-tomato-consumption>>.
- do Rosário, M.G.O., Calado, A.M., Portas, C.A.M. 1996. Tomato root distribution under drip irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural science*, 121(4), 644-648.
- Fanourakis, D., Aliniaefard, S., Sellin, A., Giday, H., Körner, O., Nejad, A.R., Delis, C., Bouranis, D., Kouboris G., Kambourakis, E., Nikoloudakis, N., Tsaniklidis, G. (2020).

Stomatal behavior following mid-or long-term exposure to high relative air humidity: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 153, 92-105.

Faostat. 2019. Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/> (Accessed 19 sept. 2019).

Fara, S.J., Delazari, F.T., Gomes, R.S., Araújo, W.L., da Silva, D.J.H. 2019. Stomata opening and productiveness response of fresh market tomato under different irrigation intervals. *Scientia Horticulturae*, 255, 86-95.

Faucon, M.P., Houben, D., Lambers, H. 2017. Plant functional traits: soil and ecosystem services. *Trends in plant science*, 22(5), 385-394.

Felton, A.J., Slette, I.J., Smith, M.D., Knapp, A.K. 2020. Precipitation amount and event size interact to reduce ecosystem functioning during dry years in a mesic grassland. *Global Change Biology*, 26(2), 658-668.

Ferraz, R.L.D.S., Melo, A.S.D., Suassuna, J.F., Brito, M.E.B.D., Fernandes, P.D., Júnior, N., da Silva, E. 2012. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 42(2), 181-188.

Gregory, P.J. 1979. A periscope method for observing root growth and distribution in field soil. *Journal of Experimental Botany*, 30(1), 205-214.

Guo, Z.F., Zhan, L., Zhang, Y., Li, J.J., Zhao, M.H., Xu, Z.J., Li, M.M. 2019. A review: molecular regulation of stomatal development related to environmental factors and hormones in plants. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5), 12091-12109.

Jin, K., Shen, J., Ashton, R.W., White, R.P., Dodd, I. C., Parry, M. A., Whalley, W.R. 2015. Wheat root growth responses to horizontal stratification of fertiliser in a water-limited environment. *Plant and Soil*, 386(1-2), 77-88.

Kahlon, M.S., Khurana, K. 2017. Effect of land management practices on physical properties of soil and water productivity in wheatmaize system of northwest India. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(4), 1-13.

Koevoets, I.T., Venema, J.H., Elzenga, J.T., Testerink, C. 2016. Roots withstanding their environment: exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1335.

Kozłowski, T.T., Pallardy, S.G. 2002. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *The botanical review*, 68(2), 270-334.

Lambers, H., Oliveira, R.S. 2019. Plant water relations. In *Plant physiological ecology*, Springer, Cham, 187–263.

Lawson, T., Matthews, J. 2020. Guard cell metabolism and stomatal function. *Annual review of plant biology*, 71, 273-302.

Leakey, A.D., Ainsworth, E.A., Bernacchi, C.J., Rogers, A., Long, S.P., Ort, D.R. 2009. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of experimental botany*, 60(10), 2859-2876.

Li, Y., Sun, Y., Liao, S., Zou, G., Zhao, T., Chen, Y., Yang, J., 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.

Morales, R.G.F., Resende, L.V., Bordini, I.C., Galvão, A.G., Rezende, F.C. 2015. Caracterização do tomateiro submetido ao déficit hídrico. *Scientia Agraria*, 16(1), 9-17.

Pascale, S.D., Maggio, A., Fogliano, V., Ambrosino, P., Ritieni, A. 2001. Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76(4), 447-453.

Preece, C., Peñuelas, J. 2016. Rhizodeposition under drought and consequences for soil communities and ecosystem resilience. *Plant and Soil*, 409(1-2), 1-17.

Sidhu, G.K., Singh, M., Kaur, P. 2019. Effect of operational parameters on physicochemical quality and recovery of spray-dried tomato powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10), e14120.

Tang, H., Zhang, X., Gong, B., Yan, Y., Shi, Q. 2020. Proteomics and metabolomics analysis of tomato fruit at different maturity stages and under salt treatment. *Food Chemistry*, 311, 126009.

Topçu, S., Kirda, C., Dasgan, Y., Kaman, H., Çetin, M., Yazici, A., Bacon, M.A. 2007. Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*, 26(1), 64-70.

Wang, X., Yun, J., Shi, P., Li, Z., Li, P., Xing, 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.

Wptc. world production estimate. Disponível em: <<https://www.wptc.to/releases-wptc.php?PHPSESSID=f3e44b35cda7deb32be85e2eb488ece1>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

Zaller, J.G. 2007. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *Scientia Horticulturae*, 112(2), 191-199.

Zhu, M., Jeon, B.W., Geng, S., Yu, Y., Balmant, K., Chen, S., Assmann, S.M. 2016. Preparation of epidermal peels and guard cell protoplasts for cellular, electrophysiological, and omics assays of guard cell function. In *Plant Signal Transduction*, Humana Press, New York, 89-121.

Zhu, M., Li, F.H., Shi, Z.S. 2016. Morphological and photosynthetic response of waxy corn inbred line to waterlogging. *Photosynthetica*, 54(4), 636-640.

Zotarelli, L., Scholberg, J.M., Dukes, M.D., Muñoz-Carpena, R., Icerman, J. 2009. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural water management*, 96(1), 23-34.

**IMPACTO DA ADIÇÃO DE CALCÁRIO, GESSO AGRÍCOLA E FÓSFORO
SOBRE A FISIOLOGIA, CRESCIMENTO E VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS
RADICULARES DE TOMATEIRO CULTIVADO SOB DIFERENTES REGIMES
HÍDRICOS**

CAPÍTULO 1

**IMPACTO DA ADIÇÃO DE CALCÁRIO, GESSO AGRÍCOLA E FÓSFORO
SOBRE A FISIOLOGIA, CRESCIMENTO E VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS
RADICULARES DE TOMATEIRO CULTIVADO SOB DIFERENTES REGIMES
HÍDRICOS**

Pereira, Ednângelo Duarte, MSc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2024. Capítulo I. **Impacto da adição de calcário, gesso agrícola e fósforo sobre a fisiologia, crescimento e variáveis biométricas radiculares de tomateiro cultivado sobre diferentes regimes hídricos.** Orientador: Derly José Henriques da Silva

O uso combinado de calcário e gesso agrícola em sistemas agrícolas corrige a acidez do solo, melhorando o crescimento da planta e processos fisiológicos. Esta correção pode reduzir ainda a adsorção de fósforo (P) aos oxihidróxidos de Fe e Al. Combinada ou não aos manejos de solos, a frequência de irrigação também determina a umidade do solo na zona radicular podendo melhorar o crescimento das raízes. No entanto, o papel da melhoria do solo na fisiologia estabelecida da cultura e na produtividade em solos de perfil quimicamente construído combinado a diferentes frequências de irrigação, especialmente quando cultivados em regiões propensas a riscos agroclimáticos, permanecem pouco compreendida. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes intervalos de irrigação e manejos de solo no aprofundamento radicular que poderia proporcionar maior manutenção da abertura estomática e produção de tomate. Três estratégias de manejo do solo foram testadas para elevar a saturação de base a 80% envolvendo a aplicação de: (i) 2,25 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (SM1) com carbonato de cálcio de baixo efeito equivalente (ECCC = 76%); (ii) 2,25 Mg ha⁻¹ do mesmo tipo de calcário + 1 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola (SM2); e (iii) 2,25 Mg ha⁻¹ de calcário + 1 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola + 3,0 Mg ha⁻¹ de superfosfato triplo (SM3). As estratégias de manejo do solo foram combinadas com duas frequências de irrigação: diária (I1) e a cada sete dias (I7). Trocas gasosas e potencial hídrico foliar foram medidos durante os diferentes estádios de crescimento. O crescimento e a distribuição radicular até 1 m de profundidade no solo e a produtividade de frutos, também foram medidas. A frequência I7 combinada com o manejo de solo SM3 aumentou a arquitetura do sistema radicular em profundidade. A combinação I7SM3 proporcionou melhor manutenção do estado hídrico da planta e aprimorou as trocas gasosas das plantas de tomate. As diferenças no desenvolvimento radicular e respostas fisiológicas das plantas entre os tratamentos foram refletidas na produtividade dos frutos de tomate, sendo maior com o manejo I7SM3. O aumento da absorção de água, nutrientes e regulação estomática mais rígida resultando em uma fotossíntese aprimorada foram as principais características ecofisiológicas que regularam o crescimento e a produtividade das plantas de tomate em resposta a construção química do perfil do solo combinada a diferentes frequências de irrigação. Além disso, o desenvolvimento radicular foi favorecido em todo o perfil do solo, principalmente nas camadas mais profundas, após melhorias na fertilidade do solo por efeito cascata da frequência I7 combinada com SM3. Esses resultados justificam a adoção do manejo SM3 como estratégia promissora para superar situações de limitação hídrica sazonal, que pode resultar em estresse hídrico. O manejo SM3 combinado a I7 maximizou o funcionamento dos estômatos e proporcionou maior resiliência climática às plantas crescendo sob esta estratégia de cultivo.

Palavras-chave: Calagem. Crescimento radicular. Eficiência fotossintética. Gesso agrícola. Sustentabilidade.

IMPACT OF THE ADDITION OF LIMESTONE, AGRICULTURAL GYPSUM AND PHOSPHORUS ON THE PHYSIOLOGY, GROWTH AND ROOT BIOMETRIC PARAMETERS OF TOMATO CULTIVATED UNDER DIFFERENT WATER REGIMES

PEREIRA, Ednângelo Duarte, MSc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2024. CHAPTER
I. **Impact of the addition of limestone, agricultural gypsum and phosphorus on the
physiology, growth and root biometric parameters of tomato plants grown under different
water regimes.** Adviser: Derly José Henriques da Silva

The combined use of limestone and phosphogypsum in agricultural systems corrects soil acidity, improving plant growth and physiological processes. This correction can further reduce the adsorption of Phosphorus (P) to Fe and Al oxyhydroxides. Combined or not with soil management, irrigation frequency also determines soil moisture in the root zone, which can improve root growth. However, the role of soil improvement in established crop physiology and productivity in chemically constructed profile soils combined with different irrigation frequencies, especially when grown in regions prone to agroclimatic hazards, remain poorly understood. The objective of this work was to evaluate the effects of different irrigation intervals and soil management on root deepening that could provide greater maintenance of stomatal opening and tomato production. Three soil management strategies were tested to raise baseline saturation to 80% involving the application of: (i) 2.25 Mg ha⁻¹ of dolomitic limestone (SM1) with equivalent low effect calcium carbonate (ECCC = 76%); (ii) 2.25 Mg ha⁻¹ of the same type of limestone + 1 Mg ha⁻¹ of phosphogypsum (SM2); and (iii) 2.25 Mg ha⁻¹ of limestone + 1 Mg ha⁻¹ of phosphogypsum + 3.0 Mg ha⁻¹ of triple superphosphate (SM3). Soil management strategies were combined with two irrigation frequencies: daily (I1) and every seven days (I7). Gas exchanges and leaf water potential were measured during different growth stages. Root growth and distribution up to 1 m deep in the soil and fruit yield were also measured. The I7 frequency combined with the SM3 soil management increased the root system architecture in depth. The I7SM3 combination provided better maintenance of the water status of the plant and improved gas exchange in tomato plants. Differences in root development and plant physiological responses between treatments were reflected in tomato fruit yield, being higher with the I7SM3 management. Increased water and nutrient uptake and tighter stomatal regulation resulting in enhanced photosynthesis were the main ecophysiological features that regulated growth and productivity of tomato plants in response to chemical construction of the soil profile combined with different irrigation frequencies. In addition, root development was favored throughout the soil profile, especially in the deeper layers, after improvements in soil fertility due to the cascade effect of the I7 frequency combined with SM3. These results justify the adoption of SM3 management as a promising strategy to overcome situations of seasonal water limitation, which can result in water stress. The SM3 management combined with I7 maximized the functioning of the stomata and provided greater climate resilience to the plants growing under this cultivation strategy.

Keywords: Liming. Root growth. Photosynthetic efficiency. Phosphogypsum. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O sucesso da agricultura moderna se deve a maior compreensão do efeito da interação do contínuo solo-planta-atmosfera (SPAC). O SPAC é o caminho para a água se mover do solo através das plantas para a atmosfera. A distribuição da umidade do solo na zona radicular varia fortemente no tempo e no espaço (Xi et al., 2013, Jia et al., 2016), o que resulta em um impacto marcante no transporte de água no SPAC e outros metabolismos fisiológicos, incluindo absorção de nutrientes e assimilação fotossintética (Yang et al., 2017; Reich et al., 2018). Em ecossistemas agrícolas, especialmente, em regiões áridas e semiáridas, a disponibilidade de água para as plantas nas camadas superficiais do solo flutua rápida e de forma extrema devido à infiltração, evaporação do solo e absorção de água pelas raízes. No entanto, a umidade do solo nas camadas mais profundas muda mais lentamente com menos raízes e eventos de recarga, resultando em uma maior disponibilidade hídrica do solo na zona radicular (Fan et al., 2017). Assim, existe um interesse global em sistemas de manejo que potencializem o desenvolvimento de raízes em camadas mais profundas do solo (Holland et al., 2018). Com a crescente escassez de água, o aprimoramento no uso da água e nutrientes minerais, será uma estratégia crucial para enfrentar o desafio da sociedade global de alimentar de forma sustentável a crescente população mundial enquanto enfrenta as restrições das mudanças climáticas (Machado et al., 2022).

Os declínios de rendimento em razão das mudanças climáticas são ainda mais severos em regiões tropicais devido aos danos causados pelo rápido aumento da temperatura. Temperaturas acima do limite crítico, denominadas como estresse térmico, podem variar ao longo do crescimento e dos estádios de desenvolvimento da cultura, impactando diferentes processos fisiológicos, e suas interações com estádios fenológicos específicos, reduzindo o rendimento das plantas cultivadas (Jagadish, 2020). Embora ainda não totalmente compreendido, esse fenômeno é impulsionado por um aumento global no déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV), que reflete a diferença na pressão de vapor de água na saturação (e_s , kPa) e a pressão real de vapor de água (e_a , kPa) a uma determinada temperatura (Sadok et al., 2021).

É bem conhecido que o rendimento dos cultivos agrícolas depende da disponibilidade, captura e eficiência da utilização dos recursos, que pode variar entre regiões. Dentre estes recursos, a baixa eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados é uma preocupação global, devido a maioria destes fertilizantes serem fabricados a partir de reservas finitas de apatita, e foi estimado que até 60% dessa base de recursos poderia ser esgotada até 2100 (Van Vuuren et al., 2010). Os fatores que afetam a eficiência de uso fisiológico do fósforo (P) nas culturas são

clima, manejo de culturas e fatores do solo. Por exemplo, a acidez do solo, em particular, desempenha um papel crítico na disponibilidade de P para as plantas porque afeta o ciclo microbiano de P, incluindo a mineralização deste nutriente (Richardson e Simpson, 2011; Spohn e Kuzyakov, 2013). Além disso, a adsorção com óxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe) pode ser alta em solos ácidos (Sun et al., 2020), enquanto em solos básicos, o P pode precipitar com cálcio (Ca) (Hinsinger, 2001).

A correção da acidez superficial e subsuperficial do solo é uma prática agrícola de extrema importância para mitigar os efeitos nocivos da acidificação do solo para as plantas cultivadas. Para essa correção, o insumo mais utilizado na camada superficial é o calcário e para a subsuperficial é o gesso agrícola. A calagem neutraliza a acidez do solo, aumenta a disponibilidade de nutrientes, fornece cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) e alivia a toxicidade de alguns elementos (Bossolani et al., 2022). Para aumentar a eficiência da calagem e manejar a acidez do solo em profundidade nos solos tropicais, o gesso agrícola tem sido amplamente utilizado. Ao contrário da calagem, a aplicação do gesso agrícola não corrige a acidez do solo, mas fornece Ca^{2+} e enxofre (S) e reduz a disponibilidade de Al^{3+} em todo o perfil do solo (Carneis Filho et al., 2017). A melhoria no perfil do solo provocada pelo gesso agrícola beneficia o desenvolvimento do sistema radicular das culturas (Rosolem et al., 2017) abaixo da camada corrigida pela calagem usual, e altera a dinâmica e o uso de nutrientes devido ao aumento da ciclagem e absorção da água e nutrientes disponíveis no solo, resultando em maiores produtividades.

O progresso na compreensão desses processos foi atrasado pela dificuldade dos métodos envolvendo os estudos dos complexos sistemas radiculares. No entanto, muitos pesquisadores tentaram resolver esse problema. Zotarelli et al. (2009) relataram que o comprimento da raiz e a distribuição da densidade das raízes em plantas de tomate foram afetados por quantidades variáveis de irrigação. Em estudo sobre o efeito de diferentes frequências de irrigação em tomate, Fara et al. (2019) verificaram que a reposição da água evapotranspirada a cada sete dias proporcionou aumento de 32% na produtividade, acompanhados de maior eficiência no uso da água e fotossíntese líquida, quando comparado a frequência de irrigação diária. Portanto, supõe-se que o uso integrado de estratégias de manejos de água e solo podem aumentar significativamente a produtividade e manter o metabolismo das plantas funcionando mesmo sobre limitações hídricas sazonais.

O tomate (*Solanum lycopersicum* L. – Solanaceae) é um sistema modelo emergente devido à sua importância econômica, grande variação genotípica e seu genoma recentemente completamente sequenciado (Machado et al., 2022). Além disso, apesar do tomateiro possuir

altas demandas hídricas, esta cultura tem a capacidade de se adaptar morfológicamente a ambientes tanto com extrema escassez de água como em ambientes ricos em água (Preece e Peñuelas, 2016) e isto muitas vezes depende de um enraizamento profundo e das condições de umidade do solo (Koevoets et al., 2016). Dentro desse contexto, o tomate se tornou uma planta atrativa para estudar as características fisiológicas de tolerância a diferentes disponibilidades de água e nutrientes no solo. Isso explica a enorme quantidade de estudos realizados sobre o tema nas últimas décadas (Volpe et al., 2018; Dariva et al., 2020; Masmoud et al., 2021). Contudo, até o momento há pouca informação sobre como o uso de diferentes manejos de solo e frequências de irrigação combinados, podem influenciar no crescimento, condutância estomática, fotossíntese, arquitetura do sistema radicular e estado nutricional das plantas, especialmente em C3.

Mais estudos são necessários para determinar se o manejo de solos tropicais ajustados, integrado com diferentes frequências de irrigação promoveria maior crescimento radicular para manter o metabolismo das plantas C3 funcionando adequadamente por mais horas ao longo do dia. No presente estudo, foi realizada uma investigação detalhada em um esforço para compreender (i) como a alteração do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo combinados a diferentes frequências de irrigação, induz melhorias nas relações hídricas e trocas gasosas ao longo da estação de cultivo e (ii) avaliar como essas mudanças podem promover melhor desenvolvimento radicular e captação de nutrientes pelas plantas de tomate. Responder a essas perguntas pode ser útil para maximizar a eficiência do uso da água e de fertilizantes em plantas cultivadas, e adicionalmente pode ajudar a melhorar nossa compreensão da inter-relação entre a produção de frutos e as características da raiz em condições de campo em solo tropical ajustado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O experimento foi conduzido em condições de campo no período de abril a agosto de 2021 na Unidade de Pesquisa e extensão do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20° 45'S, 42° 51'W, altitude de 693 m). O clima da região corresponde à classe Cwa da classificação de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018). A condição meteorológica, incluindo a temperatura média diária, precipitação, radiação solar e evapotranspiração de referência (ET₀) foram obtidos de uma estação meteorológica automatizada instalada no local do experimento (Fig. S1).

O solo da área foi classificado como Latossolo, classificação brasileira (Santos et al. 2018) e como Oxisol, de acordo com a classificação americana (US Soil Taxonomy - Soil Survey Staff, 2014). As propriedades do solo antes da calagem foram avaliadas nas camadas de solo de 0-100 cm (Tabela S1). O solo inicial registrou pH em água médio de 5,7 em todas as camadas do solo. Os teores de P disponível e K^+ trocável são marcadamente mais altos na camada de 0-20 cm com reduções de até 99% para P e de 84,4% para K^+ quando comparado a camada de 60-80 cm, onde os menores teores destes nutrientes foram registrados. Menores valores de capacidade efetiva de troca catiônica e de soma de bases, também foram observados na mesma profundidade. Os valores de P remanescente, também reduz ao longo do perfil no solo. Isto é importante porque quanto menor o P remanescente, maior o potencial de adsorção de P do solo, que é aumentado com a presença de minerais óxidos nos solos. Como esperado, o teor de matéria orgânica na camada de 0-20 cm é superior à todas as demais profundidades e, 63% superior a camada de 80-100 cm. Maiores teores de argila foram encontrados a partir da camada de 40-60 cm, representando 77,5% das frações do solo em profundidade. A microporosidade nas camadas abaixo de 40 cm foi superior em 10,6% e 12,8% às camadas de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente. Em contraste, a macroporosidade foi superior nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, quando comparada às demais camadas. A densidade aparente do solo variou de 1,02 a 0,97 g cm⁻³, registrando maiores densidades nas camadas superiores e reduzindo à medida que a profundidade do solo aumentou.

2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados e os tratamentos foram arrançados em esquema de parcelas subdivididas, com seis repetições. Nas parcelas, foram avaliados dois manejos de irrigação: reposição diária da água evapotranspirada pela cultura (I1) e reposição da água evapotranspirada a cada sete dias (I7). Nas subparcelas foram avaliados três manejos de solo, distribuídos aleatoriamente dentro de cada tratamento aplicado nas parcelas. O tamanho de cada parcela era de 40,5 m² com 3,1 m de zona tampão entre as parcelas úteis dos dois tratamentos de água. O tamanho de cada subparcela era de 13,5 m² (4,5m x 3m).

Os manejos de solo foram destinados a complementação de P em profundidade e para elevar a saturação de base a 80% envolvendo a aplicação de: (i) 2,25 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (SM1) com carbonato de cálcio de baixo efeito equivalente (ECCC = 76%); (ii) 2,25 Mg ha⁻¹ do mesmo tipo de calcário + 1 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola (SM2); e (iii) 2,25 Mg ha⁻¹ de calcário + 1 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola + 3,0 Mg ha⁻¹ de superfosfato triplo (SM3) aplicado no sulco de plantio à 0.30 m de profundidade, no dia seguinte ao transplante das mudas. O

critério utilizado para aplicar o superfosfato triplo a 0,30 m de profundidade é baseado na metade da dose recomendada para a camada superficial pelo manual de uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, Brasil (Alvarez et al., 1999), considerando o efeito de aplicação localizada. Todos os tratamentos também receberam superfosfato triplo na camada superficial (0,10 cm).

Calcário e gesso agrícola foram aplicados manualmente. O calcário dolomítico composto por 30% CaO e 10% MgO, que corresponde a 21,44% de Ca e 6,03% de Mg, respectivamente, foi aplicado na superfície do solo 130 dias antes do transplantio e incorporado até 0,25 m de profundidade com arado de aiveca de duas hastes seguida de gradagem leve (grade de 42 discos, Ø 0,51 m). Após estas operações, 74 dias antes do transplantio, gesso agrícola composto por 14,72% de Ca, 15% SO₄²⁻ e 15% de umidade máxima foi adicionado em uma única dose na superfície do solo das unidades experimentais que envolviam o manejo de solo com calcário dolomítico e gesso agrícola. O fósforo (P), 131 Kg ha⁻¹ na forma de superfosfato triplo, foi aplicado em sulcos realizados localmente no dia seguinte ao transplantio das mudas, a 5 cm de distância das plantas, na superfície (0,10 cm) e nos tratamentos que receberam fósforo em subsuperfície (0,30 cm).

2.3. Preparo de mudas e manejo da cultura

Tomate (*S. lycopersicum*) híbrido comercial Heinz 9553 (H9553) (Heinz Seed[®]), foi utilizado no cultivo de campo. Primeiro, as sementes foram semeadas em bandejas de poliestireno de 128 células contendo substrato comercial e o transplante para o campo foi realizado quando as plantas tinham de 4-6 folhas verdadeiras.

Este híbrido possui resistência a *Fusarium oxysporium* raças 1 e 2, *Meloidogyne incognita* e tolerância ao cancro da haste causado por *Alternaria alternata* f. sp. O H9553 apresenta maturação concentrada (Giordano et al., 2000; Luz et al., 2016), crescimento determinado, podendo levar de 110 a 120 dias até a sua maturação. As plantas são grandes e produzem frutos pequenos e firmes com teor de sólidos solúveis de 4,9 a 5,1 (Embrapa, 2003). Os frutos desse híbrido são processados pela indústria para fabricar molhos, tomates enlatados, ketchup e outros produtos.

2.4. Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado a partir do cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc), ou seja, a quantidade de água aplicada foi obtida considerando a quantidade de água

perdida pela transpiração da cultura e pela evaporação do solo (K_e). A ET_0 foi calculada a partir dos dados meteorológicos usando a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998a; Angeli et al., 2016).

A irrigação foi implementada utilizando o tubo gotejador AmnonDrip, auto compensante e antidrenante que opera com vazão real de $1,60 \text{ L h}^{-1}$. A quantidade de água aplicada nos tratamentos foi sempre maior que a ET_c , a fim de fornecer a exigência absoluta de irrigação (Tabela 1). Os gotejadores foram dispostos em espaçamento de 0,3 m, e as linhas laterais ajustadas com espaçamento de 1,0 m.

Tabela 1. Quantidade total de água aplicada pelo sistema de irrigação por gotejamento, precipitação e evapotranspiração da cultura (ET_c) no experimento

	Freq	Prec	IRN	ITN	Prec + ITN	ET_c
Experimento	I1	87,30	131,53	132,42	219,72	201,87
	I7	87,30	128,53	129,83	217,13	201,87

Freq= Frequência de irrigação em dias em que I1= irrigação diária; I7= irrigação a cada sete dias; Prec= precipitação; IRN= Irrigação Real Necessária; ITN= Irrigação Total Necessária e ET_c = Evapotranspiração da cultura.

O déficit de pressão de vapor (DPV) e o tempo de irrigação para cada tratamento foi estimado com base na pressão de saturação do vapor d'água e na pressão parcial do vapor d'água, de acordo com a equação proposta por Allen et al. (1998). A umidade relativa do ar e o DPV médio diário durante o experimento são apresentados na Figura S2.

A porcentagem de área molhada (PWA) resultante da irrigação foi de 50% e o sistema de irrigação foi operado com eficiência de 99,4%. A uniformidade do sistema de irrigação foi avaliada com base no coeficiente de uniformidade de Christiansen (Mantovani et al., 2013). Para o manejo da irrigação durante os diferentes estádios fenológicos da cultura foram adotados os seguintes valores de K_{cb} : na fase inicial da cultura (0.15), na fase intermediária (1.15), e na fase final (0.70), de acordo com a recomendação de Allen et al. (2009) e Delazari et al. (2016).

2.5. Gradiente hídrico e térmico do solo

Sensores de permissividade dielétrica da água e temperatura do solo foram instalados nas profundidades de 0–20, 40–60 e de 80–100 cm em três repetições, para monitorar a distribuição do conteúdo de água no solo (SWC) e temperatura. Os fios dos sensores foram encaminhados para uma cobertura de plástico, e conectado a um registrador de dados (HFM2030, Falker, Brasil; AK904, Akso, Brasil) registrando medições de cada sensor em

intervalos de 3 dias nomeadamente, antes da irrigação, no dia posterior a irrigação e no terceiro dia após a irrigação. Esse intervalo foi determinado para monitorar a heterogeneidade espaço-temporal no conteúdo de água e temperatura do solo.

2.6. Amostragem de raízes e medidas morfológicas

As amostras de raízes foram coletadas no estágio de maturação do fruto (após a colheita). O solo foi escavado a uma profundidade de 100 cm, em quatro das seis repetições, totalizando 24 trincheiras. Essas trincheiras (30 x 50 x 100 cm) foram subdivididas em sete profundidades (0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60, 60–80, 80–100 cm) para cada repetição de campo, totalizando 168 amostras. Primeiro, as amostras das raízes foram embebidas em água para separar facilmente a raiz e o solo. Posteriormente, foram cuidadosamente lavadas em água corrente, tomando cuidado para evitar a perda de raízes, e transportadas em sacos de papel kraft rotulados para o laboratório. No laboratório, as raízes foram acondicionadas em solução de álcool 30% até análise de imagem. As imagens (resolução de 400 dpi) foram obtidas utilizando um scanner (EPSON Expression 11000XL).

As variáveis morfológicas do sistema radicular foram estimadas escaneando aproximadamente 10% da massa radicular coletada em cada profundidade e de cada repetição (Costa et al., 2000; Moraes et al., 2020). As imagens foram preparadas espalhando as raízes em uma bandeja de vidro transparente (30 × 40 cm) com lâmina d'água de 3 mm. A sobreposição de raiz antes da digitalização foi evitada. Após a imagem, as raízes foram devolvidas ao saco de papel kraft e secas em estufa a 65 °C por 48 h até peso constante. As imagens da raiz foram analisadas usando o software WinRhizo Pro 2013 (Regent Instruments Inc., Quebec, Canadá). O comprimento total, a área de superfície total, volume total, diâmetro, e comprimento dentro das classes de diâmetro, foram medidos. Neste estudo, as raízes foram divididas em quatro classes com base no diâmetro durante a análise da imagem: 0–0,5 mm, 0,5–1 mm, 1–2 mm e > 2 mm.

2.7. Relações hídricas

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi medido em folhas antes do amanhecer (3:00-5:30 h) (Ψ_{pd}) e ao meio-dia (12:00-15:00) (Ψ_{md}) usando uma câmara de pressão Scholander (Portable Plant Water Status Console - Modelo 3115), no estágio vegetativo (estádio 1), florescimento (estádio 2), frutificação (enchimento de frutos – estágio 3) e colheita (senescência – estágio 4).

Antes de cada medição de Ψ_w , as folhas foram mantidas dentro de sacos zip-lock com papel toalha úmido por 5 min (Almeida et al., 2021).

2.8. Trocas gasosas da folha

As trocas gasosas foram determinadas no 3º folíolo da terceira folha totalmente expandida a partir do ápice, usando um analisador de gases no infravermelho (IRGA – modelo LCPro, ADC BioScientific Ltd.), com medições realizadas entre 09:00 e 11:00 horas, sob um céu claro e sob irradiância foliar de saturação de $1000 \mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (de uma fonte LED), e concentração de CO_2 das condições ambientais. As medições da fotossíntese líquida (A – $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s – $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i – $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$) e taxa de transpiração (E – $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram realizadas no estágio vegetativo (estádio 1), florescimento (estádio 2), frutificação (enchimento de frutos – estágio 3) e colheita (senescência – estágio 4).

2.9. Produtividade

Os frutos de tomate foram colhidos na fase de maturação. O rendimento total das plantas foi determinado a partir da colheita de todos os frutos de 10 plantas. Depois de colhidos, os frutos foram pesados. A partir da massa dos frutos, foi possível calcular a produtividade total (PT), em tonelada por hectare (t ha^{-1}).

3. Análise Estatística

Os dados de relações hídricas, trocas gasosas e produtividade foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$). A ANOVA para a resposta das plantas ao crescimento radicular foi realizada separadamente para cada camada. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos, as médias foram comparadas com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Toda a análise dos dados foi realizada por meio do software R versão 3.6.0 (R Core Team, 2021) usando o pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2018).

4. RESULTADOS

4.1. Gradiente hídrico e térmico do solo

Durante a parte inicial do estudo, houve um pequeno evento de precipitação com ~29 mm total de chuva durante 24 horas. Mais dois eventos de precipitações menores ($<12 \text{ mm dia}^{-1}$) ocorreram. O primeiro durante meados do estágio I e o segundo no início do estágio II. Esses

eventos são mostrados na Fig. S1A. O conteúdo de água do solo é mostrado na Fig. 1. O conteúdo de água no solo mostra um aprofundamento semelhante ao longo do perfil na semana anterior a diferenciação das frequências de irrigação. Após a diferenciação, as frequências de irrigação diária (Fig. 1a) tornaram-se marcadamente mais altos na profundidade de 0–20 cm. Em comparação, o solo das parcelas irrigadas a cada sete dias (Fig. 1c) foi persistentemente mais úmido na profundidade de 80–100 cm, embora tenha havido uma tendência gradual para valores mais baixos à medida que o estudo progrediu. O conteúdo de água do meio do solo (40–60 cm) foram menores para as duas frequências de irrigação e se aprofundou progressivamente no solo até o final de maio, quando seu conteúdo de água se tornou mais estável para o restante do estudo.

A distribuição espacial da temperatura nas diferentes profundidades apresentou um padrão muito semelhante para a frequência de irrigação diária (Fig. 1b) e a cada sete dias (Fig. 1d). Acompanhada do aumento da profundidade, a temperatura também aumentou gradativamente, com variações ao longo do estudo. De acordo com o padrão de distribuição, as temperaturas mais altas no solo ocorreram entre abril e maio nas profundidades de 40–100 cm. E as áreas de menor temperatura, foram localizadas na profundidade de 0–20 cm no mês de julho até o início de agosto.

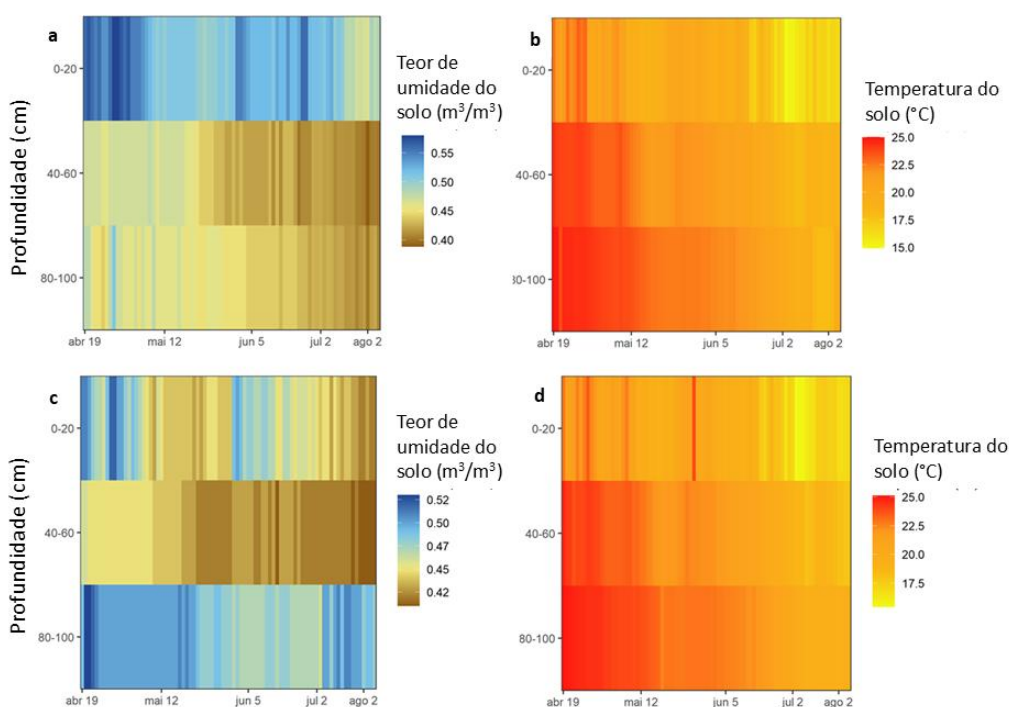


Figura 1 - Mapa de distribuição de água e temperatura no solo com irrigação diária – I1 (a, b) e com irrigação a cada sete dias – I7 (c, d).

4.2. Desenvolvimento de raízes

A massa seca e variáveis morfológicas da raiz das plantas de tomate foram positivamente afetadas pelas frequências de irrigação e manejos de solo (Fig. 2 a–h).

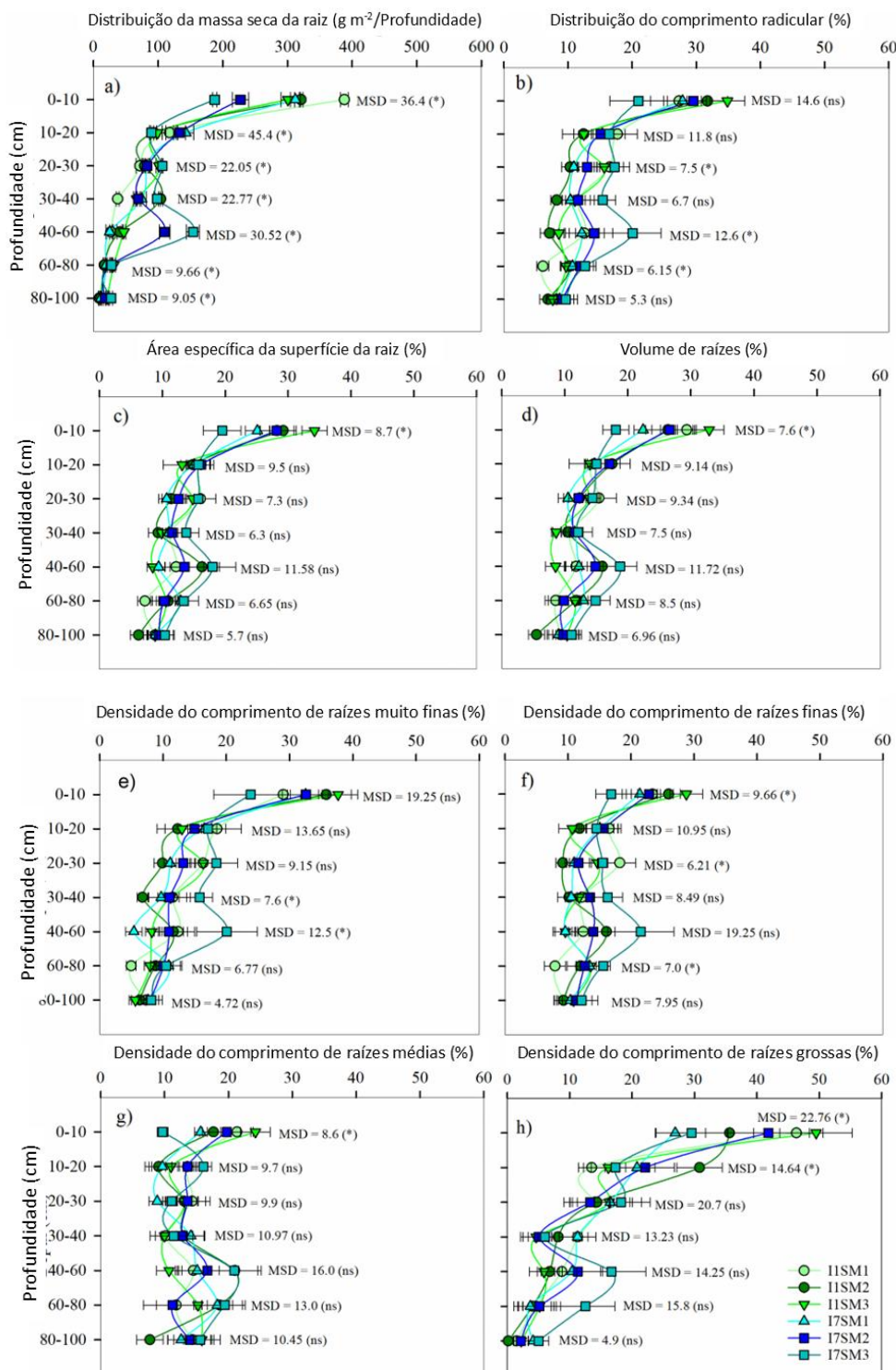


Figura 2 - Distribuição da massa seca da raiz (a), distribuição do comprimento radicular(b), área específica da superfície da raiz (c), volume de raízes (d), densidade do comprimento

de raízes muito finas, finas, médias e grossas (e,f,g,h, respectivamente) em plantas de tomate para processamento, submetidas a irrigação diária (I1) e a cada sete dias (I7) em diferentes manejos de solo [(SM1: aplicação exclusiva de calcário dolomítico; SM2: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; e SM3: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado localmente em profundidade (30 cm)]. MSD: diferença mínima significativa. ns: não significativo em cada camada do solo. (*): Existem diferenças entre os tratamentos com base no teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para a massa seca da raiz, houve diferenças em todas as camadas analisadas (Fig. 2a). A produção de massa seca da raiz demonstra que a proporção de raízes na camada superior do solo (0–10 cm), foi maior com irrigação diária combinada com aplicação exclusiva de calcário, no entanto, diferente da diminuição exponencial de biomassa seca de raízes geralmente relatada em outros estudos, neste trabalho, aumento da massa radicular na camada 40–60 cm foi registrada quando a reposição de água a cada sete dias combinada com o manejo SM2 (calcário + gesso agrícola) e, em particular, com SM3 (calcário + gesso agrícola + P) foi adotado. Isso provavelmente ocorreu devido à aplicação localizada de P à 30 cm de profundidade no solo, proporcionando aumento de biomassa radicular nas camadas mais profundas do solo. A distribuição do comprimento radicular foi diferente nos diferentes tratamentos e, houve diferenças em 20–30 cm, 40–60 cm e 60–80 cm (Fig. 4b). Nestas três camadas, maior comprimento total da raiz foi encontrado no tratamento de irrigação a cada sete dias combinado com o manejo de solo SM3, seguido pelo I7SM2. Já para área específica da superfície radicular, volume de raiz e densidade de raízes médias (1–2 mm) houve diferenças apenas na camada de 0–10 cm (Fig. 2 c, d, g, respectivamente). Para essas variáveis, maiores valores foram encontrados sob irrigação diária combinada com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente à 30 cm. Em contraste, houve maior quantidade de raízes muito finas (0–0,5 mm) nas profundidades de 30–40 cm e 40–60 cm (Fig. 2e), sob irrigação a cada sete dias combinada com SM3 do que nos outros tratamentos. Além disso, houve diferenças e maior densidade de raízes finas (0,5–1 mm) nos tratamentos que receberam o fósforo aplicado à 30 cm (Fig. 2f). Para a camada superior do solo (0–10 cm) houve maior densidade de raízes finas em I1SM3 do que nos outros tratamentos. Para a profundidade de 20–30 cm, maior densidade de raiz fina foi encontrada em I1SM1, mas sem diferença para os manejos I1SM3 e I7SM3. Contudo, para a camada de 60–80 cm maior densidade de raiz fina foi registrada sob irrigação a cada sete dias combinada com calcário + gesso agrícola + fósforo aplicado localmente a 30 cm (I7SM3). Para a camada superior do solo (0–10 cm) e segunda camada do solo (10–20 cm), houve uma maior

densidade de raízes grossas na irrigação diária combinada com aplicação exclusiva de calcário (SM1) e calcário e gesso agrícola (SM2), respectivamente (Fig. 2h).

4.3. Relações hídricas

No potencial hídrico foliar (Ψ_w) não houve interação das frequências de irrigação combinadas aos manejos do solo em nenhum dos estádios. Por esta razão, os resultados são apresentados e discutidos em função dos principais efeitos dos tratamentos de água sobre as médias obtidas em cada manejo de solo e dos manejos de solo sobre as médias de cada tratamento de água.

O potencial hídrico na antemanhã (LwP_{pd}) não foi diferente entre as duas frequências de irrigação, exceto no estádio 4. Neste estádio, os maiores potenciais (menos negativos) foram encontrados nas plantas expostas à condição de irrigação a cada sete dias (Fig. 3a). Em contraste, ao meio-dia (LwP_m) foram detectadas diferenças entre as frequências de irrigação nos estádios 1 e 4 (Fig. 3c). No estádio 1, LwP_m foi menor em plantas irrigadas a cada sete dias (-0,7 MPa) do que aos observados nas plantas irrigadas diariamente (-0,55 MPa). Para estádio 4, uma inversão foi observada, com maiores potenciais hídricos foliares em plantas irrigadas a cada sete dias (I7) que foram em média -0,5 MPa menos negativos aos observados nas plantas irrigadas diariamente. A aplicação dos diferentes manejos de solo não alterou o potencial hídrico nas folhas, exceto no estádio 4 (Fig. 3bd). No LwP_{pd}, os maiores potenciais foram encontrados em SM2 e SM3, diferindo de SM1. A capacidade das plantas em solo manejado exclusivamente com calcário (SM1) de preservar água foi 18,4% menor quando comparadas as plantas cultivadas nos manejos calcário + gesso (SM2) e calcário + gesso + fósforo (SM3).

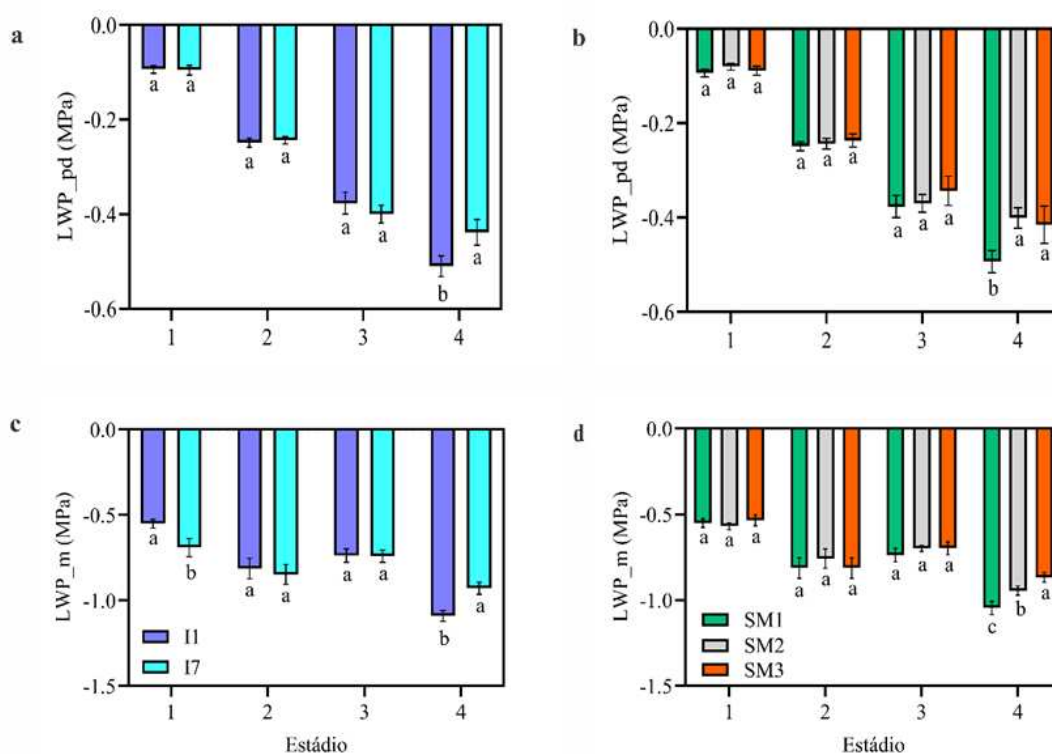


Figura 3 - Potenciais hídricos foliares medidos na antemanhã ($\Psi_{W_{pd}}$ – a e c) e ao meio-dia ($\Psi_{W_{md}}$ – b e d) em diferentes estádios de crescimento das plantas de tomate para processamento submetidas a diferentes frequências de irrigação: I1 – Irrigação diária e I7 – irrigação a cada sete dias, em diferentes manejos de solo [(SM1: aplicação exclusiva de calcário dolomítico; SM2: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; e SM3: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado localmente em profundidade (30 cm)]. Todos os dados são expressos como média $\pm$ SE (n = 12).

4.4. Trocas gasosas

A condutância estomática (g_s) no estágio 2 foi alterada pela interação da irrigação combinada aos manejos do solo. Em condições de irrigação diária combinado com o manejo de solo SM1, a g_s aumentou 25,5% em comparação a irrigação a cada sete dias. No entanto, SM2 combinado com a reposição de água a cada sete dias aumentou g_s na mesma proporção, enquanto SM3 aumentou 10% (Fig. 4a). Não houve diferenças para g_s com reposição de água diária e cada sete dias nos estádios 3 e 4 (Fig. 4b) e nos manejos de solo nos estádios 1, 3 e 4 (Fig. 4c). Curiosamente, no estágio 1, a g_s foi 40% maior quando irrigada a cada sete dias (Fig. 4b). Corroborando os resultados de g_s no estágio 2, maior transpiração (E) também foi registrada com irrigação a cada sete dias nesse estágio, com aumento médio de 13,40% em

comparação a irrigação diária (Fig. 4e). Além disso, os resultados indicaram que a E foi alterada pela interação da irrigação com manejos de solo no estágio 3 (Fig. 4d). Na aplicação exclusiva de calcário (SM1) combinado com irrigação a cada sete dias foi detectado aumento moderado na E (24%), enquanto nos demais manejos de água e solo a taxa de transpiração foi semelhante (Fig. 4f).

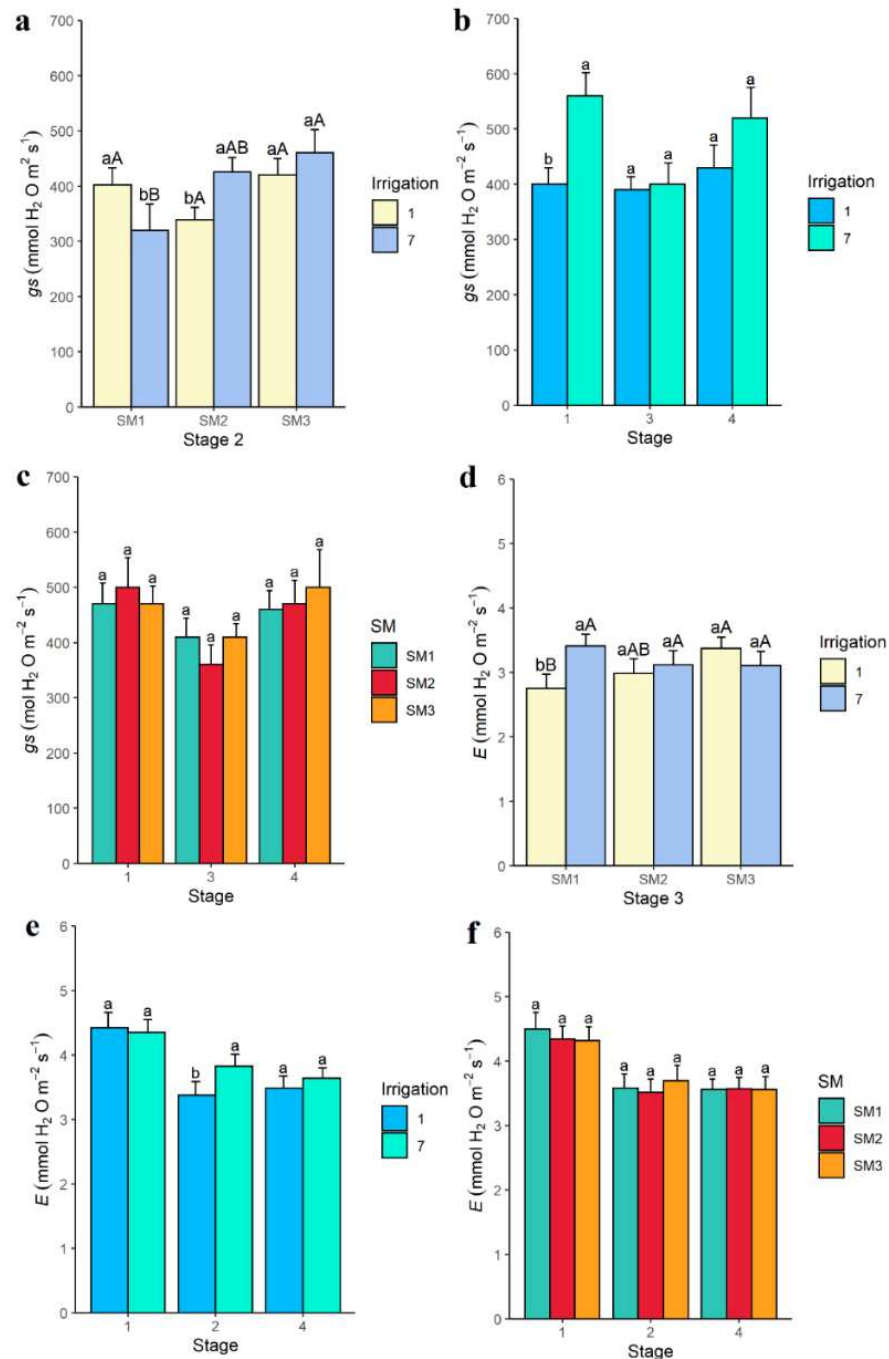


Figura 4 - Condutância estomática (g_s) (a–c) e Transpiração (E) (d–f) medidas em diferentes estádios (1–4) em plantas de tomate para processamento, submetidas a irrigação diária (1) e a cada sete dias (7) em diferentes manejos de solo [(SM1: aplicação exclusiva de calcário

dolomítico; SM2: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; e SM3: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado localmente em profundidade (30 cm)]. Todos os dados são expressos como média $\pm$ SE ($n = 12$). Nas interações, diferentes letras minúsculas denotam significância dentro da irrigação para cada manejo de solo, e diferentes letras maiúsculas denotam significância dentro dos manejos de solo para cada irrigação. Para efeitos isolados, médias seguidas da mesma letra miniscúla indicam que não existem diferenças de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$) nas irrigações e manejos de solo.

A fotossíntese líquida (A) foi afetada pela interação da irrigação combinada aos manejos do solo nos estádios 1 e 3 (Fig. 5ab). Mais precisamente, no estádio 1, em SM2 os valores de A foram semelhantes, independente da irrigação e manejo de solo, enquanto SM1 combinada com irrigação a cada sete dias reduziu a A em 14%, e SM3 aumentou a A em 10%. Por outro lado, no estádio 3, período que coincide com a fase de enchimento dos frutos, a condição SM1 reduziu 21,9% a A quando as plantas foram irrigadas a cada sete dias, enquanto em SM2 e SM3 a taxa fotossintética foi semelhante, independente da irrigação. Nos estádios 2 e 4 não houve interação entre estratégias de irrigação e manejos de solo no que diz respeito aos seus efeitos na A . No estádio 2 foram semelhantes e no estádio 4 a irrigação a cada sete dias aumentou 11% a taxa de A . O efeito dos manejos de solo no estádio 4 foram semelhantes e no estádio 2 o SM3 conseguiu manter taxas fotossintéticas em média, 8% mais altas (Fig 5d). Em concordância, os resultados de A no estádio 1 foram acoplados a C_i que registrou uma concentração 9,5% maior com irrigação diária (Fig. 5e), e no manejo de solo SM3 a C_i reduziu 7.4% no estádio 3 (Fig. 5f).

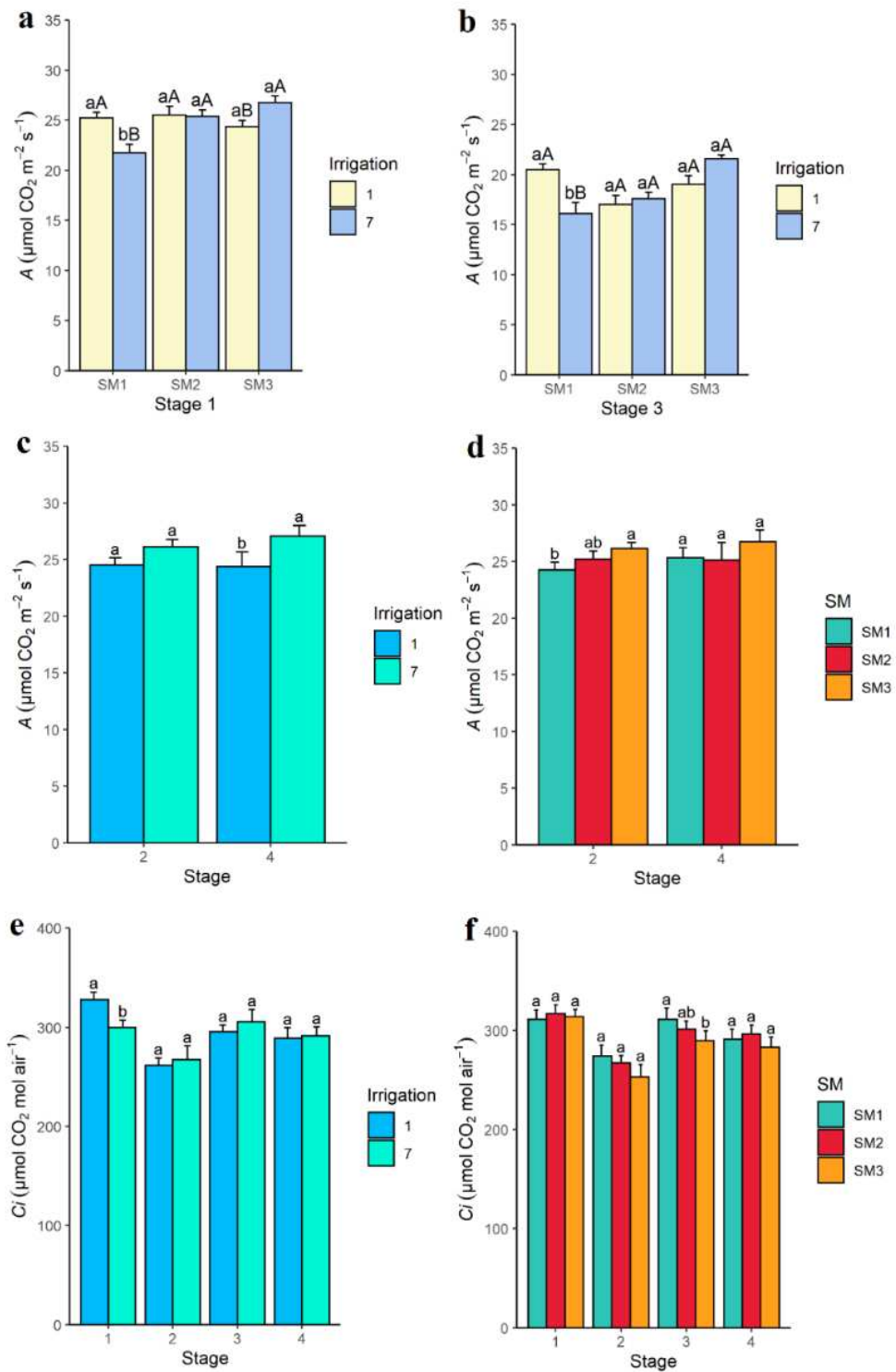


Figura 5 - Fotossíntese líquida (A) (a–d) e concentração interna de CO_2 (C_i) (e–f) medidas em diferentes estádios (1–4) em plantas de tomate para processamento submetidas a irrigação diária (1) e a cada sete dias (7) em diferentes manejos de solo [(SM1: aplicação exclusiva de calcário dolomítico; SM2: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; e SM3: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado

localmente em profundidade (30 cm)]. Todos os dados são expressos como média $\pm$ SE (n = 12). Nas interações, diferentes letras minúsculas denotam significância dentro da irrigação para cada manejo de solo, e diferentes letras maiúsculas denotam significância dentro dos manejos de solo para cada irrigação. Para efeitos isolados, as médias seguidas da mesma letra miniscúla indicam que não existem diferenças de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$) nas irrigações e manejos de solo.

4.5. Produtividade total

A produtividade dos frutos de tomate foi afetada pela interação dos manejos de irrigação e solo (Fig. 7). Em SM1 a produtividade reduziu 15,76% quando irrigação a cada sete dias foi imposta às plantas, e em SM2 não houve diferenças de produtividade em função dos dias de reposição da água evapotranspirada. Contudo, a combinação de irrigação a cada sete dias com o SM3 foi a melhor condição para a produtividade dos frutos, com aumentos de 80 e 69,68% em comparação a SM1 e SM2 com irrigação diária, enquanto com irrigação a cada sete dias os aumentos proporcionados por SM3 são de 113,45 e 34,94% quando comparado a SM1 e SM2, respectivamente, indicando uma acentuada vantagem de rendimento mesmo com turno de irrigação maior.

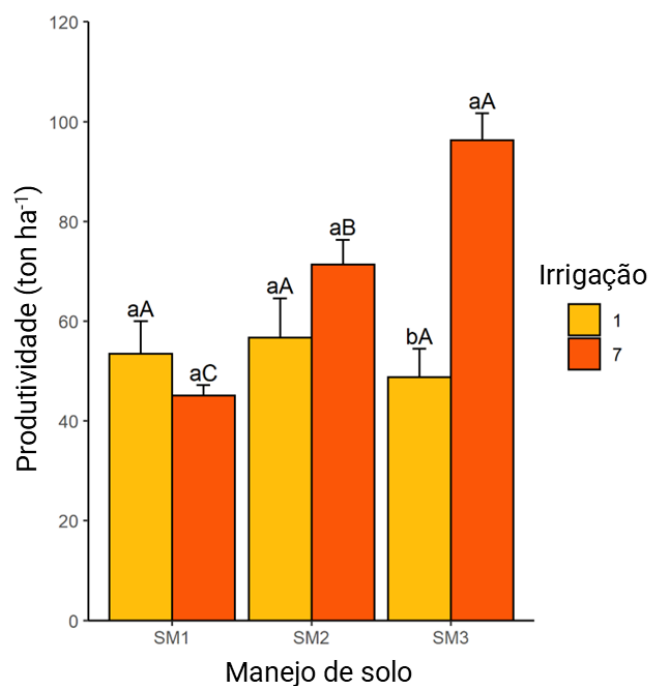


Figura 6 - Produtividade total de frutos de tomate para processamento submetidos a irrigação diária (1) e a cada sete dias (7) em diferentes manejos do solo [(SM1: aplicação exclusiva de

calcário dolomítico; SM2: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; e SM3: aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado localmente em profundidade (30 cm)]. Todos os dados são expressos como média $\pm$ SE ($n=6$). Diferentes letras minúsculas denotam significância dentro da irrigação para cada manejo de solo, e diferentes letras maiúsculas denotam significância dentro dos manejos de solo para cada irrigação.

5. DISCUSSÃO

Uma característica interessante da condição hídrica do solo foi o desenvolvimento de um perfil distinto de distribuição de água no solo após a diferenciação dos turnos de irrigação, de tal modo que solo irrigado a cada sete dias teve umidade mais alta nas camadas mais profundas do que solo irrigado diariamente. Esses resultados evidenciam que as raízes das plantas de tomate crescendo sob irrigação a cada sete dias possuíam uma fonte de água no solo profundo se tornando menos dependentes da água da camada superficial. É crucial notar que em ecossistemas agrícolas isso significa maior resiliência das plantas para superar limitações abióticas como, altas temperaturas e baixas precipitações. Além disso, o estado hidráulico da planta é amplamente afetado pelo aumento da demanda atmosférica de água (Kimm et al., 2020). A demanda atmosférica de água, caracterizada praticamente pelo déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV), é um dos principais motores da transpiração; e sob condições de alto DPV, as plantas tendem a fechar seus estômatos, o que restringe as atividades fotossintéticas (Monteith, 1995).

Por outro lado, a deficiência de água no solo, resultará em baixo suprimento de água no xilema ou raízes, o que induzirá o fechamento estomático, reduzindo a fotossíntese e a perda de água (Taiz et al., 2014; Huang et al., 2017). Portanto, é razoável afirmar que nestas condições, plantas irrigadas a cada sete dias possuíam vantagem para manter os estômatos abertos e, conseqüentemente, os processos metabólicos quando comparadas as plantas irrigadas diariamente. Ao mesmo tempo, a redistribuição hidráulica da água do solo profundo (> 100 cm de profundidade) ou água subterrânea para o solo no intervalo de 40 a 100 cm é um mecanismo plausível para explicar os conteúdos contrastantes de água no solo (Oerter e Bower, 2019). O transporte de água mais profunda e conseqüentemente mais fria para cima no solo via redistribuição hidráulica também é sustentado pelas temperaturas da camada superficial (0–20 cm) e intermediária (40–60 cm) do solo que são em média 3,5°C mais baixas do que no solo profundo. Assim, a água trazida de áreas mais profundas será mais fria do que o solo a 1 m da

superfície. Consequentemente, isso ajudou as folhas das plantas de tomate a se resfriar mais rápido e, portanto, influenciaria substancialmente nas regulações estomáticas.

O crescimento radicular, a nutrição e a produtividade das culturas podem ser afetadas pelas modificações químicas do solo causadas pela aplicação de calcário e gesso agrícola em sistemas agrícolas, enquanto níveis adequados de fósforo no solo compensam os efeitos negativos, mesmo que momentâneo, da limitação hídrica. As raízes são o principal órgão de absorção de água e P. Maximizar a absorção de P pelas raízes é um mecanismo central para lidar com incidentes de seca que se prevê aumentar tanto em intensidade quanto a frequência com as mudanças climáticas e tal maximização depende não apenas da morfologia da raiz (Raghothama, 2005), mas também da arquitetura da raiz (Lynch e Brown, 2001). No geral, o presente estudo mostrou que a combinação de calcário + gesso agrícola + adição de fósforo em profundidade aumentou significativamente a arquitetura da raiz, tanto na situação com reposição diária de água evapotranspirada quanto com reposição a cada sete dias. Estudos anteriores mostraram que a aplicação de calcário e gesso agrícola afetou a distribuição do sistema radicular e a ciclagem do fósforo do solo em ambiente tropical úmido e tropical, respectivamente (Firmano et al., 2021; Sousa et al., 2022). Outro estudo mostrou que o acoplamento dos fatores água-fósforo melhorou a matéria seca e a biomassa total de raízes finas em *Medicago sativa* L. (Liu et al., 2021). Isso é consistente com nossos resultados. No presente estudo, foi demonstrado que a combinação calcário + gesso + fósforo aplicado localmente a 30 cm em plantas de tomate irrigadas a cada sete dias, aumentou a densidade de raízes finas nas camadas mais profundas de Latossolo em ambiente tropical. Esses resultados reforçam ainda mais nosso conhecimento sobre a função do fósforo para promover mudanças na arquitetura do sistema radicular e para produzir raízes finas, essenciais para a absorção de água e nutrientes, e para sequestrar carbono no solo. Adicionalmente, um aumento de raízes finas, pode ajudar inclusive na aquisição do P e levar ao aproveitamento mais imediato do P fixado na matriz do solo.

O que é interessante neste estudo é a observação de que no tratamento I1SM3 a arquitetura do sistema radicular foi alterada principalmente na camada superior do solo (0–10 cm), enquanto o tratamento I7SM3 alterou a arquitetura do sistema radicular nas camadas mais profundas do solo (40–60 e 60–80 cm); em particular, para raízes finas. Isso pode ter ocorrido porque as plantas crescendo sob I7SM3 foram fortemente mais capazes de absorver água e de adquirir P do solo, devido pelos radiculares possuírem uma geometria ideal para a captura de P porque seu pequeno raio ajuda a reduzir o custo de carbono para a planta, além de estender a exploração do solo (Gahoonia e Nielsen, 1998). Isso também pode estar relacionado, a

distribuição de nutrientes no solo após a aplicação combinada de calcário e gesso agrícola, que presumidamente é esperado uma melhor distribuição de Ca, Mg e S no perfil do solo do que quando calcário aplicado isoladamente. Isso ocorre devido o gesso agrícola ser mais solúvel que o calcário e a capacidade do SO_4^{-2} para formar pares iônicos neutros com cátions na solução do solo. Esses pares iônicos então se deslocam pelo perfil do solo sob a influência da água percolada (Souza et al., 2022). Como resultado, há aumento da oferta de cálcio e redução da toxicidade do alumínio no subsolo (Caires et al., 2022); portanto, combinar calcário e gesso agrícola pode ser uma alternativa para melhorar o ambiente de crescimento vegetal em solos tropicais (Bossolani et al., 2020).

Estudos relataram a eficácia do calcário para reduzir a perda de P dos solos para a água (Murphy e Stevens, 2010; Andersson et al., 2016) e para aumentar as atividades enzimáticas e a biomassa microbiana (Haynes e Swift, 1988; Simard et al., 1994; von Tucher et al., 2018). Esta é uma observação importante porque uma eficiência melhorada de absorção de P pelo tomateiro, resultado do aumento da densidade de raízes muito finas e finas nas camadas mais profundas do solo, pode proporcionar uma redução significativa nas doses de fertilizantes fosfatados utilizadas, bem como levar ao aproveitamento mais imediato do P fixado na matriz do solo. Isso traria avanços favoráveis à sustentabilidade agrícola e melhoraria a renda líquida do produtor rural, o aproveitamento de áreas marginais e a economia de fertilizantes em nível nacional (Marques et al., 2022); contudo, mais pesquisas são necessárias para embasar esse argumento. Os resultados encontrados neste estudo indicam que a aplicação combinada calcário, gesso agrícola e P em profundidade pode aumentar a capacidade do tomate em se adaptar a deficiências hídricas, regulando as características radiculares para melhorar a absorção de água durante o crescimento e ajudar a preencher a lacuna entre a fisiologia vegetal e práticas agronômicas de manejo.

Os maiores potenciais hídricos foliares das plantas irrigadas a cada sete dias é uma evidência adicional para sustentar o argumento de que os tratamentos de irrigação a cada sete dias combinados aos manejos de solo SM2 e SM3 promoveram o alongamento do sistema radicular, aumentando a capacidade das plantas acessar fontes de água disponíveis e estáveis em camadas mais profundas do solo. Relacionando este achado com os resultados de distribuição de água no perfil do solo, percebemos estreita concordância, em que maior disponibilidade de água na profundidade de 80-100 cm foi registrada. Tomados em conjunto, estes resultados sugerem que essas plantas possuíam mecanismos que permitia maior resiliência em uma situação de limitação hídrica. Uma diminuição no potencial hídrico foliar influencia a eficiência da carboxilação da Rubisco e reduz a concentração interna de CO_2 (Ci) devido à

limitação da abertura estomática (Cornic e Massacci, 1996), reduzindo consequentemente a taxa de fotossíntese. Desta maneira, manejos que potencializem o desenvolvimento radicular, são essenciais para manter a pressão de turgescência foliar, a densidade estomática e o processo fotossintético. Isso se torna especialmente importante durante períodos de estresse hídrico porque as raízes representam a única rota de transporte de água para a planta (Khan et al., 2021).

De maneira geral, maiores valores de condutância estomática (g_s) foram observados em plantas submetidas ao intervalo de irrigação de sete dias associado às estratégias de manejo do solo SM2 e SM3. Esse padrão indica uma maior capacidade das plantas em manter o equilíbrio hídrico foliar, possivelmente devido a melhorias na disponibilidade de água no solo e no funcionamento hidráulico radicular, o que pode reduzir a necessidade de ajustes metabólicos associados à manutenção da abertura estomática em condições ambientais desafiadoras. Acoplados aos resultados de transpiração, é possível destacar que a reposição de água a cada sete dias combinada com SM2 e SM3 também desempenhou papel fundamental na minimização da quantidade de água perdida para a atmosfera, que é uma consequência inevitável da difusão livre através desta via, dado o duplo papel dos estômatos como conduto de CO_2 e água. Conforme relatado por Fischer et al. (1998), as evidências encontradas apontam para os efeitos que a g_s pode ter no rendimento das culturas, não apenas pela redução da difusão de CO_2 , mas também pelo impacto na perda de água e no resfriamento evaporativo da folha. Claro que, uma g_s elevada irá depender ainda de fatores genéticos e será variável e limitada pela água, estação do ano e geralmente não é previsível. Contudo, quando tomadas em conjunto, as evidências apresentadas demonstram que a reposição de água a cada sete dias combinada aos manejos de solo SM2 e SM3 foram adequados para manter maiores taxas de assimilação de carbono por unidade de água transpirada em um ambiente naturalmente flutuante, típico das condições experimentadas no campo.

Neste estudo, a reposição de água a cada sete dias combinada com SM3 foi de maneira geral mais eficiente para melhorar o desempenho da fotossíntese, indicando uma influência do manejo de solo com fósforo aplicado em profundidade no controle estomático. O controle estomático é a resposta imediata da planta a limitação hídrica mesmo que momentânea (Gupta et al., 2020). A taxa de A é reduzida principalmente pelo fechamento estomático ou comprometimento metabólico (Basu et al., 2016), como observado nos tratamentos com irrigação diária e SM1. De fato, é bem documentado que estômatos de plantas bem regadas reduzem as taxas fotossintéticas em cerca de 20% na maioria das espécies C_3 e menos em plantas C_4 no campo (Farquhar e Sharkey, 1982; Leakey et al., 2019). Isto está de acordo com o que foi observado neste estudo onde, plantas irrigadas a cada sete dias crescendo no solo

corrigido e com fósforo em profundidade tiveram g_s e A aumentadas quando comparadas as plantas irrigadas diariamente crescendo sob solo com aplicação exclusiva de calcário. Uma possível explicação para isso é que o fósforo desempenha papel essencial na manutenção da eficiência do transporte fotossintético de elétrons, uma vez que a disponibilidade de P_i regula a síntese de ATP, o balanço energético do cloroplasto e a regeneração de aceptores de elétrons necessários para sustentar o fluxo eletrônico entre os fotossistemas II e I (Carstensen et al., 2018).

Dado que o P está intimamente associado à transferência de energia, parece razoável afirmar que a aplicação de P em camadas mais profundas do solo, além de aumentar as reservas deste mineral nas camadas profundas do solo, também pode promover o uso mais eficiente da água e maior absorção de nutrientes da solução do solo. Essa resposta está relacionada as mudanças no sistema radicular, especialmente a maior distribuição de raízes finas. A função da raiz, bem como os custos energéticos para produzir e manter essas raízes são determinados principalmente por sua estrutura e principalmente por seu diâmetro (Raven e Edwards, 2001). Além disso, a absorção de um nutriente com baixa concentração e baixos coeficientes de difusão no solo, como o P, pode ser maior por unidade de biomassa radicular para estruturas de menor diâmetro. Desta maneira, raízes finas exploram um volume muito maior de solo por unidade de volume de raiz, melhorando a absorção de água e nutrientes (Hansel et al., 2017).

De fato, neste estudo, plantas de tomate crescendo sob o manejo I7SM3 possuíam uma arquitetura radicular mais desenvolvida, e melhor distribuição de raízes finas no perfil do solo permitindo o acesso das plantas a nutrientes e água de forma mais eficiente, ajudando a atender a alta taxa fotossintética na fase crítica de enchimento dos frutos. Além disso, um recente estudo metabolômico descobriu que a aplicação de fertilizante fosfatado no solo aumentou a síntese de metabólitos do solo incluindo ácido chiquímico, ácido L-glutâmico e N-acetilcolina, precursores de glutamina, prolina, arginina e lisina. Neste mesmo estudo, o nível de diosgenina que também existe amplamente nas plantas e é usado para sintetizar metabólitos secundários, como glicosídeos e os níveis de cis-4-hidroxi-D-prolina também aumentaram pelo fertilizante fosfatado aplicado no solo, o que pode promover resistência ao estresse, uma vez que o composto serve como um regulador osmótico, estabilizante da estrutura biológica de macromoléculas, reduz a acidez celular e regula o potencial redox celular (Cheng et al., 2022). Todos esses resultados apoiam a ideia de que a aplicação de P em camadas mais profundas do solo pode promover melhorias no metabolismo vegetal através de ácidos orgânicos absorvidos do solo que podem inclusive, aprimorar a função das células guardas das plantas. No entanto,

as mudanças dinâmicas do perfil de metabólitos do solo e sua correlação com o metabolismo vegetal precisam ser mais estudadas.

As diferenças no desenvolvimento radicular e respostas fisiológicas das plantas entre os tratamentos foram refletidas na produtividade dos frutos de tomate para processamento. O tratamento SM1 foi o que mais se assemelha ao que é praticado pelo tomaticultor no Brasil: correção do solo exclusivamente com calcário e irrigação diária. Esse manejo, foi o que resultou em menor produção e isso pode ser explicado pela lixiviação dos nutrientes para zonas fora do alcance das raízes neste tratamento. Além disso, o sistema radicular foi menos desenvolvido neste manejo, resultando em uma menor área de aproveitamento. Notavelmente, os resultados demonstraram que combinar calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado em profundidade (SM3) é uma estratégia viável para melhorar a capacidade produtiva do tomateiro irrigado a cada sete dias.

Uma questão que pode ser levantada pela comunidade sobre o tratamento SM3 é quanto a preocupação da adsorção do P aplicado em profundidade. No entanto, nas últimas décadas, acumulou-se evidências sobre métodos de aplicação de P (Costa et al., 2009; Dodd e Sharpley, 2015; Coelho et al., 2019; Preston et al., 2019). Estes estudos, concentraram esforços sobre o método de aplicação de P em solos intemperizados e ácidos por apresentar baixa mobilidade, nos quais a real necessidade de elevar os níveis iniciais de P, aliada à crença generalizada de que o solo tem capacidade indefinida de adsorção de P, leva a altas taxas de fertilização de P. O resultado, é altas taxas de P residual (legado de P) que se acumula em profundidades próximas da superfície em solos agrícolas após décadas de adubação fosfatada. Um dos resultados mais importantes encontrados em experimentos de longo prazo na estação de Rothamsted (Inglaterra) é que o P adicionado ao solo não é adsorvido irreversivelmente (Johnston e Poulton, 2019) e pode ser recuperado mais de 100 anos após sua aplicação. Quando tomados em conjunto, esses estudos sugerem que o manejo SM3 é uma abordagem promissora para aumentar o P residual em profundidade, devido a preocupações relacionadas ao esgotamento das reservas finitas de apatita, principal matéria-prima para produção de fertilizantes fosfatados.

O notável efeito do tratamento SM3 combinado com irrigação a cada sete dias pode ser atribuído à rápida solubilização do P, fornecido por uma fonte solúvel como o superfosfato triplo que aumenta a proporção de formas lábeis de P no solo (Soltangheisi et al., 2018) e pode elevar rapidamente os teores de P do solo a níveis adequados, o que aumenta significativamente a produtividade, especialmente em áreas de abertura de solos intemperizados. Corroborando com isto, um estudo de longa duração com diferentes estratégias de correção de P do solo e adubação de manutenção constatou maiores produtividades de soja e milho principalmente nos

primeiros anos (Oliveira et al., 2020). Da mesma forma, um estudo minucioso de Hansel et al. (2017), descobriram que a aplicação de superfosfato triplo aplicado à 20 cm de profundidade induziu aumento do crescimento radicular e a resiliência à seca em plantas de soja. Mudanças na distribuição radicular promovidas pela adubação fosfatada em profundidade podem contribuir para aumentar a eficiência do uso de P; e pode afetar a resiliência da planta ao estresse hídrico de curto prazo. Estudos recentes demonstraram que os sistemas radiculares profundos têm um papel importante na eficiência do uso da água (Hatfield et al., 2001; Fageria e Moreira, 2011; Joris et al., 2013). Portanto, é concebível afirmar que, sob certas circunstâncias de campo, o manejo SM3 é uma estratégia promissora para superar situações de limitação hídrica sazonal, que pode resultar em estresse hídrico. Como resultado, o manejo SM3 proporcionou maior resiliência climática às plantas crescendo sob este manejo. Em contraste, plantas crescendo sob SM1 com raízes mais próximas à superfície do solo se tornaram mais dependentes da umidade fornecida pela reposição de água diária e desta maneira, menos resilientes a superar eventos de precipitação mais espaçados.

6. CONCLUSÕES

A construção química do perfil do solo, especialmente com a aplicação de calcário + gesso agrícola + P aplicado localmente à 0,30 m de profundidade após correção do solo (SM3) combinada com a irrigação a cada sete dias, proporcionou maior resiliência climática às plantas crescendo sob esta estratégia de cultivo. Esta prática provou ser altamente viável e, portanto, é recomendada para solos tropicais. A análise do perfil do solo em profundidades de até 1 m forneceu informações sobre a estratificação de água e temperatura do solo, bem como a produção e distribuição de raízes, revelando diferenças entre as profundidades superior e inferior que não teriam sido reconhecidas em estudos típicos em profundidades menores. O efeito combinado de menor frequência de irrigação (I7) e maior fertilidade construída com o manejo SM3 resultou em desenvolvimento radicular aumentado nas camadas mais profundas do solo que se refletiu em melhorias nas respostas ecofisiológicas, como maior tempo de abertura dos estômatos, que por sua vez aumentou a eficiência de carboxilação e a taxa de fotossíntese durante o ciclo da cultura e, conseqüentemente, no desenvolvimento da planta de tomate e na produtividade. Essas mudanças resultam em maior rendimento de frutos e receita para os agricultores.

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1), 17-34.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Almeida, W.L., Ávila, R.T., Pérez-Molina, J.P., Barbosa, M.L., Marçal, D.M., de Souza, R.P., Martino, P.B., Cardoso, A.A., Martins, S.C.V., Da Matta, F.M. (2021). The interplay between irrigation and fruiting on branch growth and mortality, gas exchange and water relations of coffee trees. *Tree Physiology*, 41(1), 35-49.
- Alvarez Venegas, V.H., Novais, R.F., Barros, N.F., Cantarutti, R.B., Lopes, A.S. (1999). Interpretation of soil analysis results. Recommendations for use of amendments and fertilizers in Minas Gerais, 25-32.
- Andersson, H., Bergström, L., Djodjic, F., Ulén, B., & Kirchmann, H. (2016). Lime placement on subsoil as a strategy to reduce phosphorus leaching from agricultural soils. *Soil Use and Management*, 32(3), 381-389.
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5.
- Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E.F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 1-12.
- Bossolani, J.W., Crusciol, C.A.C., Merloti, L.F., Moretti, L.G., Costa, N.R., Tsai, S.M., Kuramae, E.E. (2020). Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma*, 375, 114476.
- Bossolani, J.W., Crusciol, C.A.C., Momesso, L., Portugal, J.R., Moretti, L.G., Garcia, A., Fonseca, M.C., Rodrigues, V.A., Calonego, J.C., dos Reis, A.R. (2022). Surface liming triggers improvements in subsoil fertility and root distribution to boost maize crop physiology, yield and revenue. *Plant and Soil*, 477, 319–341.
- Caires, E.F., Duarte, V.M., Rodrigues, G.L.A., Bini, A.R. (2022). Crop nutrition and grain yield as affected by phosphorus fertilization and continued use of phosphogypsum in an Oxisol under no-till management. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-16.
- Carmeis Filho, A.C., Penn, C.J., Crusciol, C.A., Calonego, J.C. (2017). Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 11-23.
- Carstensen, A., Herdean, A., Schmidt, S.B., Sharma, A., Spetea, C., Pribil, M., Husted, S. (2018). The impacts of phosphorus deficiency on the photosynthetic electron transport chain. *Plant physiology*, 177(1), 271-284.
- Cheng, H., Yuan, M., Tang, L., Shen, Y., Yu, Q., Li, S. (2022). Integrated microbiology and metabolomics analysis reveal responses of soil microorganisms and metabolic functions to phosphorus fertilizer on semiarid farm. *Science of The Total Environment*, 817, 152878.
- Coelho, M.J.A., Diaz, D.R., Hettiarachchi, G.M., Hansel, F.D., Pavinato, P.S. (2019). Soil phosphorus fractions and legacy in a corn-soybean rotation on Mollisols in Kansas, USA. *Geoderma Regional*, 18, e00228.
- Cornic, G., and A. Massacci. 1996. Leaf photosynthesis under drought stress. In *Photosynthesis and the environment*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 347–66. doi: 10.1007/0-306-48135-9_14.

Costa, C., Dwyer, L.M., Hamilton, R.I., Hamel, C., Nantais, L., Smith, D.L. (2000). A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis. *Agronomy Journal*, 92(4), 621-627.

Costa, S.E.V.G.D.A., Souza, E.D.D., Anghinoni, I., Flores, J.P.C., Cao, E.G., Holzschuh, M.J. (2009). Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 1237-1247.

Dariva, F.D., Copati, M.G.F., Pessoa, H.P., Alves, F.M., Dias, F.D.O., Picoli, E.A.D.T., da Cunha, F.F., Nick, C. (2020). Evaluation of anatomical and physiological traits of *Solanum pennellii* Cor. associated with plant yield in tomato plants under water-limited conditions. *Scientific reports*, 10(1), 1-13.

Delazari, F.T., Giovanelli, L.B., Gomes, R.S., Machado Junior, R., Lima, J.D.O., Freitas, E.M., Pereira, S.B., Silva, D.J.H. (2016). Irrigation water management during the ripening of tomato aiming fruit quality. *African Journal Agricultural Research*, 11, 4525-4531.

Dietz, K.J., Foyer, C. (1986). The relationship between phosphate status and photosynthesis in leaves. *Planta*, 167(3), 376-381.

Dodd, R.J., Sharpley, A.N. (2015). Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 282-293.

Eberhardt, D., Marchão, R., Quiquampoix, H., Le Guernevé, C., Ramaroson, V., Sauvadet, M., Muraoka, T., Becquer, T. (2021). Effects of companion crops and tillage on soil phosphorus in a Brazilian oxisol: a chemical and ³¹P NMR spectroscopy study. *Journal of Soils and Sediments*, 21(2), 1024-1037.

Embrapa. (2003). Sistema de Produção: cultivo de tomate para industrialização. Centro Nacional de Pesquisa em Hortaliças (Brasília, DF).

Fageria, N.K., Moreira, A. (2011). The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. *Advances in agronomy*, 110, 251-331.

Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(40), 10572-10577.

Fara, S.J., Delazari, F.T., Gomes, R.S., Araújo, W.L., da Silva, D.J.H. (2019). Stomata opening and productiveness response of fresh market tomato under different irrigation intervals. *Scientia Horticulturae*, 255, 86-95.

Farquhar, G.D., Sharkey, T.D. (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual review of plant physiology*, 33(1), 317-345.

Ferreira, E.B., Cavalcanti, P.P., Nogueira, D.A. (2018). ExpDes: Experimental Designs. R package version 1.2.0.

Firmano, R.F., Colzato, M., Bossolani, J.W., Colnago, L.A., Martin-Neto, L., Alleoni, L. R.F. (2021). Long-term lime and phosphogypsum broadcast affects phosphorus cycling in a tropical Oxisol cultivated with soybean under no-till. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 120(3), 307-324.

Fischer, R.A., Rees, D., Sayre, K.D., Lu, Z.M., Condon, A.G., Saavedra, A.L. (1998). Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler Canopies. *Crope Science* 38: 1467-1475. Link: <https://bit.ly/2UG9PcM>.

Gahoonia, T.S., Nielsen, N.E. (1998). Direct evidence on participation of root hairs in phosphorus (³²P) uptake from soil. *Plant and Soil*, 198(2), 147-152.

Germon, A., Laclau, J.P., Robin, A., Jourdan, C. (2020). Tamm Review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper?. *Forest Ecology and Management*, 466, 118135.

Giordano, L.B., Silva, J.B.C., Barbosa, V. (2000). Escolha de cultivares e plantio. In: Silva, J.B.C., Giordano, L.B. (Ed.). *Tomate para processamento industrial*. Brasília: Embrapa, cap. 3, 36-59.

- Gupta, A., Rico-Medina, A., Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269.
- Hansel, F.D., Amado, T.J., Ruiz Diaz, D.A., Rosso, L.H., Nicoloso, F.T., Schorr, M. (2017). Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. *Agronomy Journal*, 109(6), 2936-2944.
- Hatfield, J.L., Sauer, T.J., Prueger, J.H. (2001). Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. *Agronomy journal*, 93(2), 271-280.
- Haynes, R.J., Swift, R.S. (1988). Effects of lime and phosphate additions on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulphur and phosphorus in an acid soil. *Biology and Fertility of Soils*, 6(2), 153-158.
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*, 237(2), 173-195.
- Holland, J.E., Bennett, A.E., Newton, A.C., White, P.J., McKenzie, B.M., George, T.S., Pakeman, R.J., Bailey, J.S., Fornara, D.A., Hayes, R.C. (2018). Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. *Science of the Total Environment*, 610, 316-332.
- Huang, C.W., Domec, J.C., Ward, E.J., Duman, T., Manoli, G., Parolari, A.J., Katul, G.G. (2017). The effect of plant water storage on water fluxes within the coupled soil–plant system. *New Phytologist*, 213(3), 1093-1106.
- Jacob, J., Lawlor, D.W. (1992). Dependence of photosynthesis of sunflower and maize leaves on phosphate supply, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activity, and ribulose-1, 5-bisphosphate pool size. *Plant Physiology*, 98(3), 801-807.
- Jagadish, S.K. (2020). Heat stress during flowering in cereals—effects and adaptation strategies. *New Phytologist*, 226(6), 1567-1572.
- Jia X.X., Shao M.A., Zhang C.C., Zhao C.L. (2016). Variation and simulation of soil water content within different soil depths along the south–north transect of the Loess Plateau. *Advances in Water Science* 27: 520–528.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R. (2019). Phosphorus in agriculture: A review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK. *Journal of environmental quality*, 48(5), 1133-1144.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R. (2019). Phosphorus in agriculture: A review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK. *Journal of environmental quality*, 48(5), 1133-1144.
- Joris, H.A.W., Caires, E.F., Bini, A.R., Scharr, D.A., Haliski, A. (2013). Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant and soil*, 365(1), 409-424.
- Kang, J., Yu, H., Tian, C., Zhou, W., Li, C., Jiao, Y., Liu, D. (2014). Suppression of photosynthetic gene expression in roots is required for sustained root growth under phosphate deficiency. *Plant physiology*, 165(3), 1156-1170.
- Khan, Z., M. N. Khan, K. Zhang, T. Luo, K. Zhu, and L. Hu. 2021. The application of biochar alleviated the adverse effects of drought on the growth, physiology, yield and quality of rapeseed through regulation of soil status and nutrients availability. *Industrial Crops and Products* 171:113878. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113878.
- Koevoets, I.T., Venema, J.H., Elzenga, J.T., Testerink, C. (2016). Roots withstanding their environment: exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1335.
- Leakey, A.D., Ferguson, J.N., Pignon, C.P., Wu, A., Jin, Z., Hammer, G.L., Lobell, D. B. (2019). Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of C3 and C4 crops. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 781-808.

- Liu, X., Zhao, J., Liu, J., Lu, W., Ma, C., Gu, X., Zhang, Q. (2021). Water–phosphorus coupling enhances fine root turnover and dry matter yield of alfalfa under drip irrigation. *Agronomy Journal*, 113(5), 4161-4175.
- Luz, J.M., Bittar, C.A., Oliveira, R.C., Nascimento, A.R., Nogueira, A.P. (2016). Desempenho e divergência genética de genótipos de tomate para processamento industrial. *Horticultura Brasileira*, 34(4), 483-490.
- Lynch, J.P., Brown, K.M. (2001). Topsoil foraging—an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant and Soil*, 237(2), 225-237.
- Machado, J., Fernandes, A.P.G., Fernandes, T.R., Heuvelink, E., Vasconcelos, M.W., Carvalho, S.M.P. (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.
- Mantovani, E.C., Delazari, F.T., Dias, L.E., de Assis, I.R., Vieira, G.H., Landim, F.M. (2013). Yield and water use efficiency for two sweet potato cultivars depending on irrigation depths. *Horticultura Brasileira*, 31(4), 602-612.
- Marques, D.J., da Silva, E.C., Siqueira, J.A.C., Abedi, E., Veloso, F.R., Maciel, G.M., Maluf, W.R. (2022). Variation in the dynamic of absorption and efficiency of phosphorus use in tomato. *Scientific Reports*, 12(1), 1-14.
- Masmoudi, F., Tounsi, S., Dunlap, C.A., Trigui, M. (2021). Halotolerant *Bacillus spizizenii* FMH45 promoting growth, physiological, and antioxidant parameters of tomato plants exposed to salt stress. *Plant Cell Reports*, 40(7), 1199-1213.
- McCormack, M.L., Dickie, I.A., Eissenstat, D.M., Fahey, T.J., Fernandez, C.W., Guo, D., Helmisaari, H.S., Hobbie, E.A., Iversen, C.M., Jackson, R.B., Leppälampi-Kujansuu, J., Norby, R.J., Phillips, R.P., Pregitzer, K.S., Pritchard, S.G., Rewald, B., Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207(3), 505-518.
- Monteith, J.L. (1995). A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell & Environment*, 18(4), 357-364.
- Moraes, M.T., Debiasi, H., Franchini, J.C., Mastroberti, A.A., Levien, R., Leitner, D., Schnepf, A. (2020). Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research*, 200, 104611.
- Murphy, P.N., Stevens, R.J. (2010). Lime and gypsum as source measures to decrease phosphorus loss from soils to water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 212(1), 101-111.
- Oerter, E.J., Bowen, G.J. (2019). Spatio-temporal heterogeneity in soil water stable isotopic composition and its ecohydrologic implications in semiarid ecosystems. *Hydrological Processes*, 33(12), 1724-1738.
- Oliveira, L.E.Z., de Sousa, D.M., de Figueiredo, C.C., Nunes, R.D.S., Malaquias, J.V. (2020). Long-term phosphate fertilization strategies evaluation in a Brazilian Oxisol. *Agronomy Journal*, 112(5), 4303-4320.
- Preece, C., Peñuelas, J. (2016). Rhizodeposition under drought and consequences for soil communities and ecosystem resilience. *Plant and Soil*, 409(1-2), 1-17.
- Preston, C.L., Ruiz Diaz, D.A., Mengel, D.B. (2019). Corn response to long-term phosphorus fertilizer application rate and placement with strip-tillage. *Agronomy Journal*, 111(2), 841-850.
- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Viena, Austria.
- Raghothama, K.G., Karthikeyan, A.S. (2005). Phosphate acquisition. *Plant and Soil*, 274(1), 37-49.
- Rao, I. M., Terry, N. (1995). Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet (IV. Changes with time following increased supply of phosphate to low-phosphate plants). *Plant Physiology*, 107(4), 1313-1321.

- Raven, J.A., Edwards, D. (2001). Roots: evolutionary origins and biogeochemical significance. *Journal of experimental botany*, 52(suppl_1), 381-401.
- Rosolem, C.A., Ritz, K., Cantarella, H., Galdos, M.V., Hawkesford, M.J., Whalley, W.R., Mooney, S.J. (2017). Enhanced plant rooting and crop system management for improved N use efficiency. *Advances in agronomy*, 146, 205-239.
- Sadok, W., Lopez, J.R., Smith, K.P. (2021). Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2102-2116.
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumberras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Araujo Filho, J.C., Oliveira, J.B., Cunha, T.J.F. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa, Brasília, Brazil.
- Simard, R.R., Angers, D.A., Lapierre, C. (1994). Soil organic matter quality as influenced by tillage, lime, and phosphorus. *Biology and fertility of soils*, 18(1), 13-18.
- Sivak, M.N., Walker, D.A. (1986). Photosynthesis in vivo can be limited by phosphate supply. *New Phytologist*, 102(4), 499-512.
- Soil Survey Staff, (2014). Keys to Soil Taxonomy USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington DC.
- Soltangheisi, A., Rodrigues, M., Coelho, M.J.A., Gasperini, A.M., Sartor, L.R., Pavinato, P.S. (2018). Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 179, 20-28.
- Sousa, R.N., da Silva, B.A., da Costa, V.V., da Silva Teixeira, R., Valadares, S.V., da Silva, I.R., Venegas, V.H.A., Vergütz, L. (2022). Limestone and phosphogypsum are key drivers of eucalypt production in the highly weathered soils of Brazil. *Plant and Soil*, 1-21.
- Sun, F., Song, C., Wang, M., Lai, D.Y., Tariq, A., Zeng, F., Zhong, Q., Wang, F., Li, Z., Peng, C. (2020). Long-term increase in rainfall decreases soil organic phosphorus decomposition in tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 151, 108056.
- Taiz, L., Zeiger E., I.M. Moller, A. Murphy Plant physiology (Sixth) Sinauer Assoc. (2014).
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., (2017). Manual de métodos de análise de solo. Brasília: Embrapa, 573.
- Van Vuuren, D.P., Bouwman, A.F., Beusen, A.H. (2010). Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global environmental change*, 20(3), 428-439.
- 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. *Frontiers in plant science*, 9, 1480.
- von Tucher, S., Hörndl, D., Schmidhalter, U. (2018). Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet. *Ambio*, 47(1), 41-49.
- Wang, C., Fu, B., Zhang, L., Xu, Z. (2019). Soil moisture–plant interactions: an ecohydrological review. *Journal of Soils and Sediments*, 19(1), 1-9.
- Xi, B., Wang, Y., Jia, L., Bloomberg, M., Li, G., Di, N. (2013). Characteristics of fine root system and water uptake in a triploid *Populus tomentosa* plantation in the North China Plain: implications for irrigation water management. *Agricultural Water Management*, 117, 83-92.
- Zotarelli, L., Scholberg, J.M., Dukes, M.D., Muñoz-Carpena, R., Icerman, J. (2009). Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural water management*, 96(1), 23-34.

**ESTRATÉGIAS COMBINADAS DE MANEJO DO SOLO MELHORAM O
DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO E AFETAM O ACÚMULO DE PROLINA,
CONTEÚDO FENÓLICO TOTAL E DE EROs EM PLANTAS DE TOMATE SOB
DEFICIT HÍDRICO CONTROLADO**

CAPÍTULO 2

**ESTRATÉGIAS COMBINADAS DE MANEJO DO SOLO MELHORAM O
DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO E AFETAM O ACÚMULO DE PROLINA,
CONTEÚDO FENÓLICO TOTAL E DE EROs EM PLANTAS DE TOMATE SOB
DEFICIT HÍDRICO CONTROLADO**

RESUMO

Pereira, Ednângelo Duarte, MSc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2024. Capítulo II. **Estratégias combinadas de manejo do solo melhoram o desempenho fotossintético e afetam o acúmulo de prolina, conteúdo fenólico total e de EROs em plantas de tomate sob déficit hídrico controlado.** Orientador: Derly José Henriques da Silva

É imprescindível melhorar a eficiência no uso da água na agricultura, devido à alta demanda por água e as secas causadas pelas mudanças climáticas. O uso da irrigação com déficit regulado tem sido considerado uma estratégia inovadora para economizar água, e para aumentar a eficiência do uso da água e nutrientes nas plantas. Esta prática pode ser potencializada quando combinada com o manejo do solo. Além disso, a melhoria da arquitetura radicular e a melhoria da absorção de água e nutrientes em zonas mais profundas podem ser conseguidas através da aplicação de fósforo em profundidade. O presente estudo investigou o uso integrado da calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado em profundidade na biossíntese de pigmentos fotossintéticos, trocas gasosas, biossíntese de prolina e a mitigação do estresse oxidativo causados pelo déficit de irrigação controlado em plantas de tomate. O uso combinado dos manejos de solo calcário + gesso agrícola (SM2); calcário + gesso agrícola + fósforo aplicado em profundidade (SM3) combinadas a frequência de irrigação de sete dias (I7) favoreceu o índice de clorofilas e fotossíntese ao longo do dia. O acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), prolina e o conteúdo de componentes antioxidantes não enzimáticos também foram reduzidas com uso de SM2 e SM3 tanto em condições de irrigação diária como em sete dias. Portanto, as estratégias combinadas de solo SM2 e SM3 combinadas com irrigação de sete dias são recomendadas para reduzir os impactos de estresses abióticos no cultivo a campo de tomate.

Palavras-chave: Antioxidantes. Irrigação com déficit regulado. Manejo do solo. Osmólitos. Tomate.

**COMBINED SOIL MANAGEMENT STRATEGIES IMPROVE
PHOTOSYNTHETIC PERFORMANCE AND AFFECT THE ACCUMULATION OF
PROLINE, TOTAL PHENOLIC CONTENT AND ROS IN TOMATO PLANTS
UNDER CONTROLLED WATER DEFICIT**

ABSTRACT

Pereira, Ednângelo Duarte, MSc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2024. Chapter II. **Combined soil management strategies improve photosynthetic performance and affect the accumulation of proline, total phenolic content, and ROS in tomato plants under controlled water deficit.** Adviser: Derly José Henriques da Silva.

Improving agricultural water-use efficiency is imperative in the face of increasing water demand and the intensification of drought events driven by climate change. Regulated deficit irrigation (RDI) has emerged as a promising strategy to reduce water consumption while enhancing water- and nutrient-use efficiency in crops. The effectiveness of this approach may be further enhanced when integrated with appropriate soil management practices. In addition, improvements in root system architecture and greater acquisition of water and nutrients from deeper soil layers can be achieved through deep phosphorus placement. This study evaluated the integrated effects of liming, agricultural gypsum, and deep phosphorus placement on the biosynthesis of photosynthetic pigments, leaf gas exchange, proline accumulation, and the mitigation of oxidative stress induced by regulated deficit irrigation in field-grown tomato plants. The combined soil management strategies consisting of lime plus agricultural gypsum (SM2) and lime plus agricultural gypsum plus deep phosphorus placement (SM3), when associated with a seven-day irrigation interval (I7), enhanced chlorophyll content and maintained higher photosynthetic performance throughout the day. Moreover, the accumulation of reactive oxygen species (ROS), proline, and non-enzymatic antioxidant compounds was reduced under both SM2 and SM3, regardless of whether plants were irrigated daily or at seven-day intervals. Overall, the integrated soil management strategies SM2 and SM3, combined with a seven-day irrigation interval, effectively enhanced the physiological performance of tomato plants and mitigated the adverse effects of water deficit. These findings highlight the potential of integrating soil management with regulated deficit irrigation as a sustainable approach to improving crop resilience to abiotic stress while reducing irrigation water requirements under field conditions.

Key words: Antioxidants. Regulated deficit irrigation. Soil management. Osmolytes. Tomato.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas trouxeram desafios sem precedentes para a agricultura. Um dos maiores desafios do agricultor moderno é aumentar a produção agrícola utilizando a água de forma mais eficiente, e isto, requer conhecimento avançado sobre a fisiologia do estresse das plantas para evitar perdas no crescimento e rendimento das colheitas (Dariva et al., 2021; de Castro Filho et al., 2024). As mudanças climáticas, intensificaram a frequência, duração e intensidade de eventos de seca em 74% numa escala global, reduzindo o potencial de produção dos cultivos agrícolas (Yuan, et al., 2023). Adicionalmente, manejos inadequados do solo têm favorecido perdas excessivas de carbono orgânico e nutrientes, o que aumenta o uso de fertilizantes (Martinez-Mena et al., 2020). Portanto, a otimização e desenvolvimento de estratégias de manejo de água e nutrientes é primordial em futuros sistemas agrícolas.

A umidade do solo ou os regimes de irrigação são fatores importantes que afetam o estado hídrico, a fotossíntese, e a produtividade das plantas (Li et al., 2019). A irrigação com déficit controlado (DI) é uma estratégia que visa reduzir a quantidade de água aplicada sem reduções significativas na produtividade (Dodd, 2009). O déficit hídrico impacta as plantas quando a água disponível no solo é baixa e a transpiração supera a absorção de água pela planta. Isso resulta em redução das taxas fotossintéticas (Ávila et al., 2026) e aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Houmani e Corpas, 2024) que em altas concentrações podem causar peroxidação de lipídios, oxidação de proteínas, danos aos ácidos nucleicos, inibição enzimática, ativação da via de morte celular programada (PCD) e, finalmente, levando à morte das células (Sharma et al., 2012).

Apesar, de sua atividade destrutiva, as EROs em baixas concentrações são moléculas sinalizadoras bem descritas em uma variedade de processos celulares, incluindo tolerância a estresses ambientais (Yan, et al., 2007). Em condições desfavoráveis e altos níveis de estresse, as plantas fecham seus estômatos resultando em menor absorção de CO₂. A redução da assimilação de CO₂ causada pelo fechamento estomático limita o consumo de ATP e NADPH pelo ciclo de Calvin, promovendo um desvio de elétrons para o O₂, o que intensifica a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e desencadeia estresse oxidativo. (Ali et al., 2020). EROs podem aparecer como peróxido de hidrogênio (H₂O₂), oxigênio singlete (¹O₂), ânion superóxido (O₂⁻), radical livre hidroxílico (OH) e radicais livres de peroxidação lipídica (Feng et al., 2013). De forma complementar, o óxido nítrico e as EROs foram identificadas como moléculas de sinalização chave em células-guardas, onde atuam como mensageiros secundários induzindo o aumento da síntese de ABA para promover o fechamento estomático em várias

espécies, incluindo *Arabidopsis*, *Vicia faba*, ervilha, tomate, cevada e trigo (Pei *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2001; Desikan *et al.*, 2002, 2004; Garcia-Mata & Lamattina 2002; Neill *et al.*, 2002a).

O desempenho agronômico da cultura depende de uma coordenação bem-sucedida de processos fisiológicos, anatômicos, moleculares e morfológicos no nível da raiz, caule e folha. O emprego recente de otimização e desenvolvimento de estratégias de manejo, como irrigação com déficit regulado, aplicação de calcário e gesso agrícola combinados ou não, e aplicação de fósforo localmente próximo as raízes ou no subsolo para estimular o crescimento das raízes em várias espécies incluindo tomate, soja e milho (Fara *et al.*, 2019; Bossolani *et al.*, 2020; Minato *et al.*, 2023; da Silva Martins *et al.*, 2024), tem sido considerado uma solução inovadora na agricultura, especialmente para a mitigação de eventos estressantes extremos. Um melhor desenvolvimento inicial das raízes e, conseqüentemente, um melhor estabelecimento do sistema radicular, desempenham papéis importantes na aquisição de recursos como água e nutrientes minerais de camadas mais profundas do solo o que pode garantir altos rendimentos, a qualidade da planta e do produto colhido. Além disso, em situações em que a disponibilidade de água é limitada, as plantas de raízes superficiais são particularmente vulneráveis, com perdas de rendimento mais substanciais (Singh *et al.*, 2019).

O tomate é o segundo vegetal mais cultivado e consumido no mundo (Cammarano *et al.*, 2022). É rico em licopeno, vitamina C, E, flavonoides, carotenos e antocianinas, compostos caracterizados como antioxidantes, antitumoral e anti-inflamatórios (Rosa-Martínez *et al.*, 2021). A disponibilidade de água no solo é o fator mais importante para adequado desempenho fisiológico das plantas e estudos com novas estratégias de manejo que podem favorecer a captação de água e melhorar a hidratação celular, especialmente em um cenário de mudanças climáticas são muito necessárias. O efeito individual do manejo do solo e da água têm sido amplamente estudados, enquanto poucas literaturas referem o efeito combinado desses fatores, especialmente no aumento da tolerância dos estresses abióticos em plantas de tomate. Assim, esta pesquisa visa avaliar os efeitos combinados da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade combinados ou não, no alívio dos efeitos negativos causados pelo déficit de irrigação controlado em plantas de tomate.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da planta e delineamento experimental

Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido comercial Heinz 9553 (H9553), foi utilizado no cultivo de campo. H9553 apresenta resistência a *Fusarium oxysporium* raças 1 e 2, *Meloidogyne incógnita*, tolerância ao cancro da haste causado por *Alternaria alternata* f. sp., crescimento determinado e atinge a maturidade completa dentro de um intervalo de 110–120 dias (Giordano et al., 2000; Luz et al., 2016). A semeadura foi realizada em bandejas de poliestireno de 128 células dispostas em viveiro agrícola de aço galvanizado e dimensões de 6,4 m de largura por 18,0 m de comprimento com 3,5 m de altura, fechado em 45°, com tela monofilamento, malha para sombreamento de 50%.

O experimento foi em delineamento de blocos casualizados, com 6 repetições em esquema de parcelas subdivididas. Duas frequências de irrigação foram implementadas nas parcelas (FI – um e sete dias) e três métodos de manejo de solo (fertilização convencional + calcário [FC]; fertilização convencional + calcário + gesso [FCG]; fertilização convencional + calcário + gesso + fósforo aplicado em profundidade [FLGP]) foram implementados nas subparcelas. A área experimental foi composta por 36 unidades experimentais de 13,5 m² (4,5 m×3 m). As unidades experimentais foram dispostas em 4 fileiras simples de 4,5 m de comprimento e 3,0 m de largura, com 1,0 m entre fileiras, 0,3 m entre plantas e 1,1 m de largura entre unidades experimentais. Cada unidade experimental foi composta por 64 plantas, sendo as 24 plantas centrais utilizadas para avaliações. Foram consideradas bordaduras as fileiras únicas nas extremidades e duas plantas nas bordas das fileiras centrais.

O experimento foi realizado no período de abril a setembro de 2022, na área experimental da Unidade Técnico-Operacional de Ensino (UEPE), pertencente ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, Zona da Mata do estado de Minas Gerais, Brasil (20° 45'S, 42° 51'W, com altitude de 693m).

2.2. Preparo do solo e plantio

O solo da área foi classificado como Latossolo, classificação brasileira; Oxisol (US Soil Taxonomy) (Santos et al. 2018, Soil Survey Staff, 2014). As características físico-químicas iniciais do solo foram determinadas (Tabela 1). As características físicas e químicas do solo foram avaliadas conforme metodologia proposta por Claessen et al. (1997). P, K, Fe, Zn, Mn e Cu disponíveis extraídos com Mehlich⁻¹; Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; Acidez

potencial em pH 7,0 com acetato de cálcio obtido a partir de 1 mol L⁻¹; B foi extraído em água quente. Calcário e gesso foram aplicados manualmente. O calcário dolomítico foi aplicado na superfície do solo 130 dias antes do transplantio e incorporado até 0,25 m de profundidade com arado de aiveca de duas hastas seguida de gradagem leve. Após essas operações, 74 dias antes do transplante, o gesso foi adicionado em dose única na superfície do solo nas unidades experimentais que envolveram manejo do solo com calcário e gesso. A complementação de P em profundidade aplicada no sulco de plantio a 0,30 m de profundidade, foi feita no dia seguinte ao transplante das mudas na forma de superfosfato triplo, nas quantidades de 4,35 (kg parcela⁻¹), 1,35 (kg parcela⁻¹) e 163,5 (g m⁻¹ linear), respectivamente.

Após o preparo do solo e vinte e cinco dias após a emergência, mudas com 12 a 15 cm de altura e 4 a 6 folhas verdadeiras foram transplantadas para a área de cultivo experimental. A produção de mudas, transplantio, controle de plantas daninhas, doenças e pragas foram realizados conforme Alvarenga et al., (2004).

Tabela 1. Características físico-químicas do solo da área experimental

Parâmetros	Profundidade (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
pH H ₂ O	6.35	6.53	6.51	6.25	6.07
P (mg dm ⁻³)	139.50	4.80	4.70	2.40	4.70
K (mg dm ⁻³)	136.0	42.0	18.0	10.0	22.0
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4.01	2.78	2.67	2.38	2.32
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.44	0.30	0.35	0.34	0.40
S	6.40	2.20	4.10	15.60	35.00
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4.00	1.90	2.40	2.40	2.20
SB (cmol _c dm ⁻³)	4.80	3.19	3.07	2.75	3.03
CTC (cmol _c dm ⁻³)	8.80	5.09	5.47	5.15	5.23
t (cmol _c dm ⁻³)	4.80	3.19	3.07	2.75	3.03
V (%)	54.50	62.70	56.10	53.40	57.90
m (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MO (dag kg ⁻¹)	2.53	1.33	1.06	1.46	0.93
P-rem (mg L ⁻¹)	28.90	14.30	8.30	7.60	6.40
Zn (mg dm ⁻³)	9.72	0.30	0.14	0.00	0.56
Fe (mg dm ⁻³)	59.30	57.60	37.60	35.00	35.50
Mn (mg dm ⁻³)	84.20	26.70	12.30	8.50	9.70
Cu (mg dm ⁻³)	2.18	2.09	1.54	1.21	1.14
B (mg dm ⁻³)	0.44	0.24	0.10	0.15	0.13
Areia (%)	32.20	17.60	12.60	13.90	14.30
Silte (%)	10.40	11.20	9.90	8.70	9.50

Argila (%)	57.40	71.20	77.50	77.40	76.20
Mi (m ³ m ⁻³)	0.42	0.41	0.47	0.47	0.47
Ma (m ³ m ⁻³)	0.07	0.11	0.04	0.04	0.03
θ_{FC} (m ³ m ⁻³)	0.38	0.42	0.44	0.46	0.46
θ_{WP} (m ³ m ⁻³)	0.22	0.24	0.25	0.23	0.26
Ds (g cm ⁻³)	1.03	1.02	0.99	0.99	0.97

SB Soma de bases, *CTC* capacidade de troca catiônica, *t* capacidade efetiva de troca catiônica, *V* índice de saturação de base, *m* índice de saturação de alumínio, *MO* matéria orgânica, *P-rem* fósforo remanescente, *Mi* Microporosidade, *Ma* Macroporosidade, *θ_{FC}* Capacidade de campo, *θ_{WP}* Ponto de murcha, *Ds* densidade do solo.

2.3. Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi determinado pela evapotranspiração da cultura (ET_c). A demanda hídrica da cultura e as frequências de irrigação (FI) adotadas foram calculadas seguindo a ET_c estimada, com base nos coeficientes de ajuste em relação à evapotranspiração de referência (ET_0) (Tabela 2). A ET_0 foi calculada a partir dos dados meteorológicos usando a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998a; Angeli et al., 2016).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (4) \quad \text{em} \quad \text{que: } ET_c \text{ é}$$

$$K_c = (K_{cb} \times K_s) + K_e \quad (5) \quad \text{a}$$

evapotranspiração da cultura, em mm d⁻¹; ET_0 é a evapotranspiração de referência, em mm d⁻¹; K_c é o coeficiente da cultura, adimensional; K_{cb} é o coeficiente basal da cultura, adimensional; K_e é o coeficiente da evaporação do solo, adimensional; e K_s é o coeficiente de estresse, adimensional.

O ciclo do tomate foi dividido em fases fenológicas e os valores de K_{cb} foram ajustados de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura. Os K_{cb} inicial, intermediário e final foram 0,15, 1,15 e 0,70, respectivamente (Allen et al., 1998).

O método de irrigação utilizado foi o gotejamento localizado. Foi utilizado o equipamento de irrigação Naan Dan Jain, modelo AmnonDrip, auto compensante e antidrenante operando com vazão real de 1,60 L h⁻¹. O sistema de irrigação operou com uniformidade de 99,4%, conforme determinado pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (Mantovani et al., 2013).

Tabela 2. Quantidade total de água aplicada pelo sistema de irrigação por gotejamento, precipitação e evapotranspiração da cultura (ETc) no experimento

	Freq	Prec	IRN	ITN	Prec + ITN	ETc
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Experimento	I1	66,10	125,71	138,76	204,86	182,53
	I7	66,10	124,38	137,37	204,86	182,53

Freq= Frequência de irrigação em dias em que I1 = irrigação ótima e I7 = déficit de irrigação; Prec= precipitação; IRN= Irrigação Real Necessária; ITN= Irrigação Total Necessária e ETc= Evapotranspiração da cultura.

O déficit de pressão de vapor (DPV) e o tempo de irrigação para cada tratamento foi estimado com base na pressão de saturação do vapor d'água e na pressão parcial do vapor d'água, de acordo com a equação proposta por Allen et al., (1998). A umidade relativa do ar e o DPV médio diário durante o experimento são apresentados na figura S2.

$$e_s = 0.6108 \times 10^{\left[\frac{7.5 \times T}{237.3 + T}\right]} \quad (1)$$

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (2)$$

$$DPV = (e_s - e_a) \quad (3)$$

em que: e_s corresponde à pressão de saturação de vapor d'água no ar (kPa);

T corresponde à temperatura do ar (°C); e_a corresponde à pressão parcial de vapor d'água (kPa); UR corresponde à umidade relativa do ar (%); e DPV corresponde ao déficit de pressão de vapor d'água no ar (kPa).

2.4. Condições do tempo

Os dados meteorológicos foram obtidos através de uma estação meteorológica automática E4000 (IRRIPLUS) equipada com sensores que medem temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s^{-1}), radiação solar ($\text{W m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm). Os dados foram coletados e utilizados para cálculos de manejo de irrigação. O experimento foi conduzido durante a estação seca, com apenas uma ocorrência de chuva durante todo o período experimental. Neste cenário específico, o seguinte procedimento foi implementado: a quantidade de chuva foi subtraída e uma redução de água a necessidade foi aplicada com base em cálculos fornecidos pela estação meteorológica local.

2.5. Análise do índice de clorofila

A análise dos índices de clorofila foi realizada pelo método não destrutivo, utilizando um equipamento eletrônico portátil medidor de clorofila (ClorofiLOG, modelo CFL 1030, Porto Alegre, RS), com medições realizadas no estágio de crescimento inicial e desenvolvimento do fruto em três horários 09:00-12:00, 14:00-16:00, 16:00-18:00 com os valores escalonados no índice de clorofila de Falker (ICF) (Barbosa et al., 2024).

2.6. Trocas gasosas

Um analisador de gases infravermelho (modelo IRGA – LCPro, ADC BioScientific Ltd.) foi utilizado para avaliar as trocas gasosas, com medições realizadas em três horários 09:00-12:00, 14:00-16:00, 16:00-18:00. As medições da fotossíntese líquida (A — $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s — $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i — $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$) e taxa de transpiração (E — $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram realizadas. As trocas gasosas foram realizadas no estágio de crescimento inicial e desenvolvimento do fruto. A investigação foi realizada neste estágio para garantir que todas as folhas do tratamento de reposição de água a cada sete dias usada na análise foram formadas durante um período de exposição a limitação hídrica. Isso dá tempo para que as plantas se ajustem às condições adversas e, portanto, as modificações (especialmente em relação à anatomia da folha e à composição cuticular da folha) são mais prováveis de ocorrer.

2.7. Análises bioquímicas

2.7.1. Teor de Prolina Livre

O teor de prolina livre foi determinado de acordo com Bates et al. (Bates et al., 1973), com adaptações. Resumidamente, foi tomada a terceira ou quarta folha totalmente expandida de uma planta por repetição, congeladas em nitrogênio líquido, armazenadas a -80°C , posteriormente liofilizadas e armazenadas a 10°C . A partir disso 0,5 g das amostras foram homogeneizadas com 10 mL de ácido sulfosalicílico a 3% (w/v). Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a $15.000 \times g$ por 30 min. O sobrenadante foi misturado com reagente nihidrina e ácido acético na proporção de 1:1:1. Em seguida, as amostras foram colocadas em banho-maria fervente (105°C) por 1 hora. Depois disso, as amostras foram deixadas em condições ambientais e depois incubadas em banho de gelo por 5 min. Foram adicionados 2 mL de tolueno a cada amostra e agitada rapidamente com um dispositivo de vórtice até que duas fases distintas fossem formadas. A absorbância da fase superior foi medida por

espectrofotômetro a 520 nm. O conteúdo de prolina livre foi calculado por um método de curva padrão ($R^2 = 0,999$) e expresso em micromol por grama de massa seca ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MS). Todas as amostras foram analisadas em triplicata e calculadas a média.

2.7.2. *Conteúdo de H_2O_2*

Amostras de folhas frescas (MF) (0,5 g MF) foram inicialmente moídas com ácido tricloroacético (TCA). O homogeneizado foi então centrifugado a 12.000 x g por 15 min. Em seguida, uma alíquota de 0,5 mL do sobrenadante foi misturada com tampão fosfato (pH 7,0) e iodeto de potássio e deixada no escuro por 10 min. A absorbância das amostras foi medida a 390 nm. O conteúdo de H_2O_2 foi calculado a partir de uma curva padrão de H_2O_2 ($R^2 = 0,999$) e expresso em micromol por grama de massa fresca ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) (Velikova et al., 2000). Todas as amostras foram analisadas em triplicata e calculadas a média.

2.7.3. *Conteúdo de compostos fenólicos*

O conteúdo fenólico total foi medido para a determinação da capacidade de sinalização contra estresses abióticos seguindo o método Folin-Ciocalteu, com pequenas modificações, conforme descrito por Srinivas et al. (2017). Resumidamente, 0,5 mL de reagente Folin a 10% foi adicionado a 0,1 mL do extrato preparado. A mistura foi então agitada e deixada em repouso por cerca de 6 min, seguida pela adição de 1 mL de Na_2CO_3 a 7,5%, seguida por mistura completa. As soluções resultantes puderam então permanecer em repouso por 2 horas em temperatura ambiente. Após a incubação, a absorbância foi medida a 425 nm usando espectrofotômetro. A curva de calibração foi obtida usando ácido gálico como padrão com concentrações variando de 200 a 1,5 mg/mL. Os resultados do TPC foram expressos como equivalente de ácido gálico (GAE) por grama de amostra seca em relação à curva padrão de ácido gálico ($R^2 = 0,996$). Todas as amostras foram analisadas em triplicata e calculadas a média.

2.7.4. *Ensaio de óxido nítrico (NO)*

A produção de NO foi determinada utilizando o reagente de Greiss. As amostras foram moídas em almofariz e pilão com 3 mL de tampão de ácido acético frio 50 mM (pH 3,6, contendo 4% de diacetato de zinco). Os homogeneizados foram centrifugados a 10.000 x g por 15 min a 4°C. Posteriormente, 0,1 g de carvão vegetal foram adicionados ao sobrenadante. Após vórtice e filtração, uma alíquota de 1 mL do filtrado e 1 mL do reagente de Greiss contendo solução de sulfanilamida a 1% em HCl 3 M e dicloridrato de N-1-naftiletileno diamina a 0,1% em água foram incubados em temperatura ambiente por 30 min. A absorbância da amostra foi medida a 540 nm. O teor de NO foi calculado por um método de curva padrão ($R^2 = 0,997$)

usando nitrito de sódio (NaNO_2) (Zhou et al., 2005). Todas as amostras foram analisadas em triplicata e calculadas a média.

2.8. Análises estatísticas

Uma análise de variância (ANOVA) foi usada para testar o efeito dos manejos de solo e dos dois regimes hídricos, bem como suas interações em cada característica estudada. Quando as diferenças foram significativas pelo teste F, as médias foram comparadas usando o teste de Tukey em um nível de significância de 0,05. Toda a análise dos dados foi realizada por meio do software R (versão 3.6.0) usando o pacote ExpDes.pt.

3. RESULTADOS

3.1. Análise do índice de clorofila

Folhas de tomate cultivado com diferentes estratégias de manejo de água e solo apresentaram índices de clorofilas diferentes ao longo do dia (Figura 1). No início do período diurno (8:00 h), as plantas submetidas aos tratamentos I1SM2 e I1SM3 exibiram redução significativa nos teores de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total em relação às demais estratégias de manejo avaliadas. (1a, b, c). Ao comparar as estratégias de manejo em diferentes horários, clorofila *a* foi reduzida às 14 e 16h no manejo I1SM1 quando comparado às 8h (Figura 1a). Ao longo do dia, clorofila *b* foi menor apenas às 16h no manejo I7SM3 (Figura 1b) e índices reduzidos de clorofila total foram registrados no manejo I1SM1 e I7SM3 às 14 e 16h quando comparado às 8h (Figura 1c).

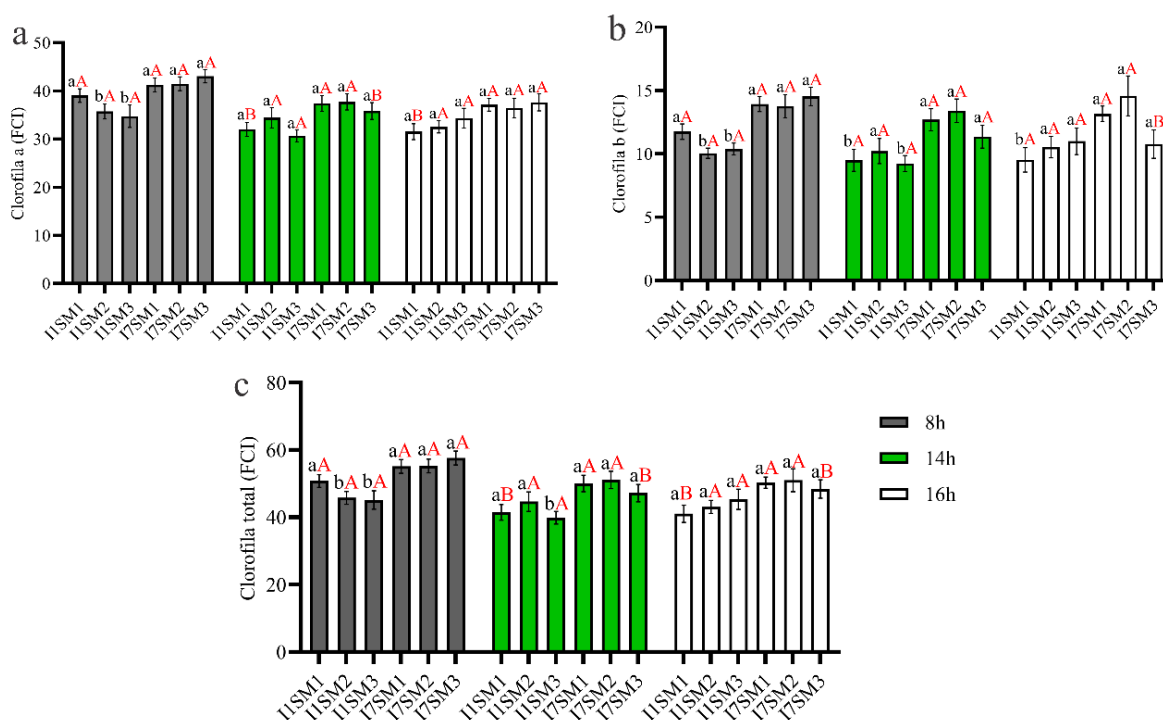


Figura 1 - Efeito da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade, com ou sem déficit de irrigação controlado na clorofila A (a), clorofila B (b) e clorofila total (C) no tecido foliar de plantas de tomate. As barras de erro representam o erro padrão da média. Barras com letra minúscula preta comparam grupos diferentes dentro do mesmo horário. Barras com letra maiúscula vermelha comparam entre o mesmo grupo em diferentes horários. Médias seguidas pela mesma letra não são estatisticamente diferentes (Teste de Tukey, $p < 0,05$).

3.2. Trocas gasosas

Para elucidar melhor o desempenho fisiológico de plantas de tomateiro submetidas a diferentes frequências de irrigação e estratégias de manejo do solo, realizou-se uma avaliação diurna das trocas gasosas foliares durante a fase de desenvolvimento dos frutos. Os resultados demonstraram que as plantas expostas a um intervalo de irrigação de sete dias, sob a estratégia de manejo do solo SM3, apresentaram taxas de assimilação líquida de CO_2 (A) consistentemente mais elevadas ao longo do dia (Figura 2a). Ao comparar plantas na condição I1SM1 com plantas na condição I7SM3, verificou-se uma diminuição na A de 14, 23 e 42% para os horários de 09:00-12:00, 14:00-16:00, 16:00-18:00h, respectivamente. Em relação à concentração interna de CO_2 (C_i), observou-se uma resposta fisiológica distinta, caracterizada pelo aumento da concentração de CO_2 na câmara subestomática ao final do dia em plantas irrigadas diariamente sob a estratégia I1SM3 (Figura 2b). Enquanto isso, plantas cultivadas na

condição I7SM3 apresentou (g_s) e E maiores no final do dia (Figura 2cd). Esses resultados, corrobora o resultado de A e evidência a capacidade da planta se ajustar sazonalmente a situações adversas na condição I7SM3.

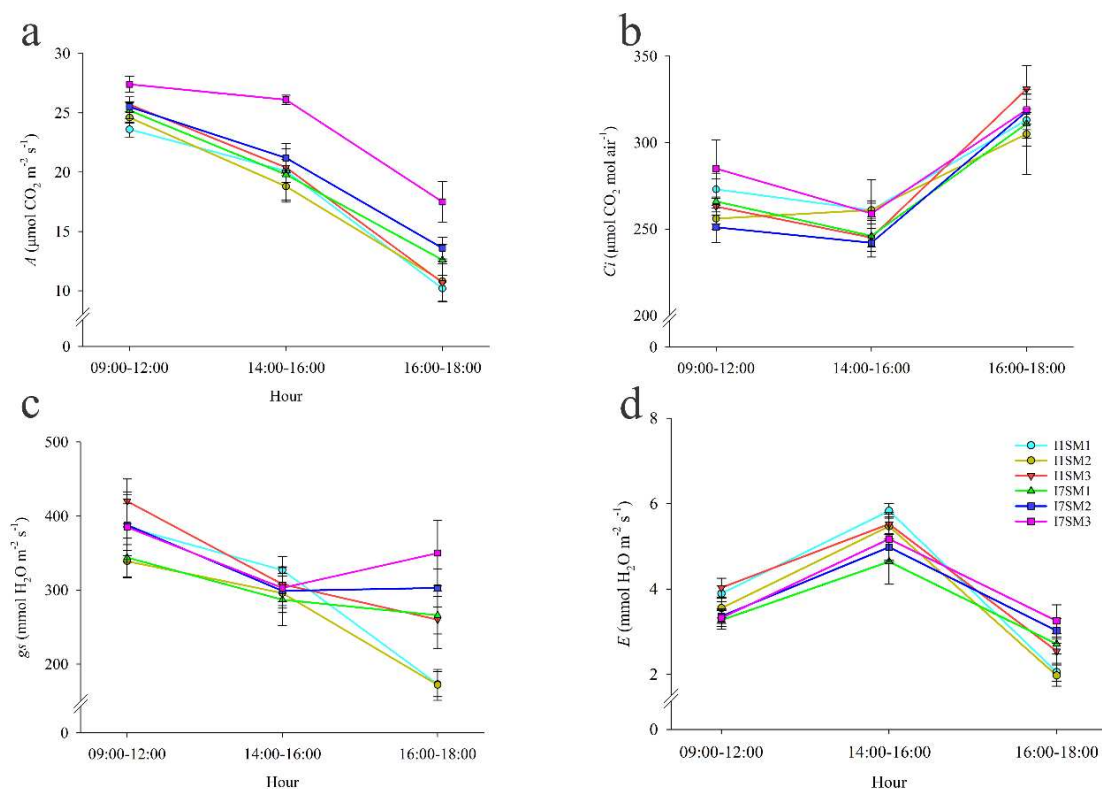


Figura 2 - Efeito da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade, com ou sem déficit de irrigação controlado na fotossíntese líquida (A), concentração interna de CO_2 (B), condutância estomática (C) e Transpiração (D) medidos no tecido foliar de plantas de tomate. (I1SM1: irrigação diária e aplicação exclusiva de calcário dolomítico; I1SM2: irrigação diária e aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; I1SM3: irrigação diária e aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado localmente em profundidade (30 cm). I7SM1: irrigação a cada sete dias e aplicação exclusiva de calcário dolomítico; I7SM2: irrigação a cada sete dias e aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola; I7SM3: irrigação a cada sete dias e aplicação de calcário dolomítico mais gesso agrícola e superfosfato triplo aplicado localmente em profundidade (30 cm)]. Todos os dados são expressos como média $\pm$ EP ($n = 12$).

3.3. Análises bioquímicas

3.3.1. Conteúdo de H_2O_2

Para investigar se o uso integrado de diferentes práticas de manejo de solo diminui o acúmulo de espécie reativa de oxigênio (EROs) induzido pelo déficit de irrigação controlado, o conteúdo de H_2O_2 de folhas de tomate em diferentes horários ao longo do dia foi medido. Como mostrado na Figura 3, observamos que o manejo I7SM2 diminuiu o conteúdo de H_2O_2 8h da manhã. Contudo, I7SM2 e I7SM3 diminuiu o conteúdo de H_2O_2 às 14h enquanto no manejo I7SM1 foi registrado o maior acúmulo do horário. As 16h o manejo com maior conteúdo de H_2O_2 foi o I1SM1. Por outro lado, ao analisar a mesma estratégia de manejo em diferentes horários, o efeito integrado de calcário + gesso agrícola + fosforo aplicado localmente a 30 cm de profundidade com frequência de irrigação a cada sete dias (I7SM3) reduziu durante todo o dia a formação de H_2O_2 no tecido foliar.

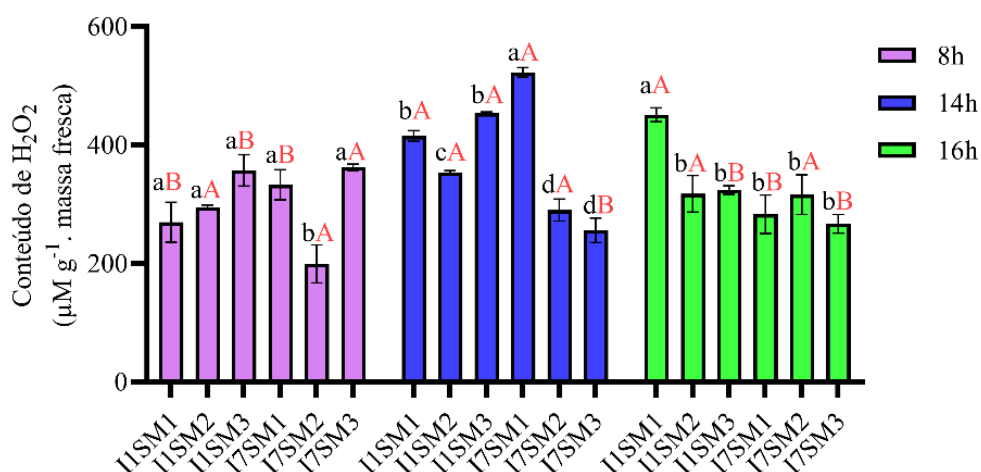


Figura 3 - Efeito da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade, com ou sem déficit de irrigação controlado no conteúdo de H_2O_2 no tecido foliar de plantas de tomate. Cada ponto de dados é a média de três réplicas. As barras de erro representam o erro padrão da média. Barras com letra minúscula preta comparam grupos diferentes dentro do mesmo horário. Barras com letra maiúscula vermelha comparam entre o mesmo grupo em diferentes horários. Médias seguidas pela mesma letra não são estatisticamente diferentes (Teste de Tukey, $p < 0,05$).

3.3.2. Conteúdo de prolina

Um aumento na quantidade de prolina livre foi observado nos manejos de solo combinado com irrigação a cada sete dias. Um aumento foi observado a 8 e 14h em plantas do manejo I7SM1, mas não a 16h quando comparado com I1SM1 (Figura 4). A combinação de

I1SM1 aumentou o conteúdo de prolina as 16h e nas estratégias I7SM2 e I7SM3 o conteúdo de prolina as 14 e 16h diminuiu. A aplicação das estratégias de solo com calcário + gesso agrícola (I7SM2) e calcário + gesso agrícola + fosforo (I7SM3) combinadas a frequência de irrigação a cada sete dias pareceu ter um efeito protetor em termos de manutenção da homeostase, enquanto nos manejos I7SM1 e I1SM1 a produção de prolina foi estimulada para manutenção da pressão osmótica celular reduzindo o risco da peroxidação lipídica e do extravasamento de eletrólitos causados pelo acúmulo de EROs.

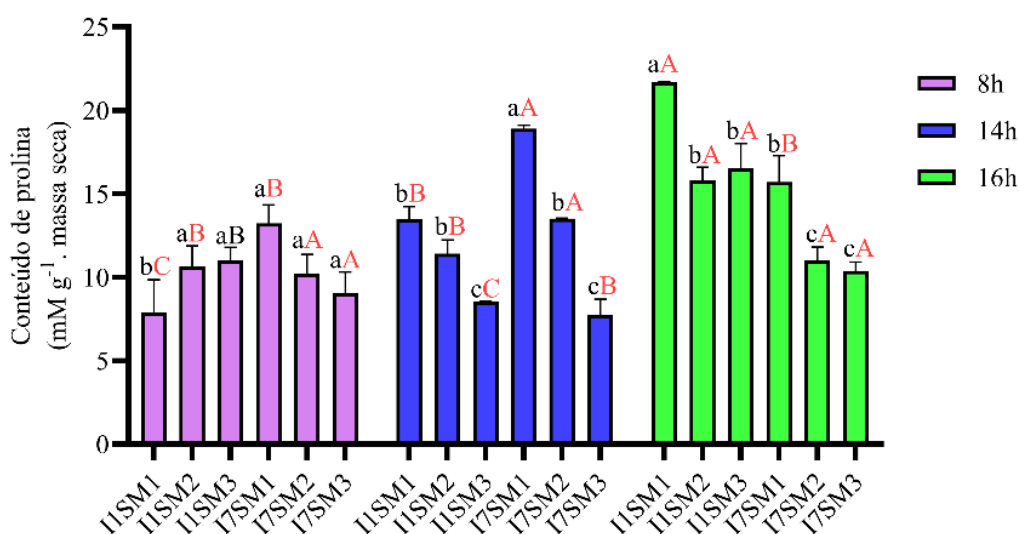


Figura 4 - Efeito da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade, com ou sem déficit de irrigação controlado no conteúdo de prolina no tecido foliar de plantas de tomate. Cada ponto de dados é a média de três réplicas. As barras de erro representam o erro padrão da média. Barras com letra minúscula preta comparam grupos diferentes dentro do mesmo horário. Barras com letra maiúscula vermelha comparam entre o mesmo grupo em diferentes horários. Médias seguidas pela mesma letra não são estatisticamente diferentes (Teste de Tukey, $p < 0,05$).

3.3.3. Conteúdo de fenólico total

O uso integrado dos diferentes manejos de solo e água não produziram efeitos nos fenólicos totais foliares as 8h. O uso da estratégia I7SM1 aumentou o conteúdo total de fenóis nas plantas de tomate as 14h. As 16h esse aumento no conteúdo total de fenóis foi registrado nas plantas cultivadas sob manejo I1SM1. De maneira geral, o conteúdo total de fenóis foi menor sob manejo SM2 e SM3 e irrigação a cada sete dias (I7), especialmente as 14h, quando comparado ao manejo I7SM1 e as 16h quando comparados ao I1SM1 (Figura 5).

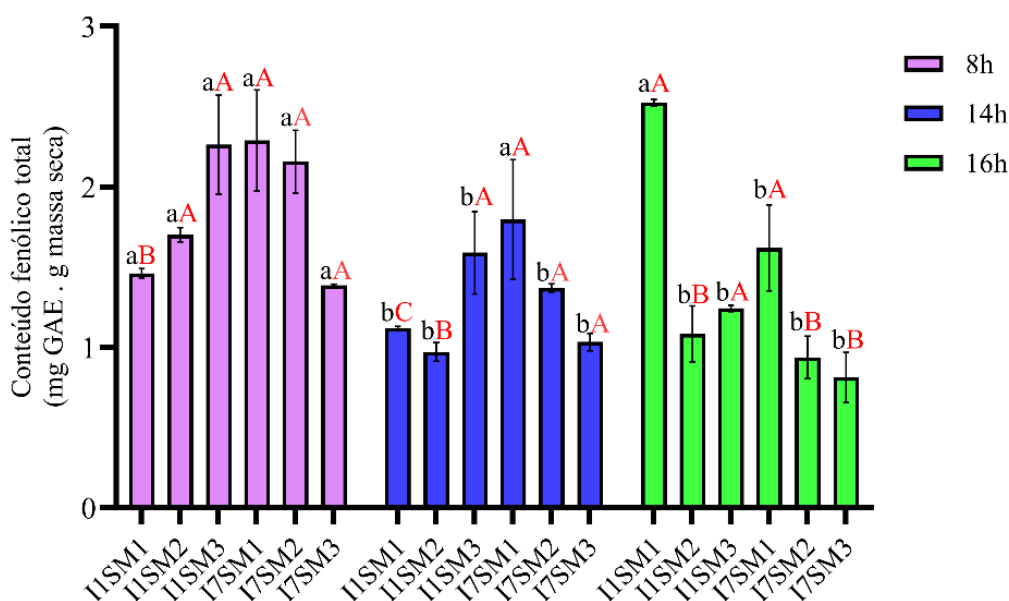


Figura - 5 Efeito da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade, com ou sem déficit de irrigação controlado no conteúdo de conteúdo fenólico total no tecido foliar de plantas de tomate. Cada ponto de dados é a média de três réplicas. As barras de erro representam o erro padrão da média. Barras com letra minúscula preta comparam grupos diferentes dentro do mesmo horário. Barras com letra maiúscula vermelha comparam entre o mesmo grupo em diferentes horários. Médias seguidas pela mesma letra não são estatisticamente diferentes (Teste de Tukey, $p < 0,05$).

3.3.4. Conteúdo de óxido nítrico (NO)

Nas plantas, o NO é conhecido como uma molécula vital na tolerância aos estresses. Neste estudo, um aumento significativo na quantidade de NO foi observado a 8 e 14h em plantas do manejo I7SM1, mas não as 16h. Neste último horário, o resultado revelou um aumento acentuado de óxido nítrico endógeno no manejo I1SM1 quando comparado a todas as demais estratégias de manejo adotadas neste estudo (Figura 6).

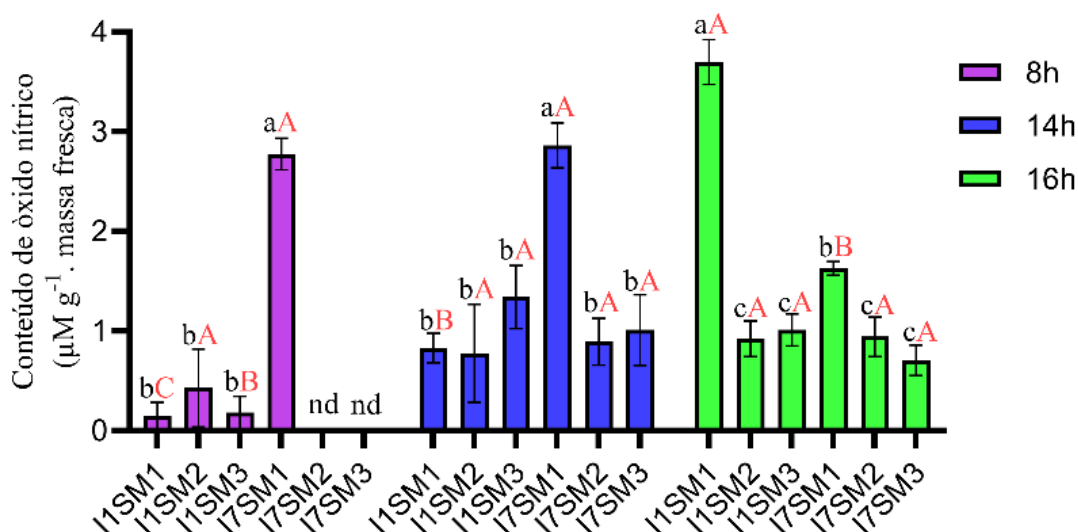


Figura 6 - Efeito da correção do solo com calcário, gesso agrícola e fósforo aplicado localmente em profundidade, com ou sem déficit de irrigação controlado no conteúdo de Óxido nítrico no tecido foliar de plantas de tomate. Cada ponto de dados é a média de três réplicas. As barras de erro representam o erro padrão da média. Barras com letra minúscula preta comparam grupos diferentes dentro do mesmo horário. Barras com letra maiúscula vermelha comparam entre o mesmo grupo em diferentes horários. Médias seguidas pela mesma letra não são estatisticamente diferentes (Teste de Tukey, $p < 0,05$).

4. DISCUSSÃO

A diminuição no índice de clorofilas a, b e total ao longo do dia nos manejos I1SM1 e I1SM3 podem ser atribuídas ao aumento de estresse oxidativo e à geração de radicais livres que prejudicam as membranas dos cloroplastos. Além disso, a alta disponibilidade de água nas camadas superficiais do solo reduz o crescimento das raízes para camadas mais profundas do solo limitando a absorção de água a medida que o dia avança, as temperaturas se elevam e a camada superficial do solo seca (Maurel e Nacry, 2020). Por outro lado, sob déficit hídrico moderado, as raízes crescem em direção a áreas de maior disponibilidade de água, geralmente longe das camadas superficiais secas do solo, onde o estresse por calor e salinidade é mais severo (Gandullo et al., 2021). O enraizamento mais profundo permite a captura eficiente de água e nutrientes, por exemplo, do íon magnésio crucial para a formação das clorofilas. Aumentar os pigmentos fotossintéticos deve ser um dos principais objetivos de novas estratégias de manejo de plantas cultivadas a campo, devido estes pigmentos contribuírem para o metabolismo antioxidante não enzimático e desempenharem papel importante na tolerância contra estresses ambientais (Kiran et al., 2023).

Medições das trocas gasosas ao longo do dia revelaram uma maior taxa fotossintética durante todo dia, acoplada a uma maior condutância estomática e transpiração no final do dia em plantas de tomate irrigadas a cada sete dias crescendo no solo tratado com calcário, gesso e fósforo aplicado à 30 cm de profundidade (I7SM3). Ao longo de muitos anos, a inibição da fotossíntese tem sido observada em plantas deficientes em Pi (Dietz e Foyer, 1986; Sivak e Walker, 1986; Jacob e Lawlor, 1992). A deficiência severa de Pi danifica o sistema de transdução de energia nos tilacoides e inibe as atividades de várias enzimas-chave do ciclo de Calvin (Preiss, 1984). A deficiência de Pi também inibe a exportação de triose-P do estroma para o citosol pelos translocadores de Pi (Natr, 1992). Sob deficiência de Pi, a limitação da utilização de carbono pelo metabolismo fotossintético promove o redirecionamento dos fotoassimilados para a síntese e acúmulo de amido nos cloroplastos. Embora essa estratégia represente um mecanismo adaptativo para manter a homeostase energética, o aumento da partição de carbono para reservas de amido reduz a disponibilidade de fotoassimilados para sustentar processos anabólicos, crescimento e desenvolvimento vegetal (Puga et al. 2024). Evidências recentes indicam que a homeostase do Pi no cloroplasto é um regulador crítico da eficiência fotossintética, uma vez que a redução da disponibilidade de Pi no estroma compromete a eficiência fotoquímica do PSII e aumenta a dissipação de energia por meio de mecanismos fotoprotetores, destacando a importância das estratégias de aquisição de fósforo para a manutenção do desempenho fotossintético sob condições ambientais adversas (Raju et al. 2024). Assim, a modificação da arquitetura radicular pode atuar como um gatilho para a reprogramação metabólica em plantas de tomate, favorecendo maior eficiência fotossintética. A manutenção de altas taxas fotossintéticas depende da disponibilidade adequada de Pi, essencial para a síntese de ATP e para a fixação de carbono. Sob limitação de Pi, o desequilíbrio entre a absorção de energia luminosa e sua utilização metabólica pode intensificar a geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), comprometendo o desempenho fotossintético. Neste estudo, plantas cultivadas sob irrigação diária e fertilização fosfatada restrita à camada superficial do solo (I1SM1) apresentaram menor desenvolvimento radicular e redução nas taxas de assimilação de CO₂ (*A*), condutância estomática (*gs*) e transpiração (*E*) ao longo do dia, quando comparadas às plantas submetidas ao intervalo de irrigação de sete dias e ao fornecimento de fósforo nas camadas superficial e subsuperficial do solo. Além disso, o aumento das trocas gasosas (*A*, *gs* e *E*) ao longo do dia das plantas de tomate cultivadas sob o manejo I7SM3, também podem estar relacionadas as variações das condições climáticas, com maior disponibilidade de água em camadas mais profundas no solo, menor evapotranspiração e menor DPV durante o estágio de desenvolvimento do fruto, que em conjunto ajudam a manter

o turgor pela manutenção do teor de água das células que, por sua vez, manteve e ou aumentou a eficiência da carboxilação no ciclo de Calvin.

A diminuição de H_2O_2 em folhas de tomate nos manejos calcário + gesso agrícola (SM2) e calcário + gesso agrícola + fósforo (SM3) combinados com irrigação a cada sete dias (I7) pode ser explicado pelas melhorias nos atributos químicos do solo, incluindo reduções de pH, neutralização de alumínio trocável e maior disponibilidade de N, P, Ca^{2+} e S-SO₄ quando comparado com a aplicação exclusiva de calcário (Bossoloni et al., 2020). A melhoria desses atributos especialmente nas camadas mais profundas do solo combinados a uma frequência de irrigação a cada sete dias favoreceram uma maior zona de crescimento radicular e, consequentemente, absorção de água e nutrientes (Cui et al. 2009; Fara et al., 2019) mantendo o estado nutricional, o fornecimento de cálcio e magnésio e acesso a água devido a manutenção e melhor distribuição de umidade ao longo o perfil do solo (Liu et al., 2011; Chai et al. 2016), reduzindo a produção e acúmulo do H_2O_2 no tomateiro. Além disso, é bem conhecido que o cálcio desempenha um papel duplo nas plantas, atuando tanto como elemento mineral essencial para o crescimento e desenvolvimento e ainda como um segundo mensageiro para a sinalização do estresse bióticos e abióticos (Thor, 2019; Singh, 2020; Ravi et al., 2023). Portanto, é razoável sugerir que o aumento de H_2O_2 observado no manejo I1SM1 as 16h é devido a uma distribuição radicular limitada as camadas superficiais do solo que secam primeiro, limitando o acesso a nutrientes e especialmente de água ao longo do dia, resultando no aumento de produção e acúmulo de EROs. Isso é particularmente importante, devido o H_2O_2 está rigorosamente associado à geração de radical superóxido ($O_2^{\cdot-}$) (Slesak et al., 2007). Altos níveis de $O_2^{\cdot-}$ poderia resultar na redução da capacidade fotossintética de PSII e PSI, e em última análise, as altas concentrações de EROs pode causar morte celular, afetando o desenvolvimento e produtividade das plantas (Bondarava et al., 2010; Zulfugarov et al., 2014; Takagi et al., 2016; Hasanuzaman et al., 2021; Mittler et al., 2022).

A quantidade de prolina foliar é comumente utilizada como um marcador de estresse hídrico em plantas (Batista-Silva, et al., 2019). A prolina é uma molécula protetora que se acumula nas plantas durante o estresse hídrico (Kijowska-Oberc et al., 2023). Os resultados desse estudo confirmam um aumento acentuado de prolina livre em folhas de tomate nos manejos I7SM1 as 14h e I1SM1 as 16h, mesmos manejos e horários onde foram registrados os maiores conteúdos de H_2O_2 , que em altas concentrações podem desencadear estresse oxidativo. Além disso, a superprodução de EROs pode danificar células e levar à necrose em espécies vegetais (Petrov et al., 2015). Neste cenário, a fotossíntese é um dos principais processos afetados. A disponibilidade reduzida de CO_2 devido às limitações de difusão restringe

diretamente as taxas de fotossíntese, mas também leva a efeitos secundários, como danos foto-oxidativos e aumento da degradação de proteínas (Chaves et al., 2009). Conforme proposto por estudos anteriores (Takagi et al., 2016; Meena et al., 2019; Moukhtari et al., 2020), as evidências encontradas com nossos resultados apontam para a efetividade da prolina para manter o equilíbrio da osmose celular e a integridade da membrana celular, evitando os danos potenciais de peroxidação lipídica em função das altas concentrações de EROs. Coletivamente, os resultados acima demonstram que o efeito sinérgico das estratégias de manejo do solo e da água, especialmente com calcário + gesso agrícola (SM2) e calcário + gesso agrícola + fosforo (SM3) combinadas a frequência de irrigação a cada sete dias, podem ser estratégias de manejos fisiológico promissoras para lidar com o estresse hídrico em plantas de tomate cultivados no campo, principalmente através do aumento da capacidade de regulação osmótica, em vez da eliminação de ânions superóxido.

A produção dos compostos fenólicos depende da disponibilidade de recursos e a deficiência mineral pode levar ao acúmulo de compostos fenólicos. Em contraste, a disponibilidade suficiente de nutrientes (o que melhora o crescimento das plantas) e condições sem estresse resultam em compostos fenólicos mais baixos (Bagal et al. 2012). Portanto, é razoável sugerir que os conteúdos elevados de fenóis totais nos manejos exclusivo com calcário (SM1) independente da frequência de irrigação adotada é devido a uma limitação de água e nutrientes minerais neste manejo. Por sua vez, a diminuição de fenóis totais nos manejos calcário + gesso agrícola (SM2) e calcário + gesso agrícola + fósforo (SM3) pode ser explicada devido a aplicação conjunta de calcário e gesso agrícola proporcionarem maior disponibilidade de N, P, Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} quando comparada à aplicação isolada de calcário (Bossolani et al., 2020). Além disso, o gesso agrícola também pode aumentar potencialmente a lixiviação de Mg^{2+} e K^+ para camadas profundas (Zoca e Penn 2017). Adicionalmente, a irrigação a cada sete dias (I7) favorece melhor distribuição de umidade ao longo o perfil do solo, contribuindo para um maior crescimento radicular e, consequentemente, absorção de água e nutrientes.

Nas plantas, o NO desempenha um papel importante como regulador da fisiologia das plantas, resistência a doenças e tolerância aos estresses abióticos (Wang et al., 2010). No presente estudo, notamos uma estreita correlação na biossíntese aumentada de NO nas mesmas estratégias de manejo e horários em que os maiores conteúdos de H_2O_2 foram medidos, ou seja, I7SM1 as 8 e 14h e I1SM1 as 16h. Conforme proposto por Yan et al., (2007) nossos resultados apontam para uma síntese aumentada de NO induzida por H_2O_2 indicando que a síntese de NO é necessária para a inibição H_2O_2 , uma EROs relativamente estável, no entanto, potencialmente tóxica para as células vegetais em alta concentração. Apoiando ainda mais essa ideia a

capacidade mais demonstrada do NO em reduzir os níveis de EROs é por meio do aumento das atividades das enzimas antioxidante em plantas expostas a vários estresses abióticos (Zottini et al., 2002; Neill et al., 2002; Karpets et al., 2011), especialmente a superóxido dismutase (Shi et al., 2007). Além disso, o acúmulo de NO demonstrou induzir a expressão gênica de proteínas de defesa durante episódios de estresse e recuperação (Romero-Puertas et al., 2013; Fancy et al., 2017). Da mesma forma, níveis de NO aumentados através da aplicação exógena de um doador de NO, também demonstrou reduzir a degradação de clorofilas (Kong et al., 2014), consistente com o que foi observado nesse estudo. A perda reduzida de clorofilas em plantas com níveis de NO aumentados pode ser atribuída à sua estreita relação com o metabolismo do ferro, que tem uma correlação direta com a biossíntese de clorofilas, mantendo a atividade do PSII e mitigando a redução na fotossíntese e a produtividade da planta (Siddiqui et al., 2017). Juntos, os resultados desse estudo fornecem boas evidências de que as estratégias combinadas de manejo do solo e da água podem melhorar a estabilidade da membrana e, assim, reduzir o vazamento de eletrólitos em plantas de tomate cultivados em solo quimicamente corrigido e sob déficit hídrico controlado.

5. CONCLUSÕES

As estratégias integradas de manejo do solo aumentaram a tolerância das plantas de tomate ao déficit hídrico controlado por meio da mitigação do estresse oxidativo e da preservação do desempenho fisiológico. A aplicação de calcário + gesso agrícola (SM2) reduziu os danos oxidativos induzidos pelo déficit hídrico, enquanto a adição de fósforo aplicado em profundidade (SM3) potencializou a resiliência das plantas ao reduzir o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e manter o conteúdo de clorofilas e a atividade fotossintética ao longo do dia. Além disso, o aumento nos níveis de prolina, óxido nítrico e compostos antioxidantes não enzimáticos observado nos tratamentos SM2 e SM3 evidencia a ativação de mecanismos complementares de defesa envolvidos na proteção celular contra os danos induzidos pela restrição hídrica. Portanto, a integração das estratégias de manejo do solo SM2 e SM3 com um intervalo de irrigação de sete dias representa uma abordagem promissora para aumentar a resiliência do tomateiro à seca e sustentar a produtividade em condições de campo.

REFERÊNCIAS

- Liu, X., Zhao, J., Liu, J., Lu, W., Ma, C., Gu, X., Zhang, Q. (2021). Water–phosphorus coupling enhances fine root turnover and dry matter yield of alfalfa under drip irrigation. *Agronomy Journal*, 113(5), 4161-4175
- Bagal UR, Leebens Mack JH, Walter Lorenz W, Dean JFD (2012). The phenylalanine ammonia lyase (PAL) gene family shows a gymnosperm specific line age. *BMC Genom* 13(3),1471–2164.
- Barbosa, L.B., da Silva, T.I., Dias, M.G., Pereira, E.D., Cruz, R.R.P., de Souza Silva, J., da Costa, F.B., & Grossi, J.A.S. (2024). Application of phytohormones reduces damage caused by salt stress in *Tropaeolum majus*. *South African Journal of Botany*, 166, 69-78.
- Batista-Silva, W., Heinemann, B., Rugen, N., Nunes-Nesi, A., Araújo, W. L., Braun, H. P., & Hildebrandt, T. M. (2019). The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. *Plant, cell & environment*, 42(5), 1630-1644.
- Bondarava, N., Gross, C.M., Mubarakshina, M., Golecki, J.R., Johnson, G.N., Krieger-Liszkay, A., (2010). Putative function of cytochrome b559 as a plastoquinol oxidase. *Physiologia Plantarum*, 138, 463-73.
- Bossolani, J.W., Crusciol, C.A.C., Merloti, L.F., Moretti, L.G., Costa, N.R., Tsai, S.M., Kuramae, E.E. (2020). Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma*, 375, 114476.
- Cammarano, D., Jamshidi, S., Hoogenboom, G., Ruane, A.C., Niyogi, D., & Ronga, D. (2022). Processing tomato production is expected to decrease by 2050 due to the projected increase in temperature. *Nature Food*, 3(6), 437-444.
- Chai Q, Gan Y, Zhao C, Xu HL, Waskom RM, Niu Y, Siddique KH (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 3.
- Chaves, M.M., Flexas, J., Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, 103(4), 551-560.
- Cui N, Du T, Kang S, Li F, Hu X, Wang M, Li Z (2009). Relation ship between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency under regulated deficit irrigation of pear-jujube tree. *Agricultural Water Management*, 240, 106300.
- da Silva Martins, J.V., Pereira, E.D., de Araújo, N.O., de Araújo, F.F., da Silva, T.I., da Silva, D.J.H., Ribeiro, W.S., Dias, T.J. (2024). A Combined Soil and Water Management Strategy to Improve the Nutrition and Marketability of Tomato Variety ‘Heinz 9553’. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(2), 500-515.
- Dariva, F.D., Pessoa, H.P., Copati, M.G.F., de Almeida, G.Q., de Castro Filho, M.N., de Toledo Picoli, E.A., da Cunha, F.F., Nick, C. (2021). Yield and fruit quality attributes of selected tomato introgression lines subjected to long-term deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 289, 110426.
- Desikan R., Cheung K., Bright J., Henson D., Hancock J.T., Neill S. (2004). ABA, hydrogen peroxide and nitric oxide signalling in stomatal guard cells. *Journal of Experimental Botany* 55, 205–212.
- Desikan R., Griffiths R., Hancock J. & Neill S. (2002). A new role for an old enzyme: nitrate reductase-mediated nitric oxide generation is required for abscisic acid-induced stomatal closure in *Arabidopsis thaliana*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 99, 16314–11631.
- Dietz, K.J., Foyer, C. (1986). The relationship between phosphate status and photosynthesis in leaves. *Planta*, 167(3), 376-381.

Dodd, I.C (2009). Rhizosphere manipulations to maximize ‘crop per drop’ during deficit irrigation. *Journal of Experimental Botany*, 60(9), 2454-2459.

El Moukhtari, A., Cabassa-Hourton, C., Farissi, M., Savouré, A. (2020). How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development?. *Frontiers in plant science*, 11, 1127.

Fancy, N.N., Bahlmann, A.K., Loake, G.J. (2017). Nitric oxide function in plant abiotic stress. *Plant, cell & environment*, 40(4), 462-472.

Fara S.J, Delazari F.T, Gomes R.S, Araújo W.L, Silva D.J.H (2019). Stomata opening and productiveness response of fresh market tomato under different irrigation intervals. *Scientia Horticulturae*, 255, 86-95.

Feng, R., Wei, C., Tu, S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and experimental botany*, 87, 58-68.

Filho, M.N.D.C., Melo, L.C.A., Lustosa Filho, J.F., de Castro Paes, É., de Oliveira Dias, F., Lino Gomes, J., Nick Gomes, C. (2024). Improved tomato development by biochar soil amendment and foliar application of potassium under different available soil water contents. *Journal of Plant Nutrition*, 1-25.

Gandullo, J., Ahmad, S., Darwish, E., Karlova, R., Testerink, C. (2021). Phenotyping tomato root developmental plasticity in response to salinity in soil rhizotrons. *Plant Phenomics*, 27605.

Garcia-Mata C., Lamattina L. (2002). Nitric oxide and abscisic acid cross talk in guard cells. *Plant Physiology* 128, 790–792.

Hasanuzzaman M, Bhuyan MB, Zulfiqar F, Raza A, Mohsin SM, Mahmud JA, Fotopoulos V (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants* 9(8), 681.

Houmani, H., Corpas, F.J. (2023). Can nutrients act as signals under abiotic stress?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108313.

Jacob, J., Lawlor, D.W. (1992). Dependence of photosynthesis of sunflower and maize leaves on phosphate supply, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activity, and ribulose-1, 5-bisphosphate pool size. *Plant Physiology*, 98(3), 801-807.

Karpets, Y.V., Kolupaev, Y.E., and Yastreb, T.O. (2011). Effect of sodium nitroprusside on heat resistance of wheat coleoptiles: dependence on the formation and scavenging of reactive oxygen species. *Russian Journal of Plant Physiology*, 58(6), 1027-1033.

Kijowska-Oberc, J., Dylewski, Ł., Ratajczak, E. (2023). Proline concentrations in seedlings of woody plants change with drought stress duration and are mediated by seed characteristics: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 13(1), 15157.

Kiran, S., Baysal Furtana, G. (2023). Responses of eggplant seedlings to combined effects of drought and salinity stress: Effects on photosynthetic pigments and enzymatic and non-enzymatic antioxidants. *Gesunde Pflanzen*, 75(6), 2579-2590.

Kong, J., Dong, Y., Xu, L., Liu, S., Bai, X. (2014). Effects of foliar application of salicylic acid and nitric oxide in alleviating iron deficiency induced chlorosis of *Arachis hypogaea* L. *Botanical studies*, 55(1), 9.

Li, Q., Wei, M., Li, Y., Feng, G., Wang, Y., Li, S., Zhang, D. (2019). 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.

Liu, L., Gan, Y., Bueckert, R., Van Rees, K. (2011). Rooting systems of oilseed and pulse crops I: Temporal growth patterns across the plant developmental periods. *Field Crops Research*, 122(3), 256-263.

Martínez-Mena, M., Carrillo-López, E., Boix-Fayos, C., Almagro, M., Franco, N.G., Díaz-Pereira, E., I. Montoya., De Vente, J. (2020). Long-term effectiveness of sustainable land

management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *Catena*, 187, 104352.

Maurel, C., Nacry, P. (2020). Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. *Nature plants*, 6(7), 744-749.

Meena, M., Divyanshu, K., Kumar, S., Swapnil, P., Zehra, A., Shukla, V., Y., Mukesh Upadhyay, R.S. (2019). Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Heliyon*, 5(12).

Minato, E.A., Brignoli, F.M., Neto, M.E., Besen, M.R., Cassim, B.M. A.R., Lima, R.S., Inoue, T.T., Batista, M. A. (2023). Lime and gypsum application to low-acidity soils: changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. *Soil and Tillage Research*, 234, 105860.

Mittler, R., Zandalinas, S. I., Fichman, Y., Van Breusegem, F. (2022). Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. *Nature reviews Molecular cell biology*, 23(10), 663-679.

Neill S.J., Desikan R., Clarke A., Hancock, J. (2002). Nitric oxide is a novel component of abscisic acid signaling in stomatal guard cells. *Plant Physiology* 128, 13–16.

Neill, S.J., Desikan, R., Clarke, A., Hurst, R.D., Hancock, J.T. (2002). Hydrogen peroxide and nitric oxide as signaling molecules in plants. *J. Exp. Bot.* 53, 1237–1247.

Pei, Z., Murata Y., Benning G., Thomine S., Kluesener B., Allen G.J., Grill E., Schroeder, J.I. (2000). Calcium channels activated by hydrogen peroxide mediate abscisic acid signaling in guard cells. *Nature* 406, 731–734.

Petrov, V., Hille, J., Mueller-Roeber, B., Gechev, T.S. (2015). ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants. *Frontiers in plant science*, 6, 69.

Puga, M.I., Poza-Carrión, C., Martínez-Hevia, I., Pérez-Liens, L., Paz-Ares, J. (2024). Recent advances in research on phosphate starvation signaling in plants. *Journal of Plant Research*, 137, 315–330.

Raju, A. S., Kramer, D. M., Versaw, W. K. (2024). Genetically manipulated chloroplast stromal phosphate levels alter photosynthetic efficiency. *Plant Physiology*, 196(1), 385-396.

Rao, I. M., Terry, N. (1995). Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet (IV. Changes with time following increased supply of phosphate to low-phosphate plants). *Plant Physiology*, 107(4), 1313-1321.

Ravi, B., Foyer, C.H., Pandey, G.K. (2023). The integration of reactive oxygen species (ROS) and calcium signalling in abiotic stress responses. *Plant, Cell & Environment*, 46(7), 1985-2006.

Romero-Puertas, M.C., Rodríguez-Serrano, M., Sandalio, L.M. (2013). Protein S-nitrosylation in plants under abiotic stress: an overview. *Frontiers in Plant Science*, 4, 373.

Rosa-Martínez, E., García-Martínez, M.D., Adalid-Martínez, A.M., Pereira-Dias, L., Casanova, C., Soler, E., Figàs, M.R., Raigón, M.D., Plazas, M., Soler, S., Prohens, J. (2021). Fruit composition profile of pepper, tomato and eggplant varieties grown under uniform conditions. *Food Research International*, 147, 110531.

Sharma, P., Jha, A.B., Dubey, R.S., Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012(1), 217037.

Shi, Q., Ding, F., Wang, X., Wei, M. (2007). Exogenous nitric oxide protect cucumber roots against oxidative stress induced by salt stress. *Plant physiology and biochemistry*, 45(8), 542-550.

Siddiqui, M., Alamri, S.A., Mutahhar, Y.Y., Al-Khaishany, M.A., Al-Qutami, H.M., Nasir Khan, M.A. (2017). Nitric Oxide and calcium induced physiobiochemical changes in

tomato (*Solanum Lycopersicum*) plant under heat stress. Fresenius Environmental Bulletin, 26 (2a) (2017), 1663-1672.

Singh, M., Saini, R.K., Singh, S., Sharma, S.P., (2019). Potential of integrating biochar and deficit irrigation strategies for sustaining vegetable production in water-limited regions: a review. J. HortScience, 54(11), 1872-1878.

Singh, R. (2020). Calcium in plant biology: nutrient and second messenger. International Journal of Biological Innovations, 2(1), 31-35.

Sivak, M.N., Walker, D.A. (1986). Photosynthesis in vivo can be limited by phosphate supply. New Phytologist, 102(4), 499-512.

Slesak, I., Libik, M., Karpinska, B., Karpinski, S., Miszalski, Z., (2007). The role of hydrogen peroxide in regulation of plant metabolism and cellular signalling in response to environmental stresses. Acta biochimica polonica, 54(1), 39-50.

Srinivas, S.H., Maneesh Kumar, M., Prasada Rao, U.J.S. (2017). Studies on Isolation and Antioxidant Properties of Bioactive Phytochemicals from Mango Peel Harvested at Different Developmental Stages. International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch, 2(2), 136-148.

Takagi, D., Takumi, S., Hashiguchi, M., Sejima, T., Miyake, C. (2016). Superoxide and singlet oxygen produced within the thylakoid membranes both cause photosystem I photoinhibition. Plant physiology, 171(3), 1626-1634.

Takagi, H., Taguchi, J., Kaino, T. (2016). Proline accumulation protects *Saccharomyces cerevisiae* cells in stationary phase from ethanol stress by reducing reactive oxygen species levels. Yeast, 33(8), 355-363.

Thor, K. (2019). Calcium—nutrient and messenger. Frontiers in plant science, 10, 440.

Velikova, V., Yordanov, I., Edreva, A.J.P.S. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. Plant science, 151(1), 59-66.

Wang, P., Du, Y., Li, Y., Ren, D., Song, C.P. (2010). Hydrogen peroxide-mediated activation of MAP kinase 6 modulates nitric oxide biosynthesis and signal transduction in Arabidopsis. The Plant Cell, 22(9), 2981-2998.

Yan, J., Tsuichihara, N., Etoh, T., Iwai, S. (2007). Reactive oxygen species and nitric oxide are involved in ABA inhibition of stomatal opening. Plant, cell & environment, 30(10), 1320-1325.

Yuan, X., Wang, Y., Ji, P., Wu, P., Sheffield, J., & Otkin, J. A. (2023). A global transition to flash droughts under climate change. Science, 380(6641), 187-191.

Zhang X., Zhang L., Dong F., Gao J., Galbraith D., Song C. (2001). Hydrogen peroxide is involved in abscisic acid-induced stomatal closure in *Vicia faba*. Plant Physiology 126, 1438–1448.

Zhou, B., Guo, Z., Xing, J., Huang, B. (2005). Nitric oxide is involved in abscisic acid-induced antioxidant activities in *Stylosanthes guianensis*. Journal of Experimental Botany, 56(422), 3223-3228.

Zoca, S. M., Penn, C. (2017). An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. Advances in agronomy, 144, 1-44.

Zottini, M., Formentin, E., Scattolin, M., Carimi, F., Lo Schiavo, F., Terzi, M. (2002). Nitric oxide affects plant mitochondrial functionality in vivo. FEBS letters, 515(1-3), 75-78.

Zulfugarov, I.S., Tovuu, A., Eu., Y.J., Dogsom, B., Poudyal, R.S., Nath, K., Hall, M., Banerjee, M., Yoon, U.C., Moon, Y.H. (2014). Production of superoxide from Photosystem II in a rice (*Oryza sativa* L.) mutant lacking PsbS. BMC plant biology, 14(1), 242.

APÊNDICE A – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA, QUANTIDADE DE PRECIPITAÇÃO, RADIAÇÃO SOLAR E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

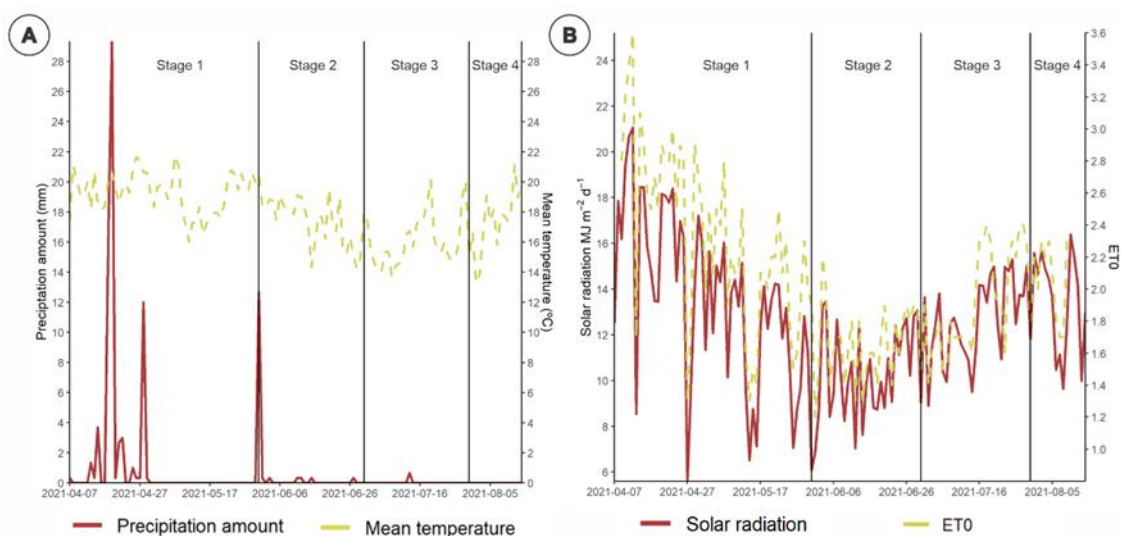


Fig. S1. Temperatura média diária e quantidade de precipitação (A), radiação solar e evapotranspiração de referência (ET0) (B), durante o estágio de crescimento vegetativo (Stage1), estágio de floração, frutificação e crescimento inicial do fruto (Stage 2), estágio de desenvolvimento do fruto (Stage 3) e estágio de maturação do fruto (Stage 4) do tomate em 2021.

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO LATOSSOLO UTILIZADO PARA INSTALAÇÃO DO ESTUDO

Tabela S1. Caracterização das propriedades químicas e físicas do Latossolo utilizado para instalação do estudo no sudeste do Brasil (Viçosa, Minas Gerais, Brasil)

Experimento	2021				
Profundidade (cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
pH H ₂ O	5.70	5.80	5.77	5.75	5.60
P (mg dm ⁻³)	136.36	18.30	2.16	1.36	1.83
K (mg dm ⁻³)	117.66	82.33	35.66	18.33	27.66
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4.65	2.95	2.78	2.35	2.19
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.52	0.33	0.39	0.38	0.38
S	6.40	2.20	4.10	15.60	35.00
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4.00	2.63	2.46	2.46	2.20
SB (cmol _c dm ⁻³)	5.47	3.48	3.27	2.77	2.64
t (cmol _c dm ⁻³)	5.54	3.48	3.27	2.77	2.64
T (cmol _c dm ⁻³)	9.24	6.12	5.73	5.24	5.10
V (%)	60.16	56.86	56.96	53.36	52.20
m (%)	0.00	4.00	0.00	0.00	0.00
MO (dag kg ⁻¹)	2.53	1.33	1.06	1.46	0.93
P-rem (mg L ⁻¹)	30.10	15.20	14.77	12.10	10.90
Zn (mg dm ⁻³)	9.72	0.30	0.14	0.00	0.56
Fe (mg dm ⁻³)	59.30	57.60	37.60	35.00	35.50
Mn (mg dm ⁻³)	84.20	26.70	12.30	8.50	9.70
Cu (mg dm ⁻³)	2.18	2.09	1.54	1.21	1.14
B (mg dm ⁻³)	0.44	0.24	0.10	0.15	0.13
Areia (%)	32.20	17.60	12.60	13.90	14.30
Silte (%)	10.40	11.20	9.90	8.70	9.50
Argila (%)	57.40	71.20	77.50	77.40	76.20
Mi (m ³ m ⁻³) ¹	0.42	0.41	0.47	0.47	0.47
Ma (m ³ m ⁻³) ²	0.07	0.11	0.04	0.04	0.03
θ _{FC} (m ³ m ⁻³) ³	0.38	0.42	0.44	0.46	0.46
θ _{WP} (m ³ m ⁻³) ⁴	0.22	0.24	0.25	0.23	0.26
Ds (g cm ⁻³)	1.03	1.02	0.99	0.99	0.97