



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FELIPE FONTENELE FROTA MENEZES

**DESEMPENHO DO PIMENTÃO VERMELHO SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO
DEFICITÁRIAS COM HIDROGEL E BIOINSUMOS EM AMBIENTE PROTEGIDO**

FORTALEZA

2025

FELIPE FONTENELE FROTA MENEZES

DESEMPENHO DO PIMENTÃO VERMELHO SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO
DEFICITÁRIAS COM HIDROGEL E BIOINSUMOS EM AMBIENTE PROTEGIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana

Co-Orientador: Prof. Dr. Luis Gonzaga Pinheiro Neto

FORTALEZA

2025

FELIPE FONTENELE FROTA MENEZES

DESEMPENHO DO PIMENTÃO VERMELHO SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO
DEFICITÁRIAS COM HIDROGEL E BIOINSUMOS EM AMBIENTE PROTEGIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 27 / 09 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana (ORIENTADOR)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Gonzaga Pinheiro Neto (COORIENTADOR)
Instituto Federal do Ceará – Campus Sobral (IFCE)

Prof. Dr. Ademir Silva Menezes
Faculdade Ieducare (FIED-UNINTA)

Prof. Dr. Carlos Henrique Carvalho de Sousa
Faculdade Ieducare (FIED-UNINTA)

Aos meus pais, Leila e Nacelio, por todo o apoio durante minha trajetória, e à minha esposa, Isadora, por sempre me incentivar e apoiar.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que financiou o estudo (PROCESSO CNPQ/INCT: 406570/2022-1).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem - UFC pela oportunidade.

Ao meu orientador, o professor Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana, pela orientação e ensinamentos, incentivo e contribuição para meu crescimento profissional.

Ao meu coorientador, o professor Dr. Luis Gonzaga Pinheiro Neto, pelo acompanhamento, incentivo e insistência.

Ao Professor Dr. Ademir Silva Menezes, por todo o incentivo, orientação, disponibilidade, auxílio na implantação do projeto e coleta de dados, e amizade.

Ao Doutorando James do Nascimento Costa, do Departamento de Engenharia Agrícola - UFC, pelo auxílio e pela orientação no manuseio da bomba de pressão de Schollander e de inúmeras outras orientações e apoio.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Carvalho de Sousa pelo auxílio na mão de obra de montagem do experimento.

Ao Instituto Agropolos do Ceará, nas pessoas de Patrícia Moreira e Luiz Barreto, pela concessão da Área experimental e infraestrutura do Prédio da Escola Tecflores.

Aos Mestrandos Dâney Erlen, João Victor Mendes e Gabriel Pereira, do Departamento de Engenharia Agrícola - UFC, pelo auxílio e na condução e coleta de dados e Libério Feitosa, companheiro na jornada de Mestrado.

Ao pesquisador Dr. Marlos Alves pelo empréstimo da bomba de pressão de Schollander e pela condução e análises de trocas gasosas feitas com IRGA.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização desta conquista.

RESUMO

A produção de pimentão colorido em regiões semiáridas tem como desafio conciliar boa produtividade com uso eficiente da água. Pensando nisso, este trabalho avaliou o desempenho do pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) cultivado em estufa no município de São Benedito–CE, sob diferentes lâminas de irrigação (40, 60, 80 e 100% da ETc) combinadas a doses do bioinsumo Protamin GR (50, 75, 100, 125 e 150% da dose recomendada) e dose única de Hidrogel, além de um tratamento adicional com irrigação plena, 100% de bioinsumo e sem hidrogel. O delineamento adotado foi em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, totalizando 84 unidades experimentais. Foram mensuradas variáveis de crescimento vegetativo, produção, produtividade e fisiologia, incluindo temperatura foliar [$\Delta T_{(T_c - T_{ar})}$] e o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI). Os resultados demonstraram que o crescimento vegetativo apresentou baixa sensibilidade aos tratamentos, mas a produção massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) responderam de forma significativa, apontando a lâmina de 60% (517,4g e 80,4g respectivamente) e dose de 125% (556,6g e 90,5g respectivamente) como melhores proporções para estas variáveis. Para a variável peso médio de fruto (PMF) o estudo também apresentou diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$), indicando a lâmina de 60% (156,8g) associada ao hidrogel, como melhor desempenho. A variável de comprimento de fruto (CF) também apresentou diferença estatística significativa com P valor inferior a 1% em relação ao tratamento de lâminas apontando que a lâmina de 60% da ETc apresentou média superior (128,8 mm). Em relação às variáveis fisiológicas, foi possível observar que o potencial hídrico foliar (Ψ_f), $\Delta T(12h)$ e CWSI (12h) também apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$), Ψ_f para a lâmina, com maior média em 60% de ETc (5,29 bar) e $\Delta T(12h)$ e CWSI (12h) para dose de Protamim GR, com maior média aos 75% do recomendado [$\Delta T(12h)$ de - 4 e CWSI (12h) de 0,45]. O hidrogel contribuiu em condições de déficit, mas não trouxe ganhos adicionais na irrigação plena. De modo geral, constatou-se que déficits hídricos moderados, aliados ao uso equilibrado de bioinsumos, podem reduzir o consumo de água sem comprometer a produtividade, favorecendo um cultivo mais sustentável do pimentão em ambiente protegido.

Palavras-chave: *Capsicum annuum*; manejo hídrico; fertilizantes orgânicos; polímero hidrorretentor.

ABSTRACT

The production of colored bell peppers in semi-arid regions faces the challenge of reconciling high productivity with efficient water use. With this in mind, this study evaluated the performance of red bell pepper (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) cultivated in a greenhouse in the municipality of São Benedito–CE, under different irrigation levels (40, 60, 80, and 100% of ET_c) combined with doses of the bio-input Protamin GR (50, 75, 100, 125, and 150% of the recommended rate) and a single dose of hydrogel, in addition to an extra treatment with full irrigation, 100% bio-input, and no hydrogel. The experimental design was a randomized block with split plots, totaling 84 experimental units. Variables of vegetative growth, yield, productivity, and physiology were measured, including leaf temperature [$\Delta T_{(T_c - T_{ar})}$] and the crop water stress index (CWSI). The results showed that vegetative growth was weakly sensitive to the treatments, but shoot fresh mass (SFM) and shoot dry mass (SDM) responded significantly, with the 60% irrigation level (517.4 g and 80.4 g, respectively) and the 125% dose (556.6 g and 90.5 g, respectively) showing the best performance for these variables. For the variable average fruit weight (AFW), the study also revealed significant statistical differences ($p < 0.05$), indicating that the 60% irrigation level (156.8 g), associated with hydrogel, achieved the best result. Fruit length (FL) also presented significant differences, with $p < 0.01$ for the irrigation factor, with the 60% ET_c treatment showing the highest mean (128.8 mm). Regarding physiological variables, leaf water potential (Ψ_f), ΔT (12h), and CWSI (12h) also presented significant statistical differences ($p < 0.05$). Ψ_f was significantly affected by irrigation level, with the highest mean at 60% ET_c (5.29 bar), while ΔT (12h) and CWSI (12h) responded to Protamin GR doses, with the highest mean values at 75% of the recommended rate [$\Delta T(12h) = -4$; CWSI (12h) = 0.45]. Hydrogel contributed under deficit conditions but did not provide additional benefits under full irrigation. Overall, it was found that moderate water deficits, combined with a balanced use of bio-inputs, can reduce water consumption without compromising yield, promoting a more sustainable cultivation of bell peppers in greenhouse conditions.

Keywords: *Capsicum annuum*; water management; organic fertilizers; hydroretentive polymer.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Apresentação da área experimental. São Benedito – CE, 2024..... | 24 |
| Figura 2 – Mudanças de pimentão vermelho Taurus em ponto de transplante, em bandejas de polipropileno com 128 células (A) e transplante de mudas de pimentão vermelho Taurus, 35 DAT, em solo elevado à capacidade de campo (B)..... | 26 |
| Figura 3 – Aplicação de hidrogel (A) e Pimentões Taurus da SAKATA, colhidos durante o experimento (B) | 26 |
| Figura 4 – Aplicação de adubo de fundação, 7 dias antes do transplante..... | 28 |
| Figura 5 – Método de irrigação localizada por sistema de gotejamento utilizado no experimento (A) e localização do tanque classe A (B)..... | 28 |
| Figura 6 – Ilustração que representa como foi conduzido o tutoramento das plantas de pimentão Taurus durante o experimento (A) e de como a poda modelou as plantas de pimentão, visando uma melhor qualidade final aos frutos (B)..... | 30 |
| Figura 7 – Tutoramento das plantas de pimentão Taurus durante o experimento..... | 30 |
| Figura 8 – Esquema de disposição dos tratamentos no delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas, em ambiente protegido na cidade de São Benedito–CE | 31 |
| Figura 9 – Modelo de termo-higrômetro utilizado no experimento, marca Elitech, modelo RC-51H | 32 |
| Figura 10– Colheita e pesagem da produção de frutos de pimentão Taurus durante o experimento..... | 33 |
| Figura 11– Uso da câmara de Scholander para determinar o potencial hídrico foliar..... | 34 |
| Figura 12– Avaliação de trocas gasosas com IRGA, realizada no dia 13 de janeiro de 2025..... | 35 |
| Figura 13 – (A) Câmera termográfica Flir E5xt e (B) representação da imagem térmica no visor da câmera..... | 35 |
| Figura 14 – imagem capturada através da câmera modelo FLIR E5xt de ângulo lateral (A) e de ângulo superior (B)..... | 36 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 15 – | Variação diária da temperatura (A) e da umidade relativa do ar (B) no interior do ambiente protegido durante o período experimental (11/outubro/2024 a 17/janeiro/2025) em São Benedito–CE..... | 38 |
| Figura 16 – | Massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus) aos 123 dias após o transplante, em função de diferentes lâminas de irrigação (A e C) e doses de adubação orgânica com Protamin GR (B e D), com e sem uso de hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito – CE, 2024/2025..... | 42 |
| Figura 17 – | Número de frutos por planta de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função de lâminas de irrigação (A) e doses de Protamin GR (B), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 44 |
| Figura 18 – | Peso médio dos frutos de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função de lâminas de irrigação (A) e doses de Protamin GR (B), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 45 |
| Figura 19 – | Comprimento (A–B) e diâmetro (C–D) dos frutos de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função de lâminas de irrigação (A, C) e doses de Protamin GR (B, D), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/ 2025..... | 46 |
| Figura 20 – | Produtividade de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função das lâminas de irrigação (A) e das doses de Protamin GR (B), contrastando tratamentos com e sem hidrogel, em ambiente protegido, São Benedito–CE, 2024/ 2025..... | 47 |
| Figura 21 – | Potencial hídrico foliar (Ψ_f) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) da dose de adubo orgânico Protamin GR (% da recomendação), em cultivo de pimentão vermelho (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), com e sem uso de hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 49 |
| Figura 22– | Condutância estomática (gs) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) da dose de adubo orgânico Protamin GR (% da recomendação), em cultivo de pimentão vermelho (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 50 |
| Figura 23 – | Taxa fotossintética líquida (A) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) | |

| | | |
|-------------|---|----|
| | da dose de adubo orgânico Protamin GR (% da recomendação), em cultivo de pimentão vermelho (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 51 |
| Figura 24– | Taxa de transpiração (E) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) da dose de adubo orgânico Protamin GR (% da recomendação), em cultivo de pimentão vermelho (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 52 |
| Figura 25– | Variação diária da temperatura do ar (°C) e da umidade relativa do ar (%) registrada no interior do ambiente protegido no dia 13 de dezembro de 2024 (data das avaliações de ΔT e CWSI) | 53 |
| Figura 26– | Mapas de contorno da diferença de temperatura entre o dossel e o ar (ΔT) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 9h (A) e 12h (B)..... | 54 |
| Figura 27 – | Mapas de contorno da diferença de temperatura entre o dossel e o ar (ΔT) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 14h (A) e 16h (B)..... | 56 |
| Figura 28– | Mapas de contorno do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 9h (A) e 12h (B)..... | 58 |
| Figura 29 – | Mapas de contorno do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 14h (A) e 16h (B)..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Caracterização química e física do solo na área de estudo..... | 25 |
| Tabela 2 – Recomendação de adubação para a cultura do pimentão..... | 27 |
| Tabela 3 – Resumo da análise de variância (quadrados médios) para altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), aos 123 dias após o transplântio, em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, em ambiente protegido. São Benedito – CE, 2024/2025..... | 40 |
| Tabela 4 – Resumo da análise de variância (quadrados médios) para os componentes de produção do pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus) — NF: número de frutos por planta; PMF: peso médio dos frutos (g); CF: comprimento do fruto (mm); DF: diâmetro do fruto (mm); PD: produtividade (ton. ha ⁻¹) — em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025..... | 43 |
| Tabela 5 – Resumo da análise de variância (quadrados médios) para potencial hídrico foliar (Ψ_F , MPa), condutância estomática (gs, mol m ⁻² s ⁻¹), taxa fotossintética (A, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e transpiração (E, mmol m ⁻² s ⁻¹) de pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, em ambiente protegido. São Benedito – CE, 2024/2025..... | 48 |
| Tabela 6 – Resumo da análise de variância para a diferença de temperatura entre o dossel e o ar (ΔT) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliadas nos horários de 09h, 12h, 14h e 16h..... | 52 |
| Tabela 7 – Resumo da análise de variância para o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em plantas de pimentão vermelho (<i>Capsicum annuum</i> L., cv. Taurus), em função das lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados nos horários de 9h, 12h, 14h e 16h, em ambiente protegido..... | 57 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 15 |
| 2.1 | Geral..... | 15 |
| 2.2 | Específicos..... | 15 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 3.1 | Aspectos gerais da cultura do pimentão..... | 16 |
| 3.2 | Cultivo protegido..... | 17 |
| 3.3 | Irrigação Deficitária..... | 19 |
| 3.4 | Polímeros hidrorretentores na agricultura..... | 20 |
| 3.5 | Adubos orgânicos | 22 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 24 |
| 4.1 | Caracterização do ambiente experimental | 24 |
| 4.2 | Ambiente protegido..... | 25 |
| 4.3 | Solo | 25 |
| 4.4 | Manejo da cultura | 25 |
| 4.5 | Adubação | 27 |
| 4.6 | Irrigação..... | 28 |
| 4.6.1 | Condução da planta | 29 |
| 4.6.2 | Delineamento Experimental..... | 31 |
| 4.7 | Variáveis analisadas..... | 32 |
| 4.7.1 | <i>Temperatura e umidade relativa</i> | 32 |
| 4.7.2 | <i>Variáveis Morfológicas</i> | 33 |
| 4.7.3 | <i>Variáveis de produção</i> | 33 |
| 4.7.4 | <i>Variáveis Fisiológicas</i> | 34 |
| 4.8 | Análises Estatísticas | 37 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 38 |
| 5.1 | Temperatura e umidade relativa | 38 |
| 5.2 | Variáveis morfológicas..... | 39 |
| 5.3 | Variáveis de Produção | 42 |
| 5.4 | Variáveis Fisiológicas..... | 47 |
| 6 | CONCLUSÃO | 61 |

| | | |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| 7 | CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS | 62 |
| | REFERÊNCIAS..... | 63 |

1 INTRODUÇÃO

A cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.) é uma das espécies de Solanaceae mais cultivadas e consumidas no Brasil (Lorenzoni *et al.*, 2015), com produção de 224.286 toneladas no ano de 2017, sendo São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Ceará os Estados com os maiores volumes de produção (IBGE, 2017).

As variedades de pimentão colorido possuem custos de produção significativamente mais elevados em comparação com o pimentão verde comum. Essa diferença está relacionada a diversos fatores, incluindo um ciclo de cultivo mais longo, a necessidade de cuidados específicos e um manejo diferenciado para se garantir a qualidade dos frutos. Além disso, essas variedades necessitam de insumos e de tecnologias adicionais para proteção contra pragas e doenças, além de mudanças no ambiente de cultivo. Os maiores custos de implantação são justificados por estas variedades apresentarem maiores valores de venda, proporcionando maior lucro ao produtor.

O pimentão é uma cultura sensível ao déficit hídrico, em especial no início da frutificação (Braga e Marouelli, 2017), e essa condição pode afetar negativamente o tamanho e a formação dos frutos, resultando em menor produtividade e em qualidade inferior. A planta do pimentão é também bastante exigente quanto à fertilidade do solo, e considerando que os solos brasileiros geralmente apresentam baixa fertilidade, é necessário se utilizar adubações orgânicas e/ou minerais para tornar o solo compatível às exigências da cultura (Sediyama *et al.*, 2009).

No Brasil, 65 trilhões de litros de água são utilizados anualmente pelos setores de produção e de consumo, sendo o setor agrícola responsável pelo consumo 49,8% desta água, ficando à frente do abastecimento humano urbano (24,3%), setor industrial (9,7%), uso animal (8,4%), termelétricas (4,5%), mineração (1,7%) e humano rural (1,6%) (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019).

A região nordeste apresenta clima favorável para o desenvolvimento da cultura do pimentão, entretanto, a qualidade e a disponibilidade de água são fatores limitantes para se realizar a produção nas zonas semiáridas. Em períodos de escassez hídrica, a aplicação de tecnologias de irrigação é indispensável quando se deseja obter segurança de produção, pois nessa parte do território brasileiro, a escassez hídrica pode ocasionar estresse fisiológico, que resulta em uma produção de baixa qualidade e em produtividade reduzida.

O uso de tecnologias para se melhorar a eficiência da irrigação e a aplicação precisa

de lâminas d'água influencia positivamente na redução do consumo de recursos hídricos. Os sistemas de irrigação por gotejamento e por microaspersão garantem uma distribuição controlada da água, minimizando perdas. Já o uso de polímeros hidroretentores pode ser vantajoso por atuarem como reguladores da disponibilidade de água para as culturas, podendo aumentar a produtividade e minimizar os riscos de produção causados por intempéries climáticas. (Mendonça *et al.*, 2013).

O cultivo de pimentão é geralmente realizado de forma convencional e com uso de agroquímicos de forma indiscriminada. A agricultura convencional depende do uso intensivo de produtos químicos, o que faz com que os consumidores vejam nesse sistema de produção um possível risco à saúde e ao meio ambiente, levando-os a procurar produtos livres de contaminação. Uma alternativa que está em constante crescimento é a agricultura orgânica que não utiliza fertilizantes químicos e nem defensivos nocivos à natureza e nem aos seres humanos (Finatto *et al.*, 2013). Por isso, o uso de bioinsumos está crescente na agricultura brasileira.

Este trabalho objetivou testar diferentes lâminas deficitárias de irrigação e doses do bioinsumo Protamin GR, que é um fertilizante orgânico rico em carbono, nitrogênio orgânico e aminoácidos sendo muito utilizado pelos produtores orgânicos na região da Ibiapaba-CE, em conjunto com a aplicação de hidrogel, um polímero que retém água, para atenuar o estresse hídrico nas plantas de pimentão.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar os efeitos de diferentes lâminas de irrigação deficitária, associadas à aplicação de hidrogel e de doses do bioinsumo Protamin GR, sobre o desempenho fisiológico e produtivo do pimentão (*Capsicum annuum* L., cultivar Taurus) em ambiente protegido.

2.2 Específicos

- Avaliar o crescimento vegetativo e produção de biomassa do pimentão sob diferentes lâminas de irrigação e doses do bioinsumo Protamin GR;
- Mensurar as trocas gasosas das plantas em resposta aos tratamentos hídricos e nutricionais;
- Avaliar o estado hídrico das plantas por meio da termografia infravermelha e do potencial hídrico foliar;
- Determinar a produtividade sob diferentes níveis de irrigação e adubação;
- Verificar a interação entre os fatores lâmina de irrigação e dose de Protamin GR no desempenho fisiológico e produtivo do pimentão.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais da cultura do pimentão

Pertencente à família das solanáceas, o pimentão (*Capsicum annuum* L.) apresenta como local de origem as regiões tropicais da América, incluindo o México, a América Central e a América do Sul (Marouelli e Silva, 2011; Nick e Borém, 2016). Historicamente, segundo Filgueira (2008), o cultivo do pimentão já era praticado por povos indígenas da América antes da colonização espanhola e introduzido na Espanha somente em 1493, sendo, posteriormente, difundida para outros países da Europa, Ásia e África. No Brasil, a introdução da cultura do pimentão se deu inicialmente no estado de São Paulo (Reifschneider, 2000)

Morfologicamente, o pimentão é considerado uma planta com estrato arbustivo, e perene, mas, no entanto, é cultivada predominantemente como anual (Filgueira, 2008; Sousa, 2022). Possui caule semilenhoso com bifurcações a partir de certa altura, apresentando duas ou três ramificações iniciais, podendo ramificar-se exponencialmente até o final do ciclo (Machuca, 2018), com raízes que podem atingir de 0,3 m a 0,6 m (Goto e Rossi, 1997). Suas folhas são ovaladas e alternadas na haste, e as flores caracterizadas como hermafroditas, localizadas na região denominada axila (Menezes, 2024; Sousa, 2022), dividindo o local com uma folha e em alguns casos, com uma ramificação adicional.

O fruto do pimentão, quanto ao tipo é classificado como do tipo baga, com formatos variando entre cônicos, retangular ou cúbicos, conforme a variedade, com híbridos apresentando colorações diversas (verde, vermelha, amarela, creme, laranja e roxo) quando maduros, sendo que seu consumo é majoritariamente na coloração verde (Marouelli e Silva, 2012; Sedyiyama *et al.*, 2014). O crescimento do fruto, apresenta relação comprimento/diâmetro de 1,5, sendo o comprimento mais rápido que o diâmetro, e ainda, apresenta desenvolvimento em 3 fases, conforme detalhada por Lana (2017). Embora também pertencente ao gênero *capsicum*, diferencia-se das pimentas por despontar classificação zero (0,0) na escala de Scoville (SHU). Esta escala analisa a quantidade de capsaicina, alcalóide que confere a pungência às pimentas (Machuca, 2018), logo, o pimentão não é picante, por não conter a capsaicina.

O cultivo de pimentão é uma atividade altamente significativa para o setor hortícola brasileiro, uma vez que a cultura é amplamente cultivada em todo o território nacional e figura-se como uma das dez hortaliças de maior importância econômica no Brasil (Albuquerque *et al.*,

2012; Oliveira Filho *et al.*, 2018; Matos Filho *et al.*, 2020), ocupando a terceira posição dentre as solanáceas, sendo superada, em termos de produção, apenas por tomate e batata (Sousa, 2022). Por apresentar os estádios fenológicos de frutificação e maturação sobrepostos (Marouelli e Silva, 2011), possibilita rápido retorno financeiro ao produtor, em decorrência do intervalo reduzido entre colheitas e do amplo mercado consumidor (Mortate *et al.*, 2018).

Apesar de sua origem tropical, a cultura do pimentão, assim como outras hortaliças, é dependente de fornecimento regular de água para que proporcione produtividade adequada (Santos *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2012) uma vez que a cultura é altamente sensível ao estresse hídrico, com efeitos negativos no desenvolvimento fisiológico e nutricional, e no rendimento dos frutos do pimentão (Ferrara *et al.* 2011; Yildirim *et al.* 2012; Aladenola e Madramootoo, 2014). Sendo assim, o uso da irrigação torna-se imprescindível para o incremento de produtividade, especialmente sistemas de irrigação localizados como o gotejamento, que proporciona a redução de perdas por evaporação e da incidência de doenças da parte aérea, além de exigir menor demanda de água e energia (Braga e Marouelli, 2017).

Conforme Braga e Marouelli (2017), até meados da década de 1990, o cultivo de pimentão era realizado tradicionalmente em campo aberto, contudo, a demanda de pimentões de maior qualidade, como os coloridos, impulsionou a expansão do cultivo protegido de pimentão no final da referida década. Embora boa parte da produção ainda seja proveniente de campo aberto, ressalta-se que em termos de características morfológicas, produtividade e qualidade de frutos e eficiência no uso da água, há diferenças consideráveis entre os ambientes.

3.2 Cultivo protegido

Historicamente, a proteção física de cultivos contra as adversidades climáticas foi datada no período romano em cultivos de pepino, vindo a surgir os precursores dos abrigos para cultivo protegido entre os séculos XVI e XVIII, na Inglaterra, na França, no Japão e na China, em forma de estruturas rudimentares de madeira ou de bambu, cobertas com painéis reticulados de vidro ou de papel azeitado (Wittwer e Castilla, 1995; Castilla, 2005; Faria Júnior e Hora, 2018).

As primeiras experiências com filmes plásticos, conforme Faria Júnior e Hora (2018), começaram por volta da década de 1950, ocorrendo nas duas décadas seguintes uma incrível expansão da área ocupada por abrigos para cultivo protegido cobertos com materiais plásticos em muitos países. No Brasil, as primeiras iniciativas do cultivo protegido com

finalidade comercial datam no final da década de 1970, ocorrendo as primeiras pesquisas na década seguinte, na UNESP, campus Jaboticabal, São Paulo.

Inicialmente, o principal propósito do ambiente protegido era proporcionar um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas, independente das condições ambientais externas, sendo a primeira finalidade elevar a temperatura do ar com o “efeito estufa”. Consecutivamente, outras finalidades foram sendo incorporadas (Faria Júnior e Hora, 2018).

Atualmente, a utilização de cultivos protegidos é essencial para aumento da produtividade e da qualidade final do cultivo, quando comparado ao campo aberto, uma vez que, a utilidade faz jus à denominação, protegendo a cultura contra excesso de chuva, ventos, variação de temperatura e de umidade, radiação solar, e a proliferação de pragas e doenças. Todavia, apesar da larga expansão e incentivo no uso de ambientes protegidos, tal estratégia de cultivo ainda é equívoca para alguns produtores, que segundo Barreto et al (2022) é decorrente do alto custo dos materiais para implantação e manutenção da estrutura, carência de conhecimento técnico por parte de produtores e funcionários, manejo inadequado da tecnologia, a falta de planejamento e a gestão ineficaz do processo produtivo.

É notório a diferença de produtividade e qualidade de frutos de olerícolas cultivados em ambientes protegidos, como por exemplo o tomate e pimentão, e etc., conforme observado por Menezes (2024) quando comparou os cultivos de pimentão em estufa e em campo aberto, notando a superioridade da produtividade sob a estufa, com incrementos da área foliar, do peso médio de frutos, da produção de frutos por planta e maior produtividade, da melhoria da qualidade de sólidos solúveis dos frutos de pimentão em ambiente protegido, corroborando com Viol *et al.* (2017), sobre o incremento de produtividade, melhoria da qualidade do produto e redução do consumo de água.

Na região Nordeste do Brasil, em especificamente na serra da Ibiapaba, conhecida pela alta produção de olerícolas, em especial o pimentão, segundo levantamento por Barreto et al (2022) foram identificados 166 estabelecimentos que utilizam o cultivo protegido, sendo a maioria em pequenas propriedades rurais. Entre as culturas cultivadas, o tomate lidera, seguido do pimentão e morango, e cultivo de flores.

Apesar das desvantagens, o cultivo protegido apresenta tendência de crescimento, com investimento dos produtores que visam o aumento do rendimento de seus cultivos, e da assistência oferecida por técnicos que vêm se capacitando nessa área.

3.3 Irrigação Deficitária

Regiões semiáridas apresentam como característica intrínseca um balanço hídrico negativo (Costa *et al.*, 2025), ou seja, o somatório anual da evapotranspiração é superior ao da precipitação, a exemplo da região nordeste, no Brasil. Adicionalmente, é certo afirmarmos que todos os cultivos agrícolas são submetidos ao estresse hídrico por deficiência. Tal problemática é resolvida com o uso de sistemas de irrigação, permitindo o cultivo durante todo o ano.

Embora a irrigação proporcione muitas vantagens, é válido ressaltar que em muitos casos é observado certa negligência no que diz respeito ao fornecimento hídrico, principalmente em função do baixo conhecimento técnico por parte de produtores e de defasagem em assistência técnica em algumas regiões, tais fatores corroboram para a ocorrência de deficiência hídrica aos cultivos em função de um manejo inadequado da irrigação. Conforme Valnir Júnior *et al* (2013), a definição do manejo hídrico de um cultivo implica na aprovação da quantidade de água a ser aplicada (lâmina d'água) e na maneira em que será fornecida às plantas, uma vez que, erros ou negligências nesses pontos muitas vezes geram insucessos da produção tornando os cultivos economicamente inviáveis (Coelho *et al.*, 2005).

Na literatura, pesquisas sobre o manejo da irrigação continuam apresentando elevada importância, com bons resultados no que diz respeito à submissão de cultivo a lâminas de irrigação deficitária, sobretudo para regiões com elevada evapotranspiração como o semiárido, onde a aplicação do déficit surge como alternativa corroborando com a necessidade dos produtores de manter sua área de cultivo sob irrigação, eliminando as reduções que não favoreçam incrementos de produtividade nas culturas, uma vez que o objetivo principal desta prática é o aumento do uso e eficiência da água (Kirda, 2002; Zwirter, 2013; Costa, 2023). De acordo com English (1990), em áreas de escassez hídrica, para o produtor, a maximização da produtividade da água pode ser economicamente mais rentável do que a maximização da produção.

Nesse contexto do uso da irrigação deficitária, Chai *et al* (2016) explanam que o embasamento científico fornece variações substanciais em termos da definição de “déficit hídrico” para culturas agrícolas em função das diferentes formas de aplicação de déficits hídricos. Sendo assim, os autores propuseram uma classificação “padronizada” definida em 5 níveis, onde o déficit varia desde o grave (água inferior a 50% da capacidade de campo) até o excedente (água superior à necessidade hídrica das plantas).

A cultura do pimentão, embora originária de regiões tropicais, apresenta-se como

suscetível ao estresse hídrico. Apesar de sua boa adaptabilidade a região semiárida, assim como a maioria das hortaliças, tem seu cultivo limitado no período mais vantajoso edafoclimaticamente, limitando-os em função dos recursos hídricos que reduzem drasticamente após a estação chuvosa, a exemplo do semiárido brasileiro.

A suscetibilidade do pimentão ao estresse hídrico, é corroborada em diferentes estudos, entre os quais cita-se Aladenola e Madramootoo (2014): os autores observaram que a aplicação de uma lâmina correspondente a 40% da evapotranspiração da cultura (ETc) apresentou valores de condutância estomática de 75 a 80% menores que a recomendação para o pimentão (100% da ETc), e que a lâmina de 120% proporcionou maiores valores no rendimento, eficiência no uso da água.

Adicionalmente, resultados semelhantes são apresentados por Queiroga (2019) em relação a lâminas de irrigação, onde a menor lâmina, correspondente a 60% da ETc proporcionou menores médias para respostas morfológicas (taxa de crescimento absoluto e relativo para diâmetro do caule e altura da planta) e fisiológicas (taxa de assimilação de CO₂ e condutância estomática). No estudo de Matos Filho et al. (2020), os autores observaram que o excesso de irrigação em nível maior ou igual a 100% da evaporação do tanque classe “A” (ECA), ocasionou redução do número de frutos comerciais, da produção de frutos por planta, do diâmetro e pH do fruto, que uma reposição de 75% da ECA propiciou maior eficiência no uso da água.

Ainda que estudos com a aplicação de lâminas de irrigação deficitárias proporcionem resultados que por vezes são previstos, a exemplo das respostas de produtividade e eficiência no uso da água e outras respostas morfológicas e fisiológicas, a continuidade de pesquisas nessa linha ainda tem elevada importância, principalmente quando a reposição hídrica é combinada com outro fator que maximize a disponibilidade de água às plantas por mais tempo, a exemplo dos condicionadores de solo, como polímeros hidrorretentores.

3.4 Polímeros hidrorretentores na agricultura

A busca pela otimização dos recursos hídricos, especialmente na agricultura irrigada, fez com que os pesquisadores buscassem formas de aumentar a disponibilidade hídrica às plantas em condições deficitárias, objetivando incrementos na eficiência do uso da água. Entre as estratégias, revelam-se os condicionadores do solo que dentre os quais, é destacado aqui os polímeros hidrorretentores, ou hidrogéis.

Dusi (2005) comenta que os tipos de polímeros são classificados em 3 grupos, com os utilizados na agricultura localizados no grupo III, onde a água é confinada por uma fraca ligação de hidrogênio, permitindo a absorção e liberação ao longo de períodos extensos. Os mesmos, ainda são categorizados conforme a origem, divididos em sintéticos ou naturais (Ahmed, 2015). Os sintéticos são caracterizados por excelente absorção de água, vida útil longa e alta resistência, mas a não-degradabilidade torna-o tóxico ao meio ambiente, limitando seu uso na agricultura (Yu *et al.*, 2011). Em contrapartida, os naturais destacam-se em razão de suas propriedades como biodegradabilidade, biocompatibilidade, hidrofobicidade e boa resistência mecânica, entre outras (Shi *et al.*, 2011), tornando-o mais vantajoso.

Os polímeros hidroretentores habitualmente são comercializados com granulometria reduzida, assemelhando-se a um pó. No entanto, em função de sua característica intrínseca, esses polímeros absorvem uma grande quantidade de água em comparação ao seu peso e não se dissolvendo em água (Collins *et al.*, 2019), com essa retenção variando na ordem de 150 a 400 vezes o seu próprio peso (Wofford Júnior e Koski, 1990; Marques *et al.*, 2013; Navroski *et al.*, 2015), sendo assim considerados como mini reservatórios de água no solo, liberando gradualmente água e fertilizantes para as plantas por diferença de pressão osmótica (Macedo, 2022), possibilitando maior capacidade real de água e maiores turnos de irrigação em períodos de estiagem (Matos Filho *et al.*, 2020).

Frazão (2024) comenta que estudos sobre a aplicação do hidrogel em culturas agrícolas adotam diferentes formas de adição do polímero ao solo, variando entre a administração a seco, irrigando logo em sequência, e com uma pré-hidratação antes de distribuí-lo ao solo. Contudo, a maneira como aplicado, não afeta sua capacidade de retenção de água segundo Neves *et al.* (2021). É válido ressaltar que, em teoria, a distribuição do hidrogel pré-hidratado é vista como a mais viável, explicado pelo fato de que quando adicionado seco, haverá uma competição com a planta na absorção de água, implicando inicialmente em um estresse hídrico ao cultivo. Num cenário de déficit hídrico, o resultado final pode ser diferente do esperado para essa estratégia de mitigação.

Categorizado como condicionador de solo, o hidrogel fornece muitas vantagens para a agricultura, em função de que além de contribuir para o desenvolvimento das plantas com a liberação controlada de água, também promovem melhorias nas condições físico-químicas do solo, otimizando sua estrutura e aumentando a retenção de nutrientes (Aragão, 2025). Para sistemas agrícolas irrigados, tais melhorias são particularmente relevantes, onde o hidrogel maximiza a eficiência hídrica ao reduzir perdas de água por evaporação e por

lixiviação (Nascimento *et al.*, 2020).

Por propiciar melhorias nas propriedades do solo, a aplicação de polímeros hidrorretentores são mais vantajosas para solos de textura grosseira, segundo Patra *et al.* (2022), tendo em vista que características como a porosidade, a densidade aparente, a capacidade de retenção de água, a permeabilidade e a temperatura são alteradas, além de criar um meio de crescimento favorável ao crescimento das plantas, dado que reduz a densidade do solo, melhora a oxigenação da zona radicular e mantém a humidade do solo (Patra *et al.*, 2022; Carvalho, 2025), aumentando o teor de água disponível às plantas (Saha *et al.*, 2020). Logo, tais características propiciarão uma redução da necessidade de irrigação, tornando o hidrogel ferramenta crucial de convivência com o estresse hídrico em regiões hidricamente deficitárias (Patra *et al.*, 2022; Saha *et al.*, 2020).

3.5 Adubos orgânicos

Na agricultura moderna, os fertilizantes se tornaram indispensáveis para manter altos níveis de produtividade. No Brasil, sua produção e comércio são regulamentados desde a Lei nº 6.894/1980 e pelo Decreto nº 4.954/2004, que tratam de inspeção, rotulagem e garantias. Mais tarde, a Lei nº 12.890/2013 reconheceu oficialmente os remineralizadores (“pós de rocha”) como insumo agrícola, ampliando as alternativas disponíveis ao produtor (Brasil, 1980; Brasil, 2004; Brasil, 2013).

O uso de fertilizantes minerais ganhou força principalmente a partir das décadas de 1970 e 1980, junto à modernização da agricultura e à expansão do Cerrado. Já nos anos 1990, o consumo ultrapassava 5 milhões de toneladas de N, P₂O₅ e K₂O, com destaque para o aumento expressivo do nitrogênio (Embrapa, 2002; 2016). Hoje, o Brasil ocupa a quarta posição no ranking mundial, responsável por cerca de 8% do consumo global. Esse crescimento reforça a importância estratégica do setor, mas também evidencia uma dependência preocupante de insumos externos.

Ao mesmo tempo em que contribuíram para ganhos produtivos, os fertilizantes minerais levantaram debates sobre custos de produção, impactos ambientais e sustentabilidade. É nesse cenário que os adubos orgânicos passam a ganhar espaço. Derivados de resíduos vegetais, animais ou agroindustriais, esses insumos liberam nutrientes de forma gradual, ajudam a melhorar a estrutura do solo, aumentam o teor de matéria orgânica e favorecem a biodiversidade microbiana (Kiehl, 2010; Silva *et al.*, 2019). De acordo com Souza *et al.* (2018), a maior atividade

microbiana contribui para ciclos naturais de mineralização e pode até reduzir a presença de patógenos. Além disso, ao aproveitarem resíduos que muitas vezes seriam descartados, os adubos orgânicos se inserem em uma lógica de economia circular (Fao, 2019).

Portanto, mais do que substituir totalmente os fertilizantes minerais, os adubos orgânicos devem ser vistos como parte de um manejo integrado da fertilidade, capazes de reduzir custos a médio prazo, aumentar a resiliência do sistema e contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do ambiente experimental

A pesquisa foi realizada no período de setembro de 2024 a janeiro de 2025 em ambiente protegido, situado no Instituto Agropolos do Ceará, em São Benedito-Ceará, sob as coordenadas geográficas: 4° 3'34.74" S e 40°53'36.39" W, a 903 m de altitude. O clima da região é classificado como tropical quente semiárido brando (Aw) de acordo com Köppen e Geiger (SILVA, 2021), com temperatura média de 23 a 29 °C e precipitação média anual de 1.100,2 mm de janeiro a maio, conforme o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE (2017).

Para o estudo foi cedida uma área de 340 m² dentro do ambiente protegido do Instituto Agropolos do Ceará, em São Benedito-Ceará, demarcada pela sombra amarela (Figura 1). Conforme apresentado no Google Earth, a data de captura da imagem apresentada foi 09 de junho de 2024.

Figura 1 – Apresentação da área experimental. São Benedito – CE, 2024.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

4.2 Ambiente protegido

O ambiente protegido é composto por 10 estruturas metálicas geminadas, tipo capela convectiva de uma água, tendo cada uma 48,0 m de comprimento, 6,4 m de largura e 3,2 m de altura, revestida com polietileno transparente com 200 μ m de espessura. A área experimental ocupou duas dessas estruturas geminadas, que apresentam abertura zenital e proteção com tela antiafideo nas laterais externas.

4.3 Solo

O solo da área é classificado como Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico (Embrapa, 2018). Foram coletadas amostras de solo para a caracterização química e física (Tabela 1), na profundidade 0,0 a 0,20m.

Através da análise de solo foi possível concluir que não houve necessidade de correção por calagem ou gessagem antes do plantio pois o pH e os teores de Ca e Mg estão adequados para o cultivo de pimentão. O solo foi trabalhado com enxadas para a limpeza da área e levantamento de camalhões onde as plantas foram cultivadas.

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo na área de estudo.

| Prof. (m) | C g kg ⁻¹ | M.O g kg ⁻¹ | P mg kg ⁻¹ | K Cmol _c dm ⁻³ | Ca Cmol _c dm ⁻³ | Mg Cmol _c dm ⁻³ | pH | CE dS m ⁻¹ |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|--|--|---------|--------------------------|
| 0,0 – 0,20 | 8,5 | 14,7 | 132,0 | 0,31 | 5,25 | 1,52 | 6,5 | 0,60 |
| | Areia g kg ⁻¹ | Silte g kg ⁻¹ | Argila g kg ⁻¹ | Classificação Textural | | Ds g cm ⁻³ | PT % | Dp g cm ⁻³ |
| 0,0 – 0,20 | 741,3 | 142,5 | 116,2 | Franco arenoso | | | | |

Prof. – profundidade; C – carbono; M.O – matéria orgânica; P – fósforo; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; CE – condutividade elétrica; Ds – densidade do solo; Dp – densidade de partículas e PT - porosidade total do solo.

4.4 Manejo da cultura

A semeadura foi realizada por empresa especializada (Estufa Timbauba, Guaraciaba do Norte-CE) em bandejas de polipropileno com 128 células (Figura 2A), preenchidas com substrato. As mudas foram transplantadas 35 dias após o plantio (DAP), sob o solo irrigado plenamente (Figura 2B). As plantas foram cultivadas no espaçamento de 0,4 m

x 0,8 m e receberam adubação e irrigação referente à 100% do recomendado até os 25 dias após o transplante (DAT), a partir de onde começaram as diferenciações de tratamentos. A variedade utilizada para o estudo foi o pimentão vermelho Taurus (Figura 3B), da SAKATA, muito cultivado na região da Serra da Ibiapaba por produtores que cultivam pimentão colorido. A aplicação de hidrogel da marca FORTH, ocorreu aos 28 DAT (Figura 3A), na dose de 3g por planta, diluída conforme recomendação do fabricante, aplicado imediatamente ao lado das plantas.

Figura 2 – Mudanças de pimentão vermelho Taurus aptas ao transplante, em bandejas de polipropileno com 128 células (A) e transplante de mudas de pimentão vermelho Taurus, 35 DAT, em solo elevado à capacidade de campo (B).



Fonte: Autor.

Figura 3 – Aplicação de hidrogel (A) e Pimentões Taurus da SAKATA, colhidos durante o experimento (B).



Fonte: Autor.

4.5 Adubação

A adubação foi realizada utilizando insumos orgânicos conforme as recomendações para a cultura do pimentão feitas pelo sistema de recomendação de adubação para o estado de Pernambuco conforme o Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA (2008) (Tabela 2). O nitrogênio (N) e o fósforo (P) foram fornecidos via solo por insumos orgânicos certificados pelo Instituto Biodinâmico (IBD), Protamin GR e Yoorin B Mag respectivamente, sendo aplicadas na fundação e por doses quinzenais após o transplante. Já o potássio (K) e o cálcio (Ca), foram disponibilizados via fertirrigação, separado e em dias diferentes para que não houvesse interação entre estes, através dos insumos orgânicos Allganic e Cal Super respectivamente, também com aplicações quinzenais. Foi realizada uma adubação de fundação 7 dias antes do transplante das mudas (figura 4). Os tratamentos de adubação iniciaram as 25 DAT.

Tabela 2 – Recomendação de adubação para a cultura do pimentão.

| EPOCA | N | P ₂ O ₅ | | | | K ₂ O | | | |
|---------------------|-----|------------------------------------|--------|---------|-----|---------------------------------------|-------------|-----------|-------|
| | | mg ^{dm⁻³} de P | | | | cmolc ^{dm⁻³} de K | | | |
| | | < 6 | 6 - 12 | 13 - 25 | >25 | < 0,8 | 0,08 - 0,15 | 0,16-0,30 | >0,30 |
| kg ha ⁻¹ | | | | | | | | | |
| Plantio | 30 | 160 | 120 | 80 | 40 | 40 | 40 | 40 | - |
| Cobertura | 120 | - | - | - | - | 120 | 80 | 40 | 40 |

Fonte: IPA (2008)

O insumo Protamin GR é fonte de nitrogênio e aminoácidos, com 13% de nitrogênio (N) na sua composição. Para a fundação, as doses foram iguais, de 30 kg ha⁻¹ de N, convertendo para Protamin GR, chegamos a uma dose de 230,76 kg ha⁻¹ do insumo. Considerando o espaçamento utilizado e a densidade final de 25 000 plantas ha⁻¹, chegou-se à uma dose por planta de 9,24 g planta⁻¹ na fundação. Na cobertura de N, a dose recomendada foi de 120 kg ha⁻¹, resultando em 37 g planta⁻¹ de Protamin GR, parcelada em 4 vezes, com aplicações periódicas a cada 20 dias conforme as doses 50%, 75%, 100%, 125% e 150% da recomendação para a cultura do pimentão, compondo as subparcelas do experimento.

Figura 4 – Aplicação de adubo de fundação, 7 dias antes do transplântio.

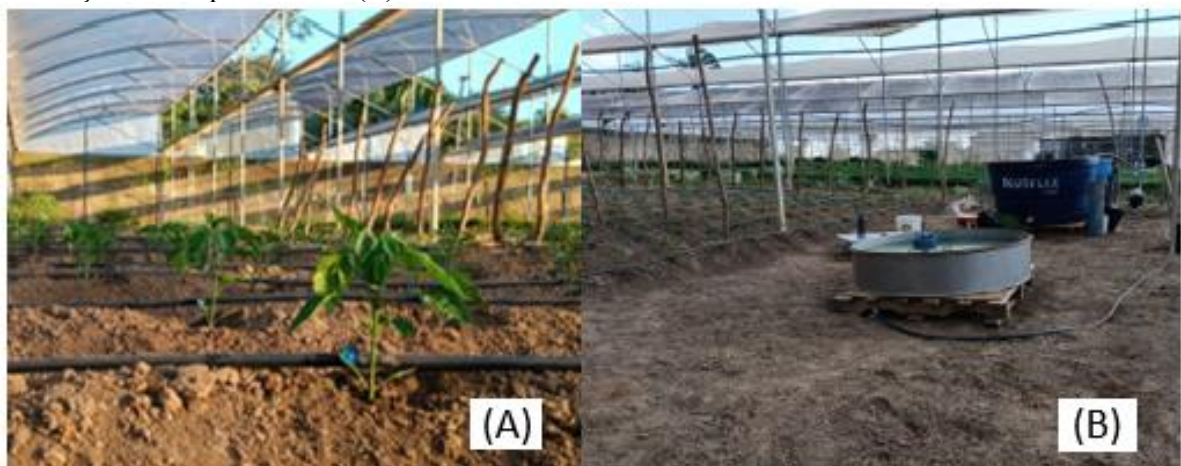


Fonte: Autor.

4.6 Irrigação

O método de irrigação utilizado foi localizado, com sistema de gotejamento (Figura 5A). As linhas laterais compostas por mangueiras de polietileno de baixa densidade (PEBD) com diâmetro nominal de 1/2" (16 mm), apresentavam emissores do tipo autocompensante instalados de forma "online" e dispostos em 1 (um) por planta. Eram abastecidas por principais de PVC, com uma para cada tratamento de irrigação.

Figura 5 – Método de irrigação localizada por sistema de gotejamento utilizado no experimento (A) e localização do tanque classe A (B).



Fonte: Autor.

A reposição das lâminas diárias foi calculada a partir do uso do método de tanque classe A (Figura 5B), com medições realizadas pela manhã, e utilizando as equações 1 e 2 e os coeficientes de cultivo sugerido por Doorenbos e Kassam (1994). Em função do tanque classe A estar localizado no interior de um ambiente protegido, optou-se por adotar como coeficiente do tanque (K_p) o valor igual a 1,0, conforme preconiza Lopes Filho (2002).

$$ET_o = EV \times K_p \quad (01)$$

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (02)$$

Em que: EV – evaporação do tanque classe A (mm dia^{-1}), aferido diariamente às 09h da manhã; K_p – coeficiente do tanque classe A (adimensional); ET_o – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); ET_c – Evapotranspiração de cultivo (mm dia^{-1}); K_c – coeficiente de cultivo da cultura (adimensional).

Calculado os valores para a ET_c diária, as lâminas de irrigação foram quantificadas em escala de tempo, utilizando desdobramentos da equação a seguir:

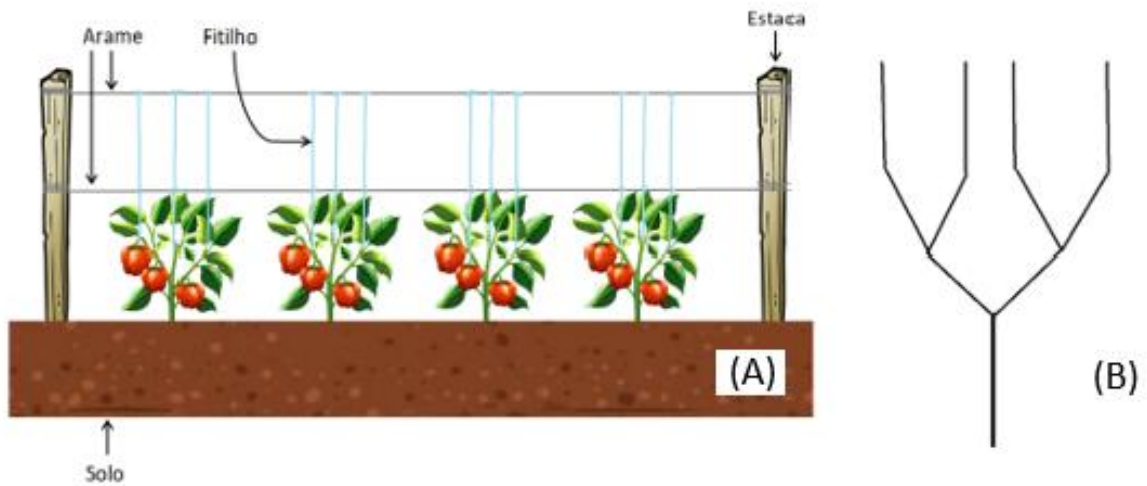
$$T_i = \frac{ITN \times E_{gL} \times E_{Lg}}{Q} \quad (03)$$

Em que: T_i - Tempo de irrigação; ITN – irrigação total necessária ou lâmina bruta; E_{gL} – espaçamento entre gotejadores na linha; E_{Lg} – espaçamento entre linhas de gotejadores; Q – vazão do gotejador (L h^{-1})

4.6.1 Condução da planta

Estacas de sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) foram implantadas no início, no meio e no fim das linhas de plantio, e 2 fileiras de arame liso galvanizado 2,7 mm foram amarrados no ponto superior da estaca e a 50 cm do solo, para auxiliar na condução vertical das plantas que ocorreram através de fitilhos que ligaram os galhos amarrados ao arame superior, conforme o esquema apresentado na figura 6A e 7. Na figura 6B, pode ser visto o sistema de condução das plantas que foi utilizado em 4 hastes.

Figura 6 – Ilustração que representa como foi conduzido o tutoramento das plantas de pimentão Taurus durante o experimento (A) e de como a poda modelou as plantas de pimentão, visando uma melhor qualidade final aos frutos (B).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Esse tipo de condução foi baseado no sistema de condução usado por produtores comerciais de pimentão colorido para evitar quebras na planta devido ao peso e melhorar a qualidade final dos frutos por meio de podas, deixando apenas quatro galhos principais e os frutos provenientes deles, eliminando outras brotações laterais, conforme a figura 6B.

Figura 7 – Tutoramento das plantas de pimentão Taurus durante o experimento.



Fonte: Autor.

4.6.2 Delineamento Experimental

O Delineamento utilizado foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas (DBC-split-plot) com 4 parcelas referentes à irrigação, sendo as lâminas de 40%, 60%, 80% e 100% da ETC, e as subparcelas sendo referentes às doses de adubação (50%,75%,100%,125% e 150%) do insumo orgânico Protamim GR. Em todos os blocos foi adicionada uma subparcelas extra chamado de testemunha, que recebeu 100% da ETC e 100% da dose de Protamim GR recomendada para a cultura do pimentão. Em todos os tratamentos foram adicionadas 3 gramas de gel hidro-retentor, com exceção da testemunha. Cada tratamento era representado por três plantas. Em resumo, são quatro parcelas, cinco subparcelas, mais a testemunha e quatro repetições, resultando em 84 unidades experimentais com 3 plantas cada, totalizando em 252 plantas (Figura 8).

Figura 8 – Esquema de disposição dos tratamentos no delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas, em ambiente protegido na cidade de São Benedito–CE.

| | | | | | | | |
|----|-----------------|----|----|----|----|----|----|
| B3 | TESTEMUNHA (+1) | D1 | D5 | L4 | D2 | D3 | D4 |
| | L2 | | | | | | |
| | BORDADURA | D1 | D2 | D4 | D3 | D5 | |
| | L1 | | | | | | |
| | BORDADURA | D2 | D4 | D1 | D5 | D3 | |
| B1 | L3 | | | | | | |
| | BORDADURA | D1 | D2 | D4 | D3 | D5 | |
| | L1 | | | | | | |
| | BORDADURA | D5 | D3 | D2 | D1 | D4 | |
| | L4 | | | | | | |
| B4 | TESTEMUNHA (+1) | D3 | D4 | D1 | D5 | D2 | |
| | L2 | | | | | | |
| | BORDADURA | D5 | D1 | D3 | D4 | D2 | |
| | L3 | | | | | | |
| | BORDADURA | D2 | D3 | D5 | D1 | D4 | |
| B2 | L2 | | | | | | |
| | BORDADURA | D4 | D2 | D5 | D3 | D1 | |
| | L3 | | | | | | |
| | BORDADURA | D2 | D4 | D1 | D5 | D3 | |
| | L4 | | | | | | |
| B2 | TESTEMUNHA (+1) | D1 | D2 | D5 | D3 | D4 | |
| | L1 | | | | | | |
| | BORDADURA | D4 | D3 | D1 | D5 | D2 | |
| | L3 | | | | | | |
| | BORDADURA | D1 | D3 | D2 | D4 | D5 | |
| B2 | L1 | | | | | | |
| | BORDADURA | D4 | D2 | D3 | D5 | D1 | |
| | L2 | | | | | | |
| | BORDADURA | D1 | D2 | D4 | D3 | D5 | |
| | L4 | | | | | | |
| B2 | TESTEMUNHA (+1) | D3 | D5 | D2 | D4 | D1 | |

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7 Variáveis analisadas

As variáveis analisadas foram coletadas e tabuladas durante todo o ciclo da cultura do pimentão, sendo estudadas e submetidas à estatística e elaboração de tabelas e gráficos ao final do ciclo da cultura. Para objeto de estudo, dividiram-se as variáveis em morfológicas, de produção e fisiológicas.

4.7.1 Temperatura e umidade relativa

As variáveis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (%) foram aferidas e armazenados pelo termo-higrômetro da marca Elitech, modelo RC-51H (Figura 9), que tem capacidade de armazenar 32 000 dados. O datalogger apresenta resistência à água do tipo IP67, podendo armazenar dados a cada 10 segundos. Para o experimento, foram armazenados dados a cada hora, 24 h por dia. Por segurança, os dados foram coletados semanalmente e tratados no software do equipamento.

Figura 9 – Modelo de termo-higrômetro utilizado no experimento, marca Elitech, modelo RC-51H.



Fonte: <https://pt.aliexpress.com/item/1005009699311806>.

4.7.2 *Variáveis Morfológicas*

As variáveis morfológicas de desenvolvimento foram avaliadas ao final do ciclo da cultura. A altura da planta (AP, cm) foi determinada a partir da medição por fita métrica, a partir do colo das plantas até o ápice principal. O diâmetro do caule (DC, mm) foi medido a partir de 3 cm do colo da planta com o auxílio de paquímetro digital, sendo essas duas primeiras variáveis avaliadas aos 123 DAT. Ainda nesse período, as plantas foram cortadas e pesadas, levando em consideração apenas a parte aérea da planta, removendo as raízes e frutos. A partir daí, foi obtido a massa fresca da parte aérea (MFPA, g). Em seguida, as amostras passaram pelo processo de secagem em estufa de circulação forçada, até se obter massa seca constante, ou massa seca da parte aérea (MSPA, g).

4.7.3 *Variáveis de produção*

O comprimento dos frutos (mm) também foi medido utilizando paquímetro digital, após selecionar frutos representativos das parcelas. O número de frutos foi obtido através da média da contagem dos frutos das plantas úteis. O peso médio dos frutos foi obtido através da divisão de produção (Figura 10) total pelo número de frutos. A produtividade foi estimada considerando o espaçamento utilizado (0,5 m X 0,8 m), onde foi possível obter uma densidade de 25 000 plantas por hectare, resultando em valores de ton. ha⁻¹, considerando as médias de colheitas e a densidade de plantio.

Figura 10 – Colheita e pesagem da produção de frutos de pimentão Taurus durante o experimento.



Fonte: Autor.

4.7.4 Variáveis Fisiológicas

As medições do potencial hídrico foliar (Ψ_F) foram realizadas sempre ao amanhecer, período em que a transpiração é mínima e o gradiente hídrico solo–planta–atmosfera tende a se equilibrar. Nessa condição, o Ψ_F pre-down é considerado uma boa aproximação do potencial hídrico do solo, embora alguns estudos indiquem exceções em situações de solos saturados ou de transpiração noturna (Ritchie e Hinckley, 1975; Turner, 1988; Rodríguez-Domínguez *et al.*, 2022).

As determinações foram feitas com câmara de pressão do tipo Scholander, abastecida com N_2 e equipada com manômetro calibrado e gaxetas adequadas ao pecíolo. O procedimento seguiu as recomendações de Boyer (1995) e da PMS Instrument Co. (2023), registrando-se os valores em MPa. Para cada parcela, selecionaram-se folhas totalmente expandidas do terço médio, saudáveis e sem danos, coletadas por volta das 05 h (figura 11).

Figura 11 – Uso da câmara de Scholander para estimativa o potencial hídrico foliar.



Fonte: Autor.

Na avaliação das trocas gasosas (figura 12), foi utilizado um IRGA (LCpro-SD, ADC BioScientific Ltda.), entre 08h e 10h da manhã, sempre antes da irrigação. As medições foram feitas em uma planta representativa por tratamento, usando a terceira ou quarta folha a partir do ápice. Foram mensuradas a condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E) e

a taxa fotossintética líquida (A), parâmetros que refletem diretamente a resposta da planta às condições hídricas e nutricionais do experimento.

Figura 12 – Avaliação de trocas gasosas com IRGA, realizada no dia 13 de janeiro de 2025.



Fonte: Autor.

A temperatura da planta foi acompanhada com câmera termográfica portátil (FLIR E5xt, Teledyne FLIR LLC®) (Figura 13A), com resolução de 160×120 pixels e faixa operacional de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$. A distância de captura foi mantida em 1 m (Figura 13B), emissividade ajustada em 0,95 e imagens registradas em quatro horários (09h, 12h, 14h e 16h).

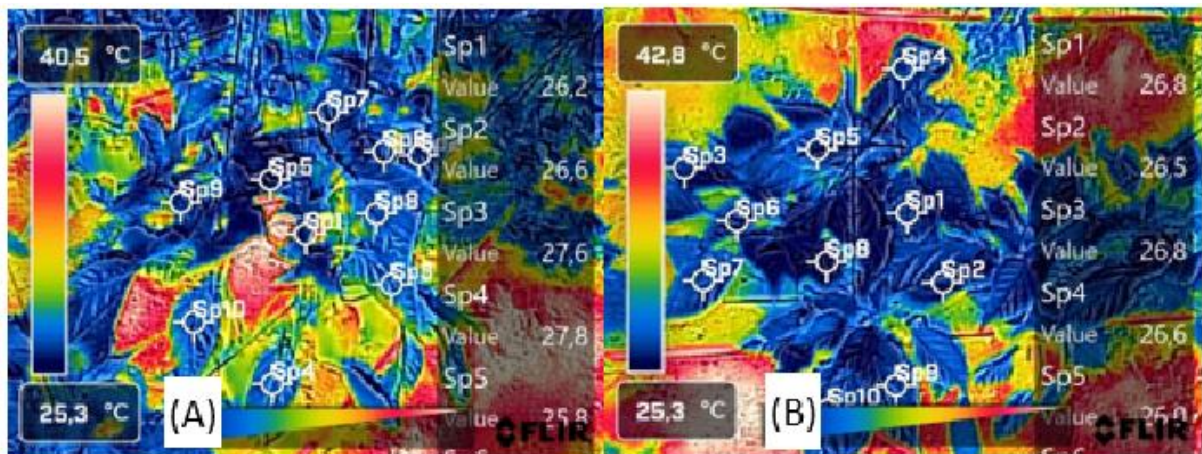
Figura 13 - (A) Câmera termográfica Flir E5xt e (B) representação da imagem térmica no visor da câmera.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para determinação da temperatura média da planta, foram tiradas duas fotos de cada planta do tratamento, uma foto da parte lateral (Figura 14A) e uma foto da parte superior (Figura 14B). Em cada imagem foram selecionados manualmente 10 pontos distribuídos ao longo do dossel, representando as diferentes regiões da parte aérea, mas selecionando apenas folhas. A partir desses pontos, foi calculada a média da temperatura dos dez pontos de cada imagem, sendo este valor considerado como representativo de cada tratamento (T_c). Esse procedimento permitiu avaliar de forma mais realista a condição térmica das plantas e comparar os efeitos dos diferentes níveis de irrigação aplicados gerando índices térmicos.

Figura 14 - Imagem capturada através da câmera modelo FLIR E5xt de ângulo lateral (A) e de ângulo superior (B).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir das médias de temperatura da planta obtidas em cada tratamento, foram calculados dois índices térmicos amplamente utilizados para avaliação do estresse hídrico. O primeiro (Equação 04) foi a diferença de temperatura entre o dossel e o ar ($\Delta T_{\text{canopy-air}}$), que consiste na subtração direta entre a temperatura média do dossel (T_c) e a temperatura do ar (T_{ar}), conforme proposto por García-Tejero *et al.* (2011) e Maes e Steep (2012).

O segundo índice (Equação 05) calculado foi o *Crop Water Stress Index* (CWSI), que relaciona a temperatura da planta com os limites de referência de folhas em condições de transpiração máxima (T_{wet}) e de estresse máximo (T_{dry}). Esse índice foi obtido pela equação apresentada em Jones *et al.* (2002), Möller *et al.* (2007), Costa *et al.* (2012) e Maes e Steep (2012).

$$\Delta T_{\text{canopy-air}} = T_c - T_{ar} \quad (04)$$

$$CWSI = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})} \quad (05)$$

Em que: $\Delta T_{canopy-air}$ - diferença entre a temperatura do dossel da planta e o ar; T_c - temperatura do dossel obtida a partir das imagens térmicas; T_a - temperatura do ar; CWSI - índice de estresse hídrico da cultura; T_{dry} - temperatura máxima de referência (condição seca), simulando folhas com estômatos totalmente fechados; T_{wet} - temperatura mínima de referência (suprimento hídrico adequado).

As temperaturas de referência (T_{dry} e T_{wet}) foram determinadas no tratamento de irrigação plena (100% da ET_c), seguindo a metodologia descrita para cálculo dos índices térmicos. Para isso, foram selecionadas duas folhas adultas, saudáveis e totalmente expostas à luz solar, localizadas entre a 3ª e a 4ª posição a partir do ápice da planta. A obtenção de T_{dry} foi realizada mediante aplicação de vaselina em ambas as faces da folha, cerca de 20 a 30 minutos antes da captura da imagem. Já para T_{wet} , aplicou-se pulverização de água em ambos os lados da folha, de 10 a 15 segundos antes da medição.

4.8 Análises Estatísticas

Os dados para cada variável foram submetidos à análise de variância (ANAVA), e submetidos a análises de regressão, na análise, as equações que melhor se ajustaram aos dados foram escolhidas com base na significância dos coeficientes de regressão a $p < 0,05$, e no maior coeficiente de determinação (R^2). Para a análise dos dados, foi utilizado o software de análises estatísticas SISVAR 5.8, versão gratuita (Ferreira, 2019). Também foram utilizados os softwares Excel 2021 (Microsoft Corporation, 2021) e Minitab (Minitab LLC., 2023) para a elaboração dos gráficos.

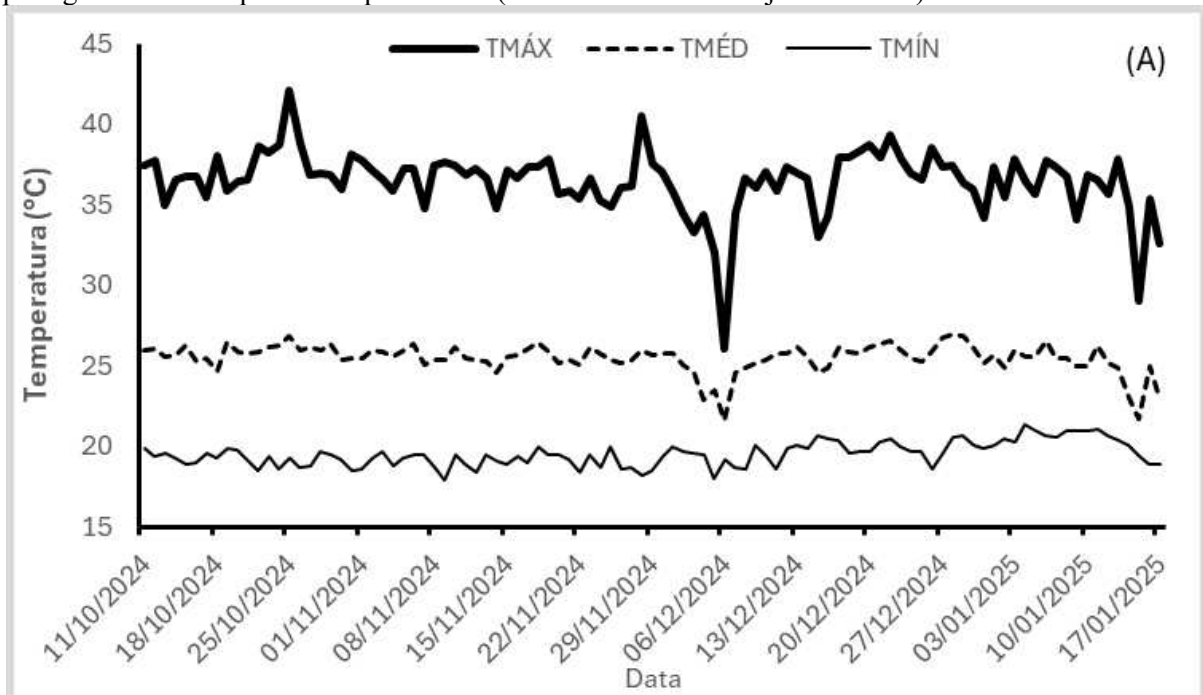
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

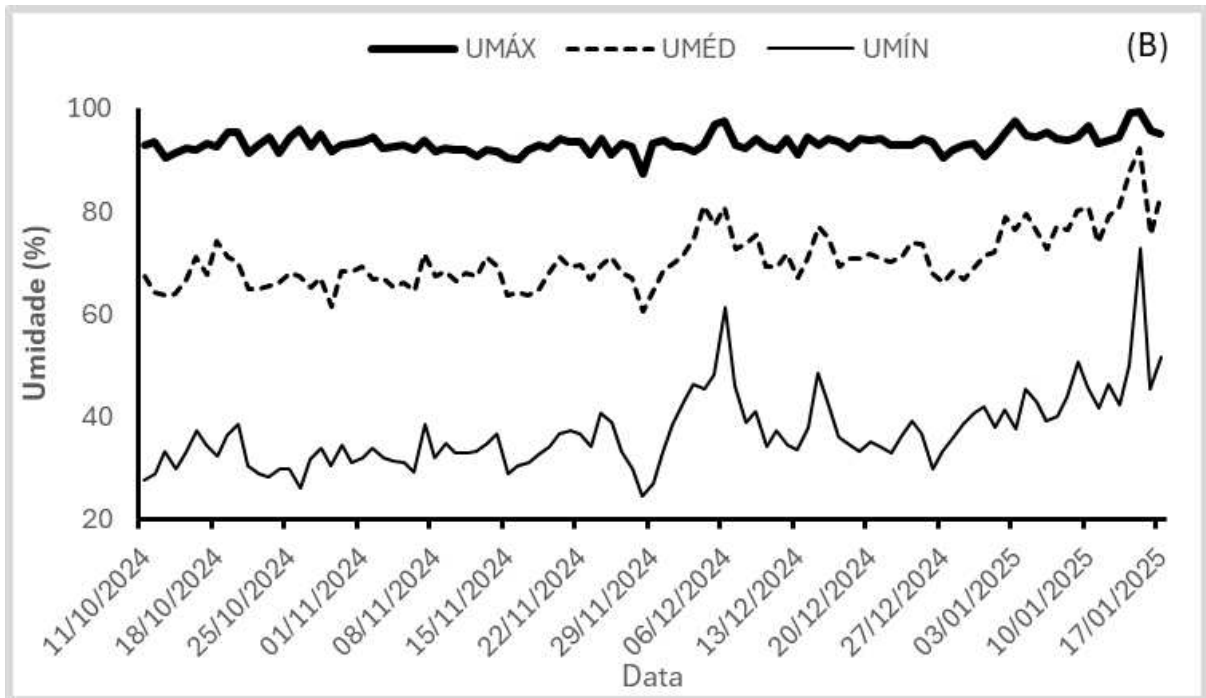
5.1 Temperatura e umidade relativa

De acordo com a Figura 15A, é possível se observar que as temperaturas máximas (TMÁX) variaram entre 42,1 e 26,1 °C, e as mínimas (TMÍN) variaram entre 21,3 e 17,9 °C. Essa variação de temperatura foge das recomendações para a cultura do pimentão, principalmente os picos de temperatura máxima. A utilização de ambiente protegido no cultivo de pimentão na Serra da Ibiapaba é uma das estratégias para se tentar adequar a produção de pimentão às condições climáticas.

Na Figura 15B, observam-se as variações de umidade durante o experimento. A umidade máxima (UMÁX) variou entre 99,6 e 87,2%, enquanto a mínima (UMÍN) variou entre 72,7 e 24,6%. A umidade média variou entre 92,2 e 60,4%. Os valores de umidade se mantiveram muito elevados, podendo ser resultado das condições do ambiente protegido e também, a utilização do ambiente para o plantio de outras culturas irrigadas.

Figura 15 - Variação diária da temperatura (A) e da umidade relativa do ar (B) no interior do ambiente protegido durante o período experimental (11/outubro/2024 a 17/janeiro/2025) em São Benedito-CE.





TMÁX = temperatura do ar máxima; TMÉD = temperatura do ar média; TMÍN = temperatura do ar mínima; UMÁX = umidade relativa do ar máxima; UMÉD = umidade relativa do ar média; UMÍN = umidade relativa do ar mínima. (Fonte: Elaborado pelo Autor).

O monitoramento e a análise da temperatura e da umidade durante o ciclo da cultura agrícola é determinante no sucesso da produção, pois estes fatores influenciam diretamente na brotação, no desenvolvimento, na produção e na qualidade final do produto, uma vez que temperaturas muito elevadas podem resultar em abortamento e problemas no desenvolvimento de frutos.

A umidade do ar também deve ser monitorada, pois esta variável influencia diretamente na fisiologia da planta. Umidade elevada proporciona condições ideais para o desenvolvimento de fitopatologias, e o acompanhamento das condições de umidade pode ser um fator determinante para o controle e a prevenção de determinados tipos de patologia (Carmo *et al.*, 2001).

A observação das variações de temperatura (°C) e Umidade Relativa (%) podem auxiliar na discussão e interpretação de alguns resultados obtidos durante o experimento, já que essas variáveis podem influenciar diretamente e fatores fisiológicos e índices de estresse.

5.2 Variáveis morfológicas

Aos 123 DAT não foi possível observar influencia significativa ($p < 0,05$) ligadas às lâminas de irrigação, doses de Protamim GR e nem para interação desses fatores relacionadas

às variáveis de altura de planta (AP) e diâmetro de caule (DC) como mostra a tabela 3. Esses resultados sugerem que as variáveis AP e DC são variáveis estatisticamente estáveis e pouco sensíveis ao manejo submetido, provavelmente por conta de regulação genética.

Tabela 3 - Resumo da análise de variância (quadrados médios) para altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), aos 123 dias após o transplante, em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, em ambiente protegido. São Benedito – CE, 2024/2025.

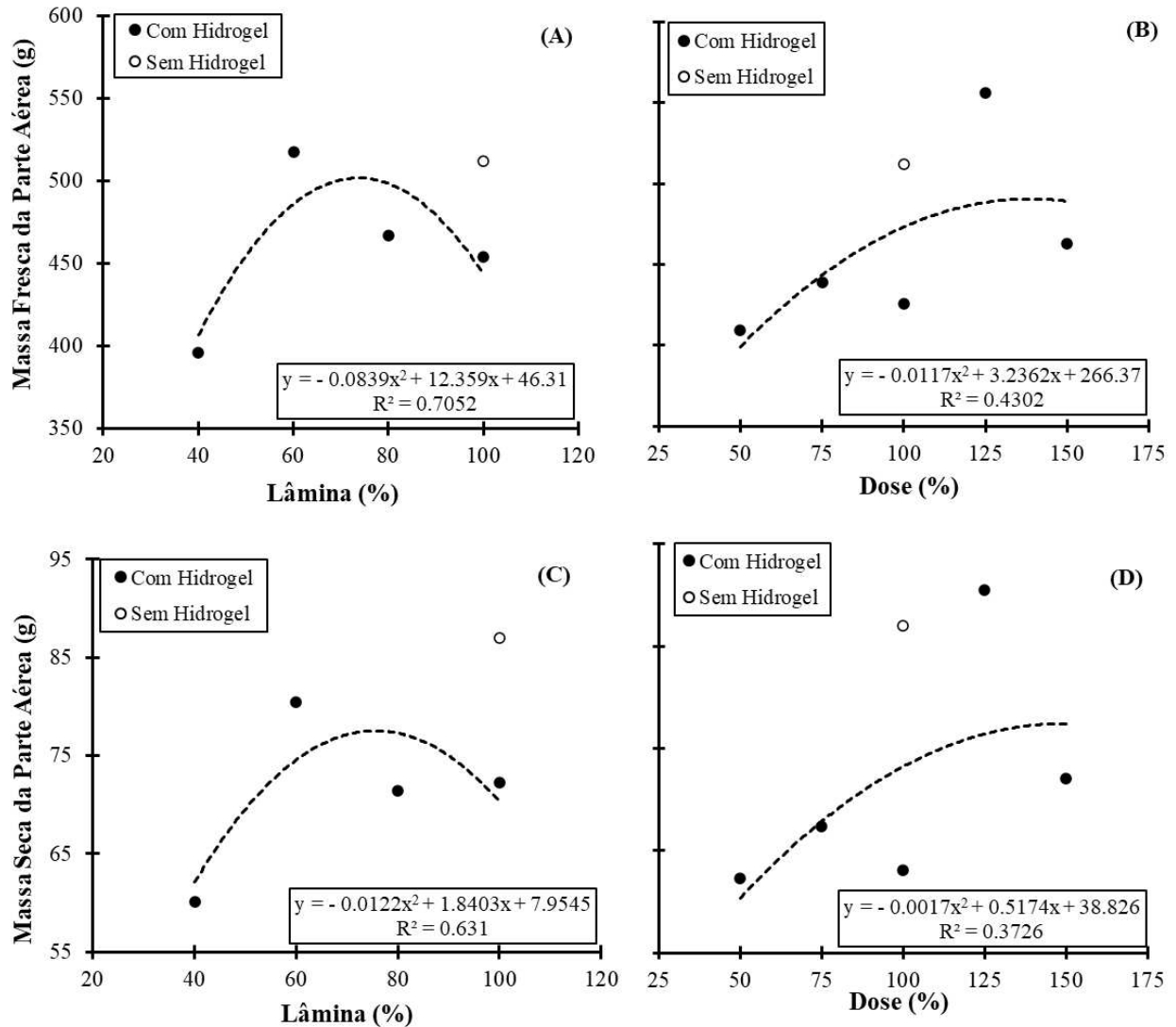
| FV | GL | QUADRADOS MÉDIOS | | | |
|------------------|----|----------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| | | AP | DC | MFPA | MSPA |
| | | 123 DAT | | | |
| Lâmina | 3 | 234,23 ^{ns} | 6,84 ^{ns} | 49740,47** | 1396,33** |
| Bloco | 3 | 877,72 | 1,62 | 28833,23 | 658,34 |
| Erro (1) | 9 | 80,90 | 2,93 | 6257,50 | 275,93 |
| Dose | 4 | 287,37 ^{ns} | 4,02 ^{ns} | 54136,49** | 2130,52** |
| Interação | 12 | 224,02 ^{ns} | 1,25 ^{ns} | 20745,12 ^{ns} | 492,49 ^{ns} |
| Erro 2 | 48 | 142,02 | 2,23 | 11502,06 | 331,16 |
| CV 1 (%) | | 8,89 | 11,87 | 17,25 | 23,37 |
| CV 2 (%) | | 11,77 | 10,37 | 23,38 | 25,61 |

GL = graus de liberdade; CV(1) e CV(2) = coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente; ns = não significativo; * = significativo a 5% ($p < 0,05$); ** = significativo a 1% ($p < 0,01$).

As variáveis MFPA e MSPA apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ($p < 0,01$) para os fatores lâminas e doses, sem apresentarem interações entre estes. Observando-se o gráfico de lâminas para a variável MFPA (Figura 16 A), é possível se constatar que o ponto máximo do gráfico é de lâmina de 73,7% da ETc, com massa fresca de 499,3g, e para a variável MSPA (Figura 16 C) a lâmina de 75,6% com hidrogel apresenta a maior média (77,5g).

A mesma tendência é relatada por Fereres e Soriano (2007), onde leve restrição hídrica pode favorecer ao balanço de fonte-dreno, possibilitando um desenvolvimento equilibrado. É importante apontar também que os tratamentos sem o uso de hidrogel nas figuras 16 A e 16C apresentaram resultados superiores, reforçando-se o que foi obtido nos resultados de estudo de Menezes *et al.* (2024), que em ambiente protegido, o uso de hidrogel sob lâminas deficitárias apresenta vantagens no desenvolvimento das plantas, mas em lâminas de irrigação plena o efeito se dilui. De acordo com Ullah *et al.* (2024), a abundância de água aumenta o tempo de saturação hídrica no entorno radicular, reduzindo-se a disponibilidade de oxigênio, refletindo-se em menor formação de biomassa.

Figura 16 - Massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) aos 123 dias após o transplante, em função de diferentes lâminas de irrigação (A e C) e doses de adubação orgânica com Protamin GR (B e D), com e sem uso de hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito – CE, 2024/2025.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nas Figuras 16B e 16D para as doses de Protamin GR, tanto para a variável MFPA como para a MSPA, as linhas de tendência apresentaram padrões semelhantes, indicando que o aumento de adubação orgânica com Protamin GR aumentou o acúmulo de biomassa até certo ponto, apresentando tendências de estabilização ou de queda se utilizadas doses superiores.

As maiores médias para MFPA e MSPA relacionadas a doses de Protamin GR foram obtidas nas doses de 138,7% e 149% da recomendação para a cultura (490,0 g e 77,3 g, respectivamente). O Protamin GR é um biofertilizante à base de hidrolisados proteicos que fornece a liberação gradual de nitrogênio orgânico e aminoácidos bioativos que resultam na

estimulação da fotossíntese, da síntese de proteínas e do crescimento vegetativo (Ávila-Pozo *et al.*, 2023). Agba e Okri (2023) relataram que doses de adubação orgânica adequadas resultaram em maior biomassa aérea do pimentão.

5.3 Variáveis de Produção

De acordo com o resumo da análise de variância (Tabela 4) onde constam os valores de quadrado médio de número de frutos (NF), peso médio de fruto (PMF), comprimento do fruto (CF), diâmetro do fruto (DF) e produtividade (PD), é possível observar que apenas 2 variáveis apresentaram diferenças estatísticas significativas, sendo elas PMF ($p < 0,05$) e CF ($p < 0,01$), ambos em função do fator lâminas de irrigação. As variáveis de PMF, CF e DF são relacionadas à última colheita realizada (aos 120 DAT), onde as plantas estavam esboçando maior resposta aos tratamentos submetidos.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância (quadrados médios) para os componentes de produção do pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) de Número de frutos por planta (NF); Peso médio dos frutos (PMF, g); Comprimento do fruto (CF, mm); Diâmetro do fruto (DF, mm) e Produtividade (PD, ton. ha⁻¹), em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.

| FV | GL | QUADRADOS MÉDIOS | | | | |
|------------------|----|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | | NF | PMF | CF | DF | PD |
| Lâmina | 3 | 5,66 ^{ns} | 2099,24* | 341,8* | 148,60 ^{ns} | 365,27 ^{ns} |
| Bloco | 3 | 1289 | 1080,73 | 14,86 | 305,53 | 330,71 |
| Erro (1) | 9 | 3,66 | 511,15 | 50,30 | 153,38 | 121,56 |
| Dose | 4 | 9,69 ^{ns} | 836,18 ^{ns} | 25,47 ^{ns} | 34,95 ^{ns} | 175,78 ^{ns} |
| Interação | 12 | 3,73 ^{ns} | 642,05 ^{ns} | 59,62 ^{ns} | 103,86 ^{ns} | 32,60 ^{ns} |
| Erro 2 | 48 | 6,30 | 490,98 | 67,02 | 112,14 | 135,97 |
| CV 1 (%) | | 14,52 | 15,16 | 5,96 | 17,22 | 20,51 |
| CV 2 (%) | | 19,04 | 14,86 | 6,88 | 14,73 | 21,70 |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; CV(1) e CV(2) = coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente; ns = não significativo; * = significativo a 5% ($p < 0,05$); ** = significativo a 1% ($p < 0,01$).

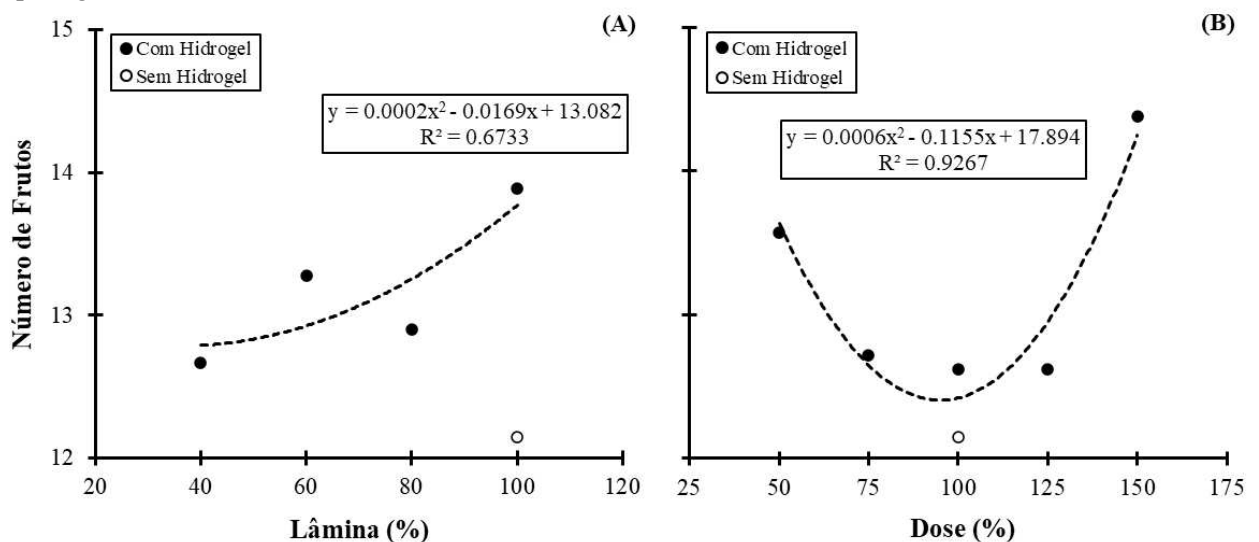
A variável de número de frutos (NF) foi obtida através da soma dos frutos produzidos durante todo o ciclo. É importante lembrar que para a condução do experimento foram realizados manejos de poda, permitindo apenas o desenvolvimento de 4 hastes principais e realizando a remoção de outras bifurcações, botões e frutos pequenos. Esse procedimento visa padronizar o número e tamanho dos frutos, impactando na qualidade final dos frutos. Isso ocorre

pelo fato de que é forçado um equilíbrio entre fonte de produção de fotoassimilados e drenos de armazenamento e consumo e de acordo com Flores-Velázquez *et al.* (2022), quanto mais hastes, maior número de frutos, porém com tamanhos menores.

Conforme comentado acima, a variável NF não se diferenciou estatisticamente em relação ao tratamento de lâminas de irrigação ou de doses de insumo Protamim GR. Mas é válido que a maior lâmina de irrigação (100% ETC com hidrogel) e a maior dose de adubação (150% da dose recomendada, com hidrogel) apresentaram tendência para melhores médias de produção. Esse comportamento também foi observado por Cardozo *et al.* (2016), onde maiores médias de número de frutos foram observadas em tratamentos de lâminas de 100% e 130% da ETC e maiores doses de adubos orgânicos (em comparação ao controle), resultando em melhor floração e pegamento.

Nas Figuras 17A e 17B, os gráficos apresentados para NF mostraram tendência côncava para cima ($a > 0$), que significa que os gráficos não apresentam pontos máximos e sim mínimos. Com isso, podemos afirmar que para lâmina, o ponto mínimo foi de 35,5% (12,8 frutos) e para dose, o ponto mínimo foi de 94,9% (12,4 frutos).

Figura 17 - Número de frutos por planta de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função de lâminas de irrigação (A) e doses de Protamin GR (B), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito-CE, 2024/2025.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação ao peso médio de frutos (PMF), observando a tabela de análise de variância (Tabela 4) apresentada acima, é possível identificar que houve resposta estatisticamente significativa ($p < 0,05$) apenas para o fator lâmina, sendo o tratamento de doses

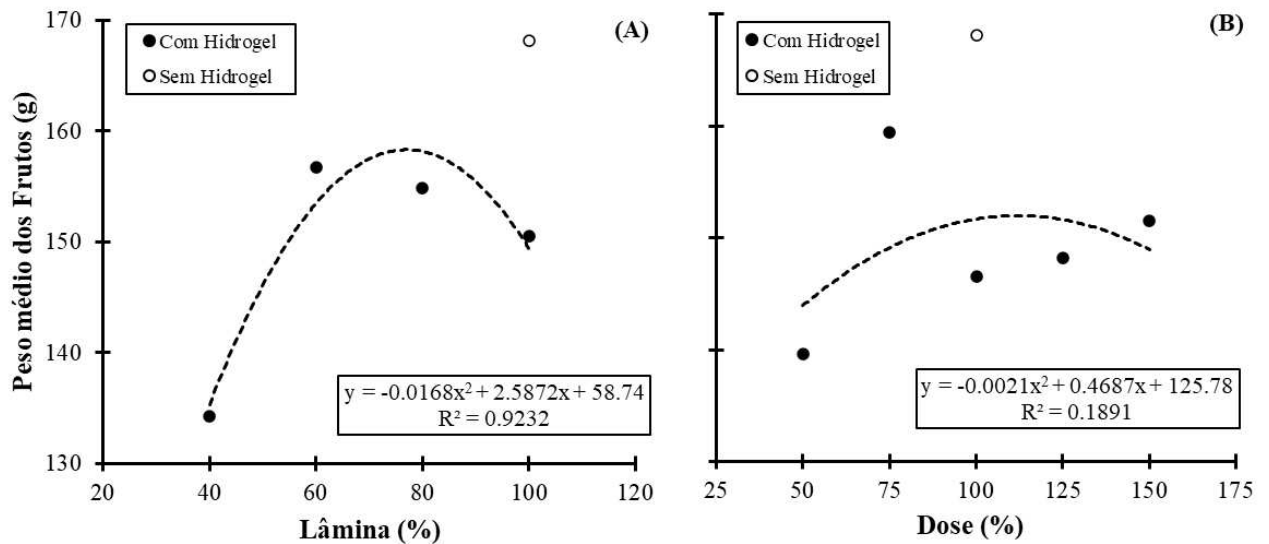
e a interação destes não significativa. Através Figura 18A, é possível observar que a lâmina com hidrogel que mais se destacou foi de 77,0% (158,3g), possivelmente em razão do equilíbrio entre disponibilidade hídrica e aeração radicular, resultando em uma maximização do peso médio dos frutos. Esta variável é diretamente dependente fluxo de água e de fotoassimilados, o que justifica também menor média de PMF para 40% da ETc (Menezes *et al.*, 2025; Oladosu *et al.*, 2022).

É importante ressaltar que as médias dos pesos médios de frutos submetidas a doses de hidrogel apresentaram um ponto máximo ideal, contudo, é notado que o tratamento testemunha (100% da ETc sem hidrogel) apresentou maior média entre os demais tratamentos, quando comparado em função das reposições hídricas e em função das doses de adubação. Sendo assim, infere-se que o incremento do estado hídrico adicional proporcionado pelo uso do hidrogel, pode ter influenciado para menor média de PMF nos tratamentos de irrigação com lâminas não características de estresse hídrico por deficiência, causando, possivelmente uma maior diluição da solução do solo, retardando o uso dos nutrientes pela planta.

Outra possível causa, mesmo que ainda teoricamente, é a adição do elemento hidrogel na interação solo-planta-atmosfera, resultando em uma maior competição entre a diferença de potenciais hídricos, uma vez que a competição hidrogel-planta pela solução do solo possa ser mais acentuada, causando as diferenças observadas na resposta do tratamento testemunha.

Ao observar a resposta em função das doses de Protamin GR (Figura 18B) podemos inferir que a dose de adubação de 112% (152,9g) do recomendado, tende a apresentar peso médio mais satisfatório, resultado de um melhor estado nutricional, influenciando diretamente na capacidade fotossintética e maior aporte de assimilados. Mesmo assim, as médias não se distinguiram estatisticamente.

Figura 18 - Peso médio dos frutos de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função de lâminas de irrigação (A) e doses de Protamin GR (B), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.



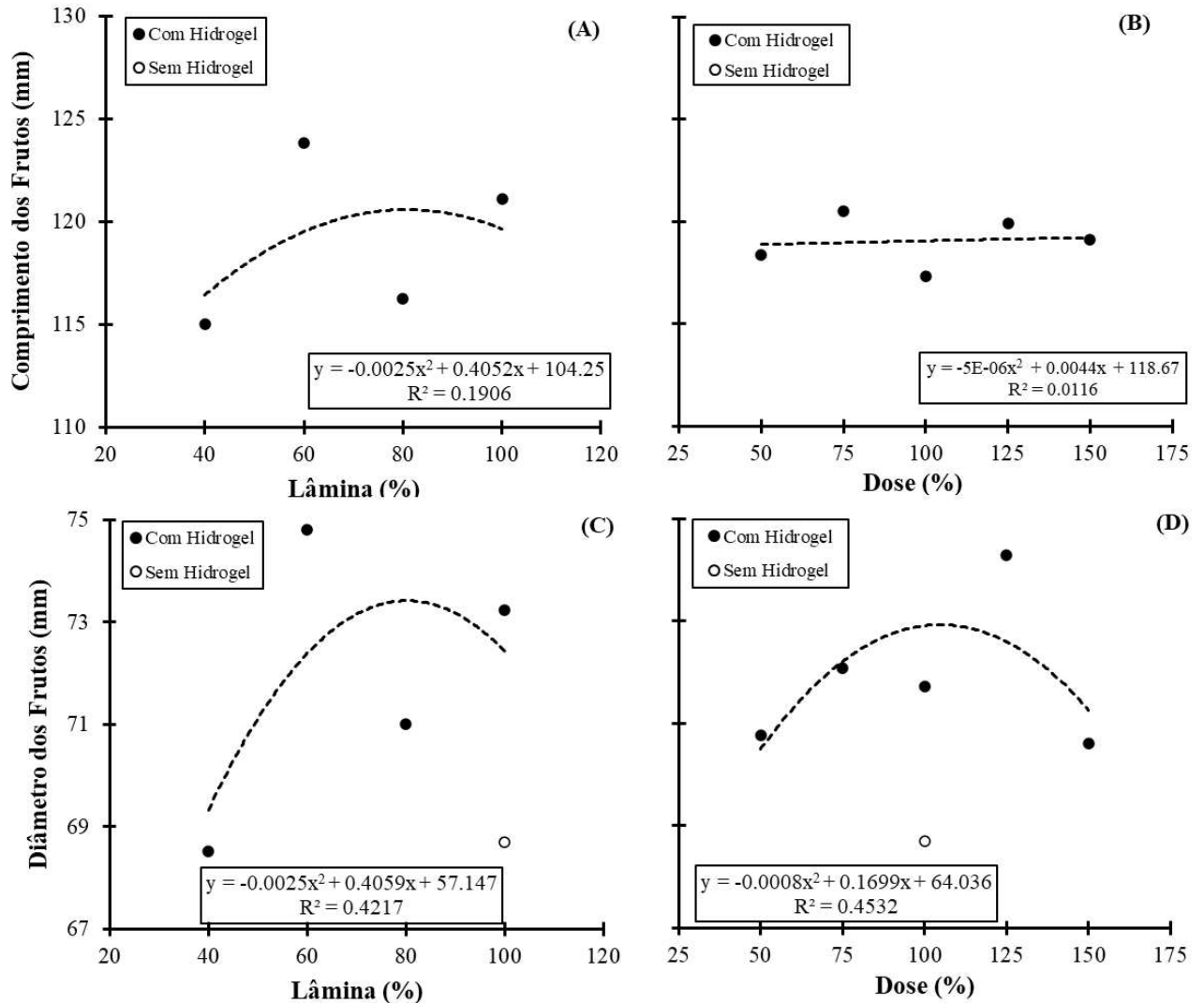
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Apenas a variável comprimento de frutos (CF) associada aos tratamentos de lâminas de irrigação (Figura 19A) obteve diferença significativa estatística ($p < 0,01$). Resultados análogos foram observados entre CF e DF (Figura 19A e 19C), nos que se refere à lâmina de irrigação mais propícia, considerando que as maiores médias encontradas, respectivamente, foram de 120,6 mm de CF com reposição de 80,6% da ETc, e 73,4 mm de DF com 80,2% da ETc. Nessas condições, a aeração radicular tende a melhorar, reduzindo problemas de hipoxia e favorecendo a partição de assimilados para estruturas reprodutivas. Com isso, há maior fixação e enchimento dos frutos. Por outro lado, o excesso de água, principalmente quando associado ao uso de hidrogel, pode manter o solo excessivamente úmido, diminuindo a absorção de cálcio e a eficiência fotossintética em parte do ciclo, o que acaba penalizando o tamanho final dos frutos (Taiz *et al.*, 2017)

No caso do Protamin GR (Figura 19B), observou-se que o comprimento dos frutos foi pouco responsivo ao aumento da dose, indicando que a variável não depende fortemente das doses de insumo nitrogenado, podendo se observar no gráfico uma tendência linear, com maior média na dose de 150% da ETc (124mm). Já o diâmetro mostrou maior sensibilidade, onde a faixa ótima, de acordo com a linha de tendência, situou-se em 104,7% da recomendação (72 mm). Esse comportamento sugere que o nitrogênio orgânico do Protamin GR exerce também efeito bioestimulante, melhorando a eficiência fisiológica até certo limite. Roupheal e Colla (2020) observaram que N orgânico aplicado em excesso (150%), ocorreu direcionamento do nutriente para a produção de biomassa vegetativa, comprometendo a relação fonte-dreno e

reduzindo o calibre dos frutos.

Figura 19 – Comprimento dos frutos (A–B) e diâmetro dos frutos (C–D) dos de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.



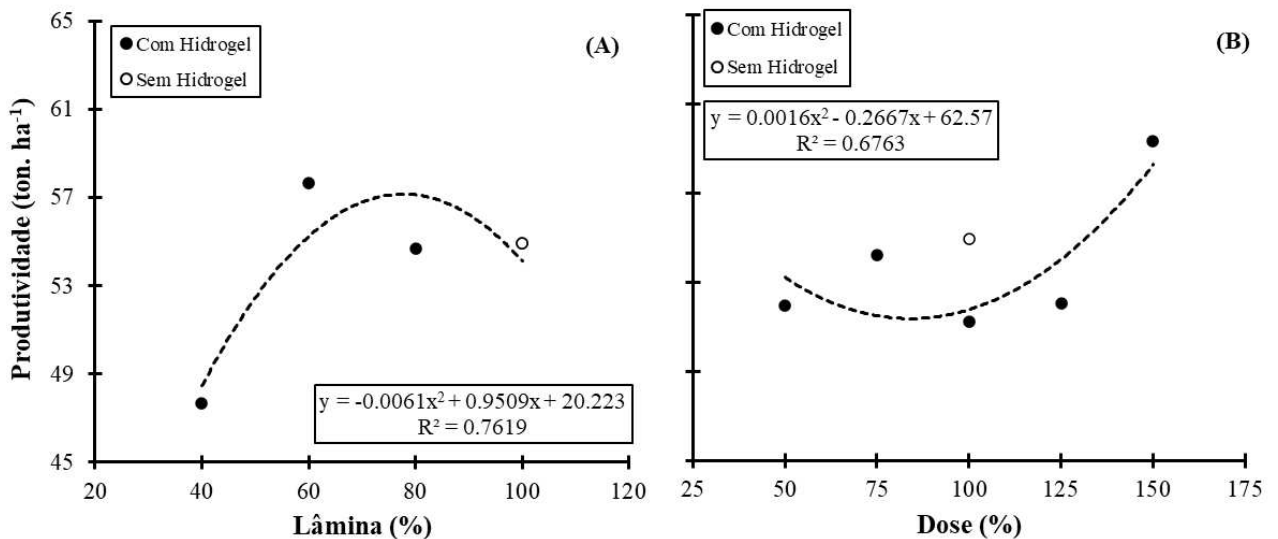
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados mostram que a produtividade máxima (55,1 ton. ha⁻¹) foi obtida com lâmina de 78% da ETc (Figura 20A). De acordo com Marouelli e Silva (2011), em cultivo protegido, déficits hídricos moderados podem melhorar a aeração radicular e reduzir a hipoxia. Esse tipo de manejo contribui para uso mais eficiente dos assimilados em direção às estruturas reprodutivas que resulta em maior produção de frutos (Carrijo et al., 2007). Por outro lado, quando a irrigação se aproxima ou ultrapassa a reposição de 100% da ETc, sobretudo na presença de hidrogel, ocorre maior risco de saturação do solo, o que restringe a absorção de

cálcio e compromete a eficiência fotossintética, fatores apontados por Taiz *et al.* (2017) e Marschner (2012), como determinantes para o enchimento e a qualidade dos frutos.

No caso do nitrogênio orgânico (Protamin GR), a resposta produtiva apresentou formato em “U” (Figura 20B) expressando produção mínima em dose de 84,1% (51,4 ton. ha⁻¹). Quando aplicadas doses abaixo de 100%, houve queda no desempenho, provavelmente pela menor área foliar ativa e pela limitação da capacidade fonte, conforme descrito por Marschner (2012). Por outro lado, doses acima da recomendação (até 125%) resultaram em ganhos produtivos. Roupael e Colla (2020) atribuem esse efeito ao carácter bioestimulante do hidrolisado proteico, que pode melhorar a assimilação de nutrientes e a eficiência fisiológica, resultando em melhores resultados de produtividade no geral.

Figura 20 - Produtividade de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus) aos 123 DAT, em função das lâminas de irrigação (A) e das doses de Protamin GR (B), contrastando tratamentos com e sem hidrogel, em ambiente protegido, São Benedito–CE, 2024/2025.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.4 Variáveis Fisiológicas

Na análise da variância dos parâmetros fisiológicos (Tabela 5), observou-se que apenas as doses de Protamin GR exerceram efeito significativo sobre o potencial hídrico foliar (Ψ_F), enquanto a condutância estomática (gs), a taxa fotossintética (A) e a transpiração (E) não apresentaram diferenças estatísticas para os fatores lâminas de irrigação e doses de adubação testados. Esse resultado sugere que o fornecimento de nitrogênio orgânico atuou de forma direta no status hídrico das plantas, possivelmente pela melhoria da assimilação de N e pelo estímulo ao crescimento radicular, o que favorece a absorção de água no solo (Roupael e Colla, 2020).

Por outro lado, a ausência de resposta em gs, A e E pode estar relacionada à alta variabilidade experimental, sobretudo em gs, cujos coeficientes de variação ultrapassaram 100%, dificultando a detecção de efeitos consistentes. É importante destacar, entretanto, que a estabilidade de A e E entre os tratamentos indica uma resiliência fisiológica do pimentão em ambiente protegido, mantendo a atividade fotossintética e o balanço hídrico mesmo diante de diferentes lâminas de irrigação (Taiz *et al.*, 2017; Marschner, 2012).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância (quadrados médios) para potencial hídrico foliar (ΨF , MPa), condutância estomática (gs, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa fotossintética (A, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e transpiração (E, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de pimentão (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), em função de lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, em ambiente protegido. São Benedito – CE, 2024/2025.

| FV | GL | QUADRADOS MÉDIOS | | | |
|-----------|----|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | | ΨF | gs | A | E |
| Lâmina | 3 | 13,92 ^{ns} | 0,808 ^{ns} | 47,85 ^{ns} | 1,59 ^{ns} |
| Bloco | 3 | 3,19 | 1,419 | 33,93 | 9,55 |
| Erro (1) | 9 | 6,92 | 0,428 | 22,28 | 0,72 |
| Dose | 4 | 7,71* | 0,489 ^{ns} | 9,91 ^{ns} | 0,73 ^{ns} |
| Interação | 12 | 3,78 ^{ns} | 0,479 ^{ns} | 17,73 ^{ns} | 0,72 ^{ns} |
| Erro 2 | 48 | 2,91 | 0,479 | 26,72 | 0,72 |
| CV 1 (%) | | 62,69 | 109,41 | 19,41 | 18,07 |
| CV 2 (%) | | 40,65 | 115,66 | 21,25 | 18,08 |

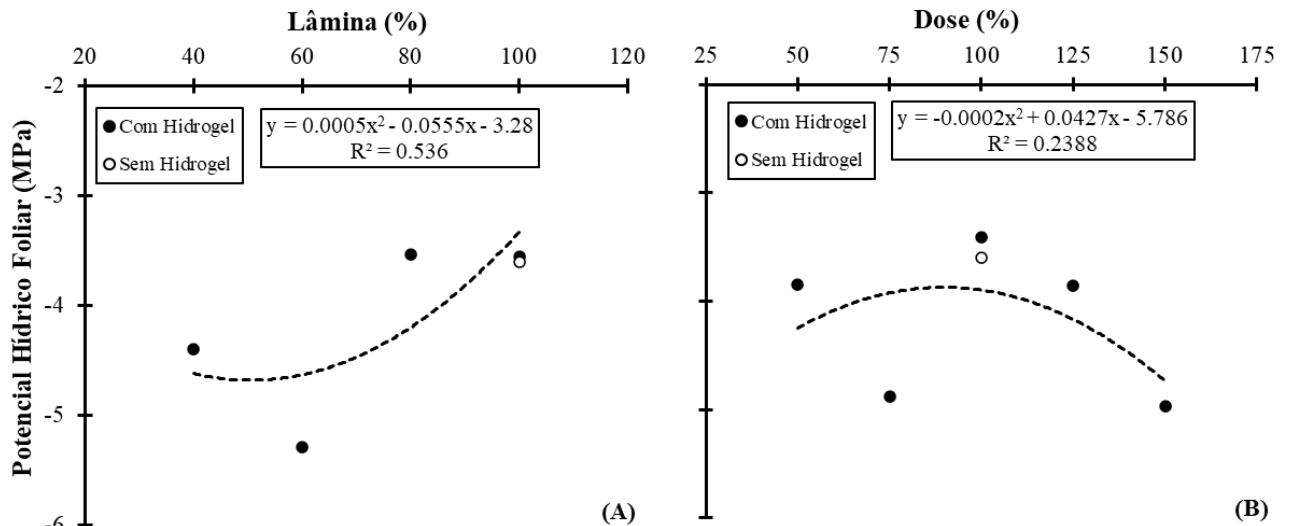
FV = Fonte de variação; GL = graus de liberdade; CV(1) e CV(2) = coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente; ns = não significativo; * = significativo a 5% ($p < 0,05$).

Os gráficos (Figura 21A e 21B) mostram que o potencial hídrico foliar (ΨF) apresentou maiores variações de médias no manejo hídrico em comparação ao manejo de doses de insumo Protamin GR. No gráfico de lâminas (Figura 21A) é possível observar que lâminas acima de 50% apresentaram queda do ΨF , o que indica que a irrigação plena pode ter mantido o solo úmido por tempo excessivo. Esse excesso de água provavelmente reduziu a oxigenação da raiz, afetando o equilíbrio hídrico da planta, algo já relatado por Marouelli e Silva (2011) e Marschner (2012). Por outro lado, déficit hídrico moderado, parece ter favorecido condições mais equilibradas, possivelmente por possibilitar maior aeração radicular e menor risco de hipóxia, onde a maior média observada foi para a lâmina de 50,5% (4,7MPa).

Partindo para o gráfico de doses (Figura 21B), o Protamin GR não mostrou efeito claro sobre o ΨF . O modelo ajustado explica pouco, mas ainda assim se observa o ponto mínimo em 89,8% (3,9MPa). Esse comportamento pode estar ligado ao efeito bioestimulante do hidrolisado proteico, que pode estimular o crescimento de raízes e melhorar a absorção de água

(Rouphael e Colla, 2020)

Figura 21 - Potencial hídrico foliar (Ψ_F , MPa) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) da dose de adubo orgânico Protamin GR (% da recomendação), em cultivo de pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), com e sem uso de hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.

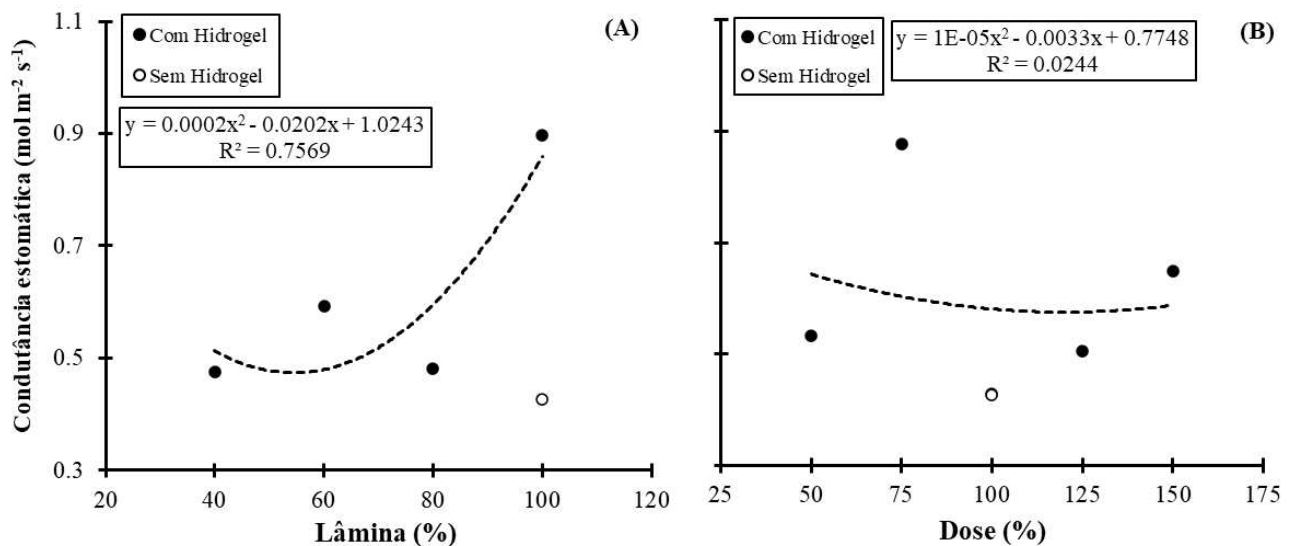


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observando o gráfico da condutância estomática (gs) em função das lâminas de irrigação (Figura 22A), é possível constatar que a condutância estomática respondeu de forma positiva ao aumento das lâminas, com ajuste quadrático de bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,75$). O menor valor foi registrado a 54,4% da lâmina com hidrogel, e maiores lâminas apresentaram maiores médias, o que indica que em condições de maior disponibilidade hídrica os estômatos se mantêm mais abertos, favorecendo as trocas gasosas. Essa resposta é coerente com o papel da água na manutenção da turgescência e no funcionamento estomático (Taiz *et al.*, 2017). Já em menores lâminas os valores das médias de gs foram menores, sugerindo uma tendência de fechamento estomático como defesa da planta para evitar perdas excessivas por transpiração, o que está de acordo com relatos de Rodríguez-Domínguez *et al.* (2022). O tratamento que não recebeu hidrogel apresentou a menor média de gs.

No gráfico de doses (Figura 22B), por outro lado, a resposta ao Protamin GR foi pouco expressiva. A gs manteve-se praticamente estável, de acordo com a linha de tendência, sem diferenças consistentes entre as doses testadas. Isso indica que o nitrogênio orgânico pode não ter exercido influência direta sobre a abertura estomática.

Figura 22 - Condutância estomática ($\text{gs, mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em função de (A) lâminas de irrigação e (B) e de dose de adubo orgânico Protamin GR, em cultivo de pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.

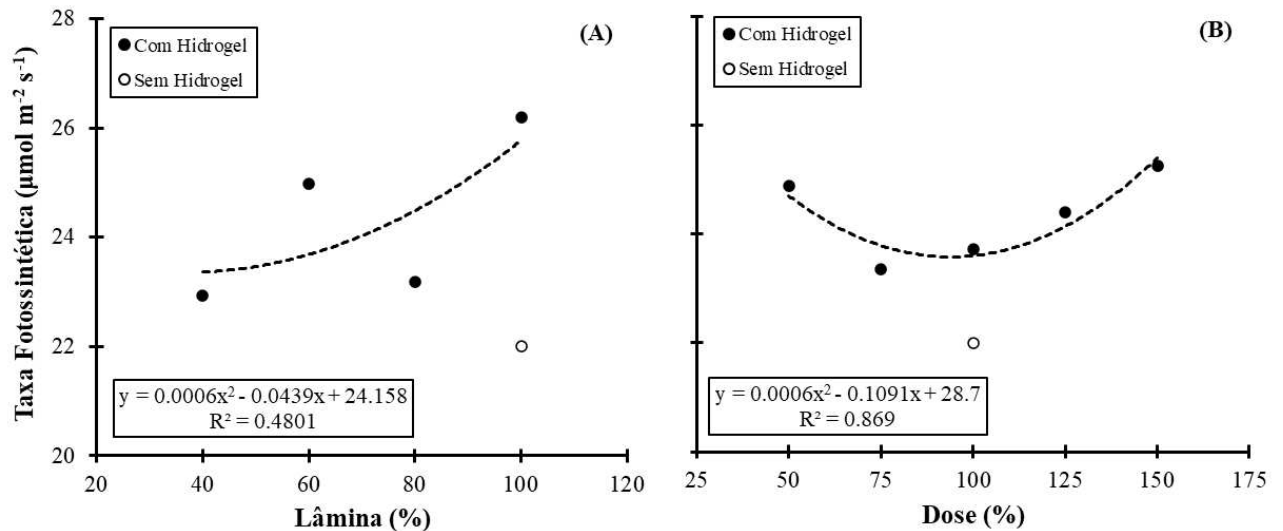


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na análise da Figura 23A, a taxa fotossintética aumentou com as lâminas mais elevadas, embora o ajuste do modelo tenha apresentado explicação moderada ($R^2 = 0,48$). Essa tendência mostra que a irrigação plena contribuiu para maior atividade fotossintética, reforçando o papel da água na manutenção da turgescência e na difusão de CO_2 para o mesófilo (TAIZ *et al.*, 2017; Marschner, 2012). A diferença entre plantas com e sem hidrogel também é visível, sugerindo que a retenção de umidade no solo prolongada por esse insumo favoreceu a estabilidade do processo fotossintético. Em contrapartida, os déficits hídricos mais acentuados limitaram o desempenho, possivelmente pela redução da condutância estomática e da assimilação líquida de carbono, como já observado em trabalhos de Rodríguez-Domínguez *et al.* (2022). O Ponto mínimo observado foi referente à lâmina de 36,6%, com valor de taxa fotossintética de $23,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Quando se observa a Figura 23B, o comportamento é ainda mais claro. Houve ajuste quadrático de alta precisão ($R^2 = 0,87$), com ponto de mínimo em 93,9% da dose recomendada de Protamin GR ($23,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e incrementos na fotossíntese em doses acima desse valor. Esse resultado indica que o nitrogênio orgânico do Protamin GR, além de fornecer o nutriente, pode exercer efeito bioestimulante, promovendo maior eficiência enzimática e atividade fotossintética (Rouphael e Colla, 2020).

Figura 23 - Taxa fotossintética líquida (A, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) da dose de adubo orgânico Protamin GR, em cultivo de pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.

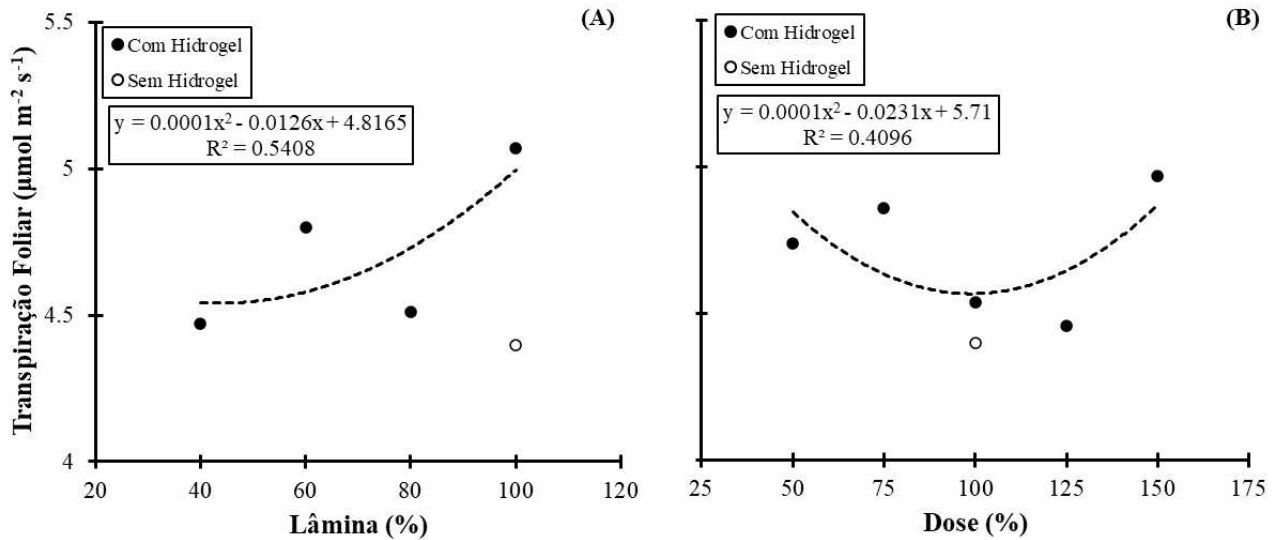


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O comportamento da transpiração diante das lâminas de irrigação (Figura 24A) mostrou tendência de aumento com maiores volumes aplicados, com ajuste quadrático moderado ($R^2 = 0,54$). Esse resultado indica que o fornecimento de água acima de 43,7% (4,54 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) da lâmina de irrigação (% ETC) estimulou maior perda de vapor, reflexo do aumento na abertura estomática já observado nos dados de gs. Além disso, a presença do hidrogel contribuiu para manter a umidade disponível na rizosfera por mais tempo, o que ajudou a sustentar valores mais elevados de transpiração. Essa relação direta entre disponibilidade hídrica e E é coerente com a fisiologia do pimentão, já que a transpiração está ligada ao resfriamento foliar e ao transporte de nutrientes (Taiz *et al.*, 2017; Marschner, 2012).

Por outro lado, quando se avaliam as doses de Protamin GR (Figura 24B), a resposta foi menos consistente, com ajuste do modelo de menor explicação ($R^2 = 0,40$). Ainda assim, nota-se leve comportamento curvilíneo, com valores mais baixos em torno da dose recomendada e discreto aumento em doses superiores, apresentando ponto mínimo em 98,9% da dose (4,57 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Esse efeito pode estar associado ao papel do nitrogênio na expansão foliar e na atividade metabólica, fatores que indiretamente podem influenciar a transpiração. Estudos como os de Roupael e Colla (2020) e Ambrosini *et al.* (2021) destacam que hidrolisados proteicos podem estimular a fisiologia da planta, mas os efeitos tendem a ser mais evidentes em produtividade e qualidade do que em parâmetros de perda de água.

Figura 24 - Taxa de transpiração (E , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em função das (A) lâminas de irrigação e (B) e da dose de adubo orgânico Protamin GR, em cultivo de pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), com e sem hidrogel, em ambiente protegido. São Benedito–CE, 2024/2025.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 6 mostra que não houve diferença estatística significativa sobre o ΔT nos horários de 09h, 14h, e 16h para nenhum dos fatores testados, ocorrendo o mesmo na interação entre eles. Por outro lado, foi possível verificar que apenas para o fator de doses de adubação, foi observado efeito significativo ($p < 0,05$). Esse resultado sugere que no horário de 12h ocorrem diferenças mais claras relacionadas ao índice de estresse ΔT em relação às doses de protamim GR aplicadas. Os valores de ΔT se mantiveram estáveis estatisticamente possivelmente pelo uso de hidrogel em todos os tratamentos e também pelo ambiente protegido, que auxilia na redução da demanda hídrica.

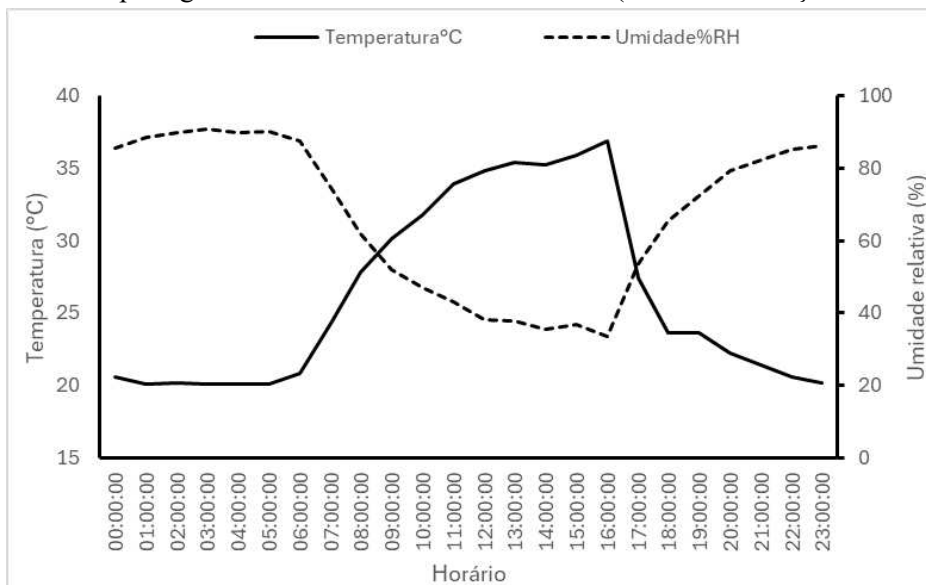
Tabela 6 - Resumo da análise de variância para a diferença de temperatura entre o dossel e o ar (ΔT) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliadas nos horários de 09h, 12h, 14h e 16h.

| FV | GL | QUADRADOS MÉDIOS | | | |
|-----------|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | ΔT | | | |
| | | 09h | 12h | 14h | 16h |
| Lâmina | 3 | 1,938 ^{ns} | 3,747 ^{ns} | 2,392 ^{ns} | 0,261 ^{ns} |
| Bloco | 3 | 4,581 | 2,538 | 4,257 | 1,074 |
| Erro (1) | 9 | 1,953 | 1,568 | 3,208 | 0,810 |
| Dose | 4 | 1,448 ^{ns} | 3,387* | 6,966 ^{ns} | 0,286 ^{ns} |
| Interação | 12 | 0,689 ^{ns} | 1,011 ^{ns} | 2,036 ^{ns} | 0,505 ^{ns} |
| Erro 2 | 48 | 1,533 | 1,236 | 2,718 | 0,789 |
| CV 1 (%) | | -49,01 | -40,59 | -42 | -16,64 |
| CV 2 (%) | | -43,43 | -36,03 | -38,65 | -16,51 |

FV = Fonte de variação; GL = graus de liberdade; CV(1) e CV(2) = coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente; ns = não significativo; * = significativo a 5% ($p < 0,05$).

O gráfico abaixo (Figura 25) foi elaborado com a finalidade de ser correlacionado com os dados de ΔT e CWSI, pois a temperatura do ar ambiente influencia diretamente nestas variáveis. Foi observado que a temperatura mínima obtida ocorreu pela madrugada, com valor igual a 20,1 °C, enquanto a máxima foi observada pela parte da tarde, sendo igual a 36,9 °C, às 16h, correspondendo a um dos horários de monitoramento termográfico. Nos demais horários estabelecidos para avaliação térmica, sendo às 09, 12h e 14h, as temperaturas observadas na área experimental foram em média 30,1 °C, 34,8 °C e 35,2°C, respectivamente.

Figura 25 - Variação diária da temperatura do ar (°C) e da umidade relativa do ar (%) registrada no interior do ambiente protegido no dia 13 de dezembro de 2024 (data das avaliações de ΔT e CWSI).



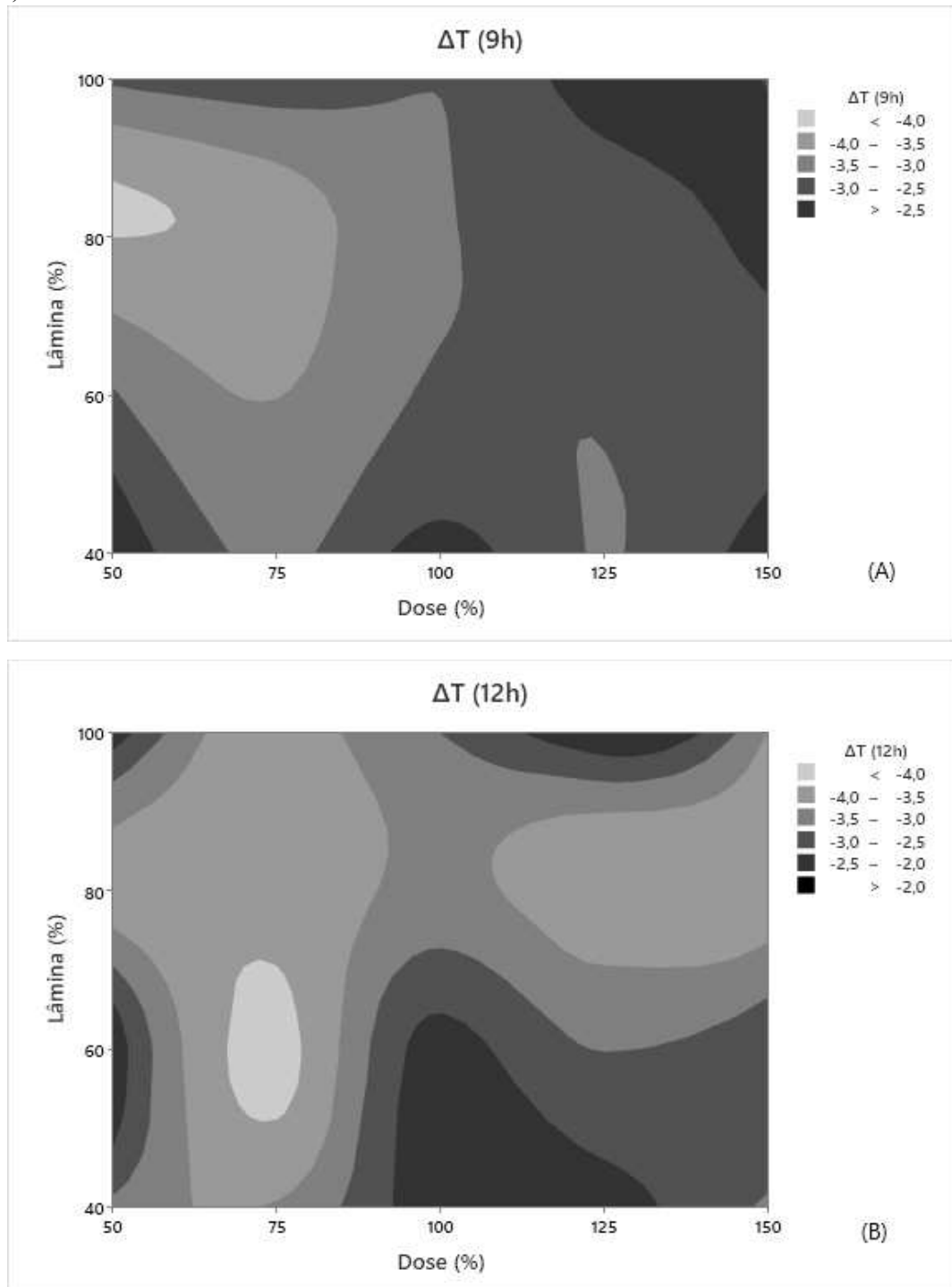
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os valores de ΔT observados às 9h (figura 26A) apresentaram tendências a valores mais negativos (menor estresse) quando as plantas foram submetidas à associação de lâminas de irrigação entre 60% e 100%, e doses de Protamim GR entre 50% e 75% da dose recomendada. Essa resposta pode ter sido causada em função da baixa dose de N, ocasionando que entre as doses assinaladas, as plantas não estavam sob estresse térmico em função da adubação, tornando possível observar a diferença através da avaliação de ΔT .

Já no horário de 12h (figura 26B) valores de ΔT menores que -4,0 foram observados com a associação de lâmina de 60% da ETC e doses de 75% de Protamim GR, sugerindo que mesmo sob alta incidência solar, essa combinação propiciou estado hídrico vantajoso para as plantas, expressado no índice ΔT . Esse resultado relaciona o estado hídrico ao momento pelo

qual as plantas estão passando por conta da influência do ambiente, induzindo transpiração adequada através do resfriamento, consequentemente melhor desenvolvimento das plantas.

Figura 26 - Mapas de contorno da diferença de temperatura entre o dossel e o ar (ΔT) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 9h (A) e 12h (B).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

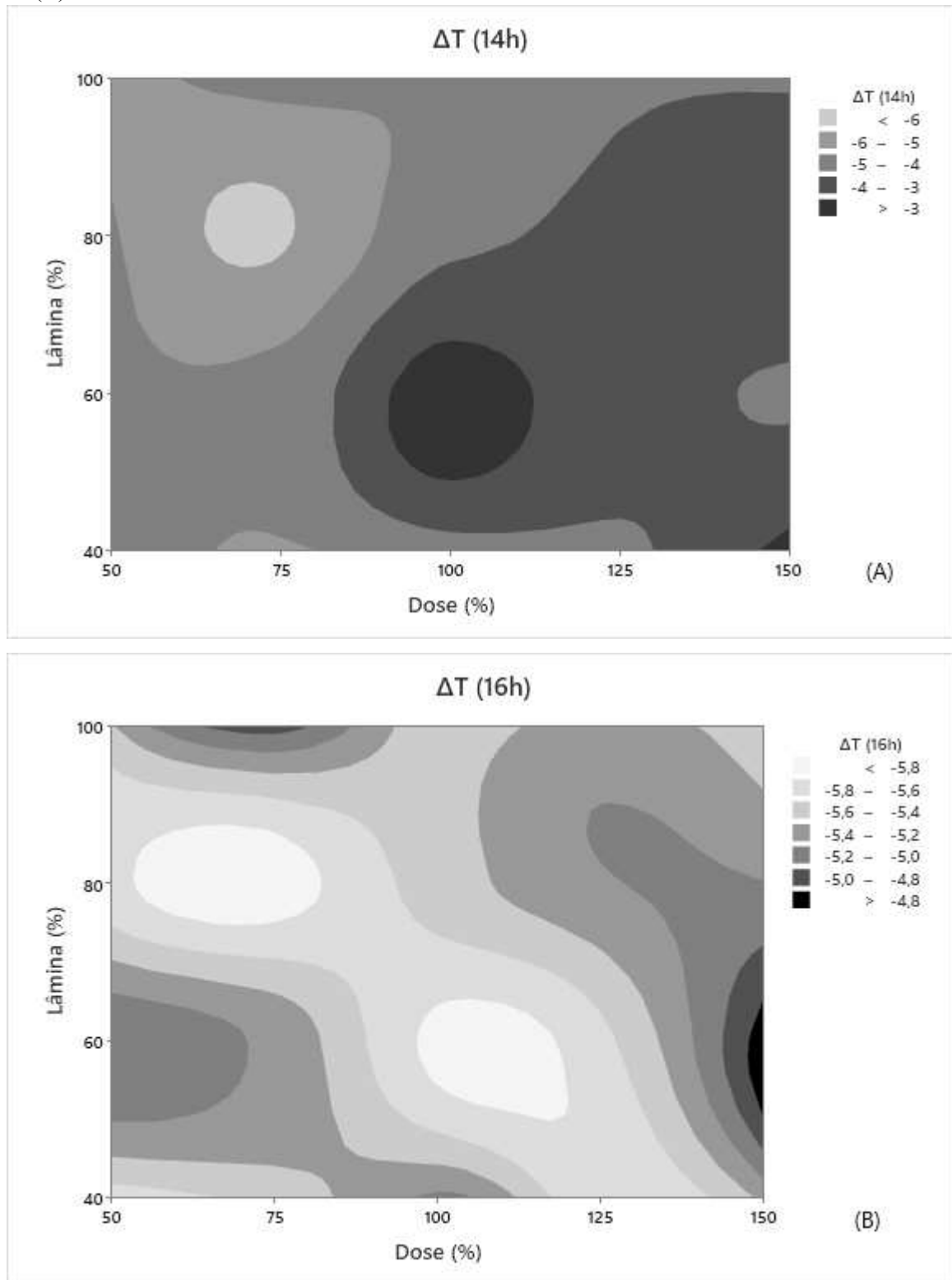
No horário das 14h (figura 27A) valores inferiores a -6,0 foram observados quando houve associação de 80% de ETc e 75% da dose de Protamim GR recomendada, reforçando o achado no gráfico da 09h (figura 26A). Essa interação resultou em maiores índices de estresse hídrico de acordo com o ΔT . Ainda no gráfico das 14h, é possível observar também que a associação de 60% da ETc e 100% da dose recomendada de Protamim GR resultaram em índices de estresse um pouco menores (> -3), mas ainda estressadas, de acordo com o conceito do índice de estresse ΔT .

Às 16h (figura 27B) a interação dos fatores de 80% da ETc e 75% da dose de Protamim GR recomendada, e 60% da ETc associada a doses de 100% a 125% do recomendado de Protamim GR apresentaram valores mais negativos ($< -5,8$), resultando em maiores índices de estresse. Nesse mesmo horário, no geral, as plantas apresentaram maiores índices de estresse relacionados ao ΔT , possivelmente pelo acúmulo de temperatura ocorrido dentro do ambiente protegido, como mostra o gráfico de temperaturas, onde a maior temperatura foi registrada no horário das 16h (36,9°C).

No trabalho de Saraiva *et al.* (2014), os autores apresentaram uma interpretação inversa do conceito da representação empírica do índice ΔT . Os autores, Saraiva *et al.* (2014), comentaram que valores negativos de ΔT são resultado de perda de temperatura em relação ao ar, sendo associado ao estresse hídrico no sentido da deficiência, enquanto valores positivos indicam um desempenho eficiente na dissipação do calor. Tais considerações, quando aplicadas a este trabalho, levariam a uma interpretação não condizente com os fatores testados.

Em avaliações envolvendo a termografia infravermelha, variações de ΔT expressam diretamente a condição hídrica das plantas (estresse ou conforto), inferindo que mudanças significativas na termografia são resultado da capacidade da planta de manter sua temperatura em função do nível de umidade do solo e da disponibilidade de água (Prueger *et al.*, 2019; Pagay e Kidman, 2019). Com os resultados do trabalho, observamos que todos os valores de ΔT foram negativos, podendo estes ser resultado do ambiente protegido de condução (estufa agrícola), onde parte da radiação incidida sobre as plantas, era filtrada pelo material de cobertura, permitindo-nos concluir que mesmo sob lâminas de irrigação caracterizando deficiência hídrica, as plantas podem suportar, conforme resultados observados a partir do ΔT .

Figura 27 - Mapas de contorno da diferença de temperatura entre o dossel e o ar (ΔT) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 14h (A) e 16h (B).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com a Tabela 7 que resume os dados da análise de variância para a

variável Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI), é possível observar resposta significativa apenas em função das doses de adubação, no horário de 12h ($P < 0,05$). Nos demais horários avaliados, em função das lâminas de irrigação e das doses de adubação, o resultado estatístico foi não significativo ($P < 0,05$).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância para o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em plantas de pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L., cv. Taurus), em função das lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados nos horários de 9h, 12h, 14h e 16h, em ambiente protegido.

| FV | GL | QUADRADOS MÉDIOS | | | |
|-----------|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | CWSI | | | |
| | | 09h | 12h | 14h | 16h |
| Lâmina | 3 | 0,026 ^{ns} | 0,054 ^{ns} | 0,026 ^{ns} | 0,002 ^{ns} |
| Bloco | 3 | 0,079 | 0,037 | 0,047 | 0,008 |
| Erro (1) | 9 | 0,032 | 0,023 | 0,035 | 0,006 |
| Dose | 4 | 0,028 ^{ns} | 0,049* | 0,076 ^{ns} | 0,002 ^{ns} |
| Interação | 12 | 0,018 ^{ns} | 0,015 ^{ns} | 0,022 ^{ns} | 0,004 ^{ns} |
| Erro 2 | 48 | 0,028 | 0,018 | 0,030 | 0,006 |
| CV 1 (%) | | 108,02 | 26,29 | 42,94 | 21,94 |
| CV 2 (%) | | 101,10 | 23,34 | 39,52 | 21,77 |

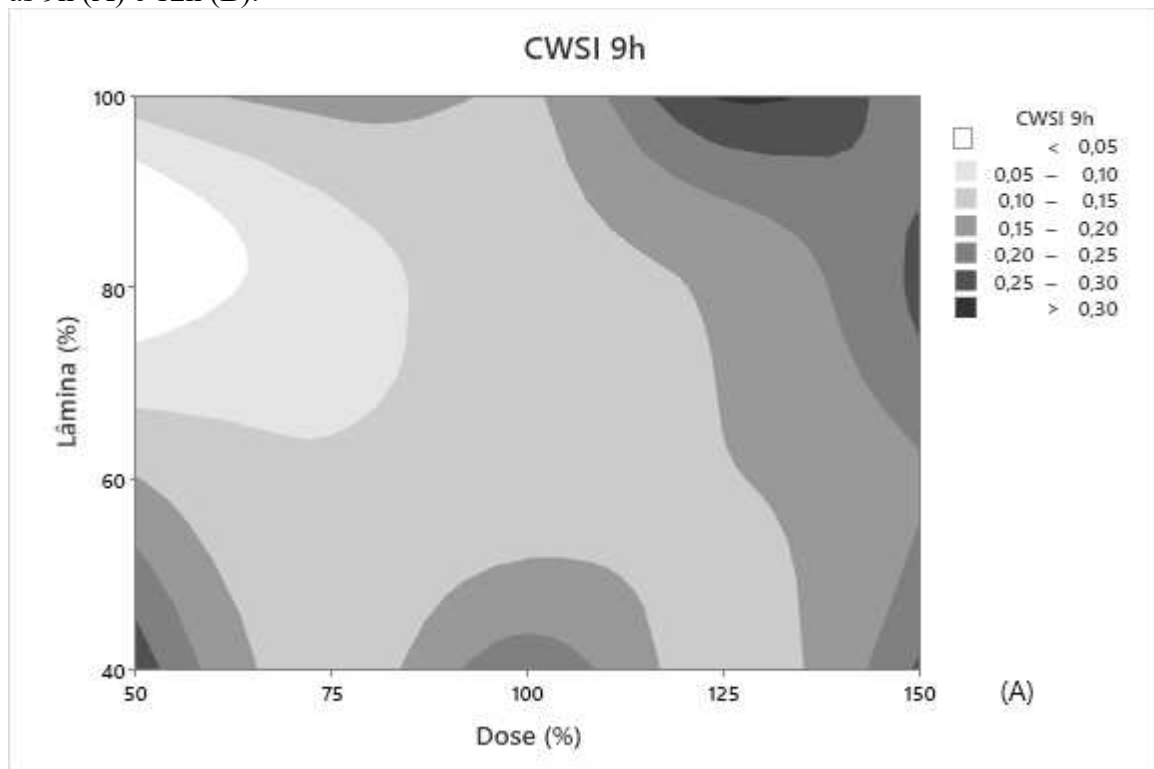
GL = graus de liberdade; CV(1) e CV(2) = coeficientes de variação das parcelas e subparcelas, respectivamente; ns = não significativo; * = significativo a 5% ($p < 0,05$).

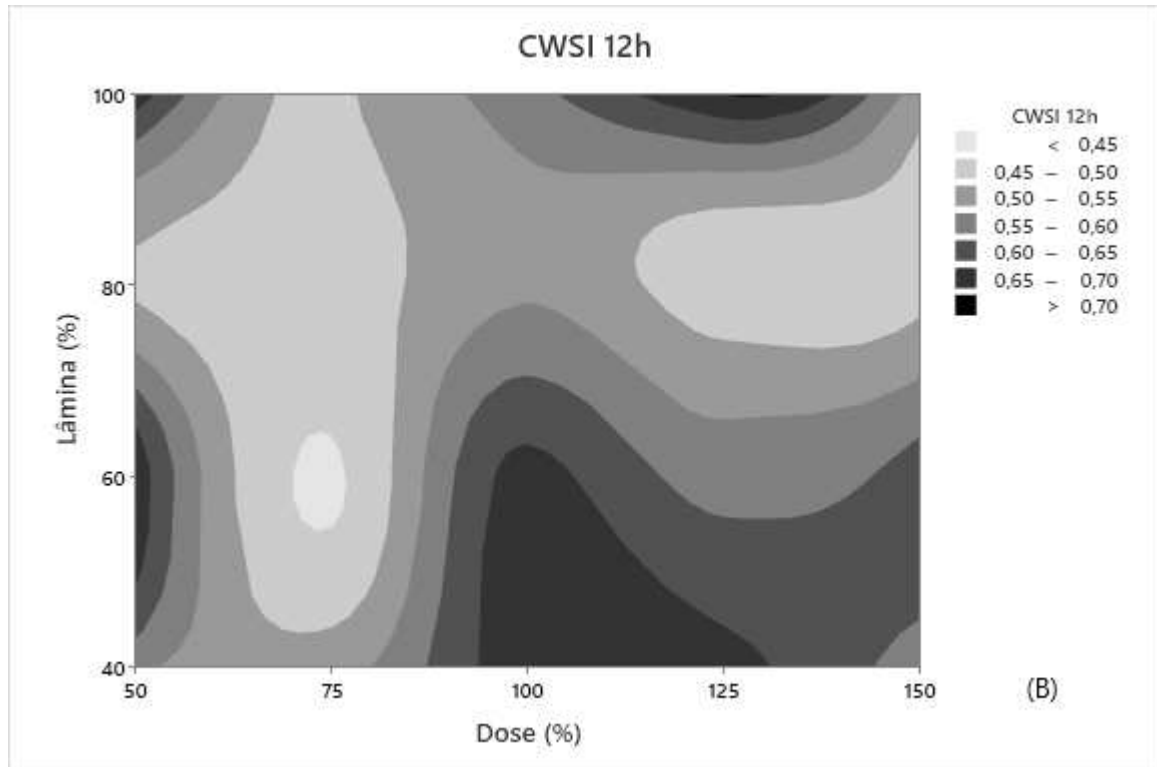
Ao observar o gráfico de superfície referente ao horário das 9h (Figura 28A) é possível inferir que a associação de 60% a 100% de reposição da ETc, e 50% a 75% da dose sugerida de Protamim GR, resultaram em menores índices de estresse (até $< 0,05$), enquanto a associação entre 80% a 100% da lâmina de irrigação e 125% a 150% da dose sugerida de Protamim GR resultaram em maiores índices de CWSI (até $> 0,30$). É importante ressaltar que às 9h foram registrados valores negativos de CWSI, que podem estar relacionados à erros de leitura ou condições climáticas e ambientais que tenham interferido nos processos fisiológicos das plantas. Valores negativos de CWSI não foram constatados em outros horários. Boyaci *et al.* (2024) também obtiveram valores negativos de CWSI para tomates plantados em ambiente protegido em determinados dias do experimento. Valores negativos podem expressar a ausência total de estresse hídrico. Mesmo com as diferenças entre os valores de CWSI entre as associações de tratamento, não foi possível observar níveis de estresse consideráveis às 9h. Hernández-Clemente *et al.* (2019) e Quebrajo *et al.* (2018) também obtiveram valores de CWSI inferiores a 0 e até superiores a 1. Para normalizar os valores menores que 0, foi atribuído o

valor de 0 para esses valores negativos, assim como sugerido por Paulo (2021).

Nas avaliações realizadas às 12h (Figura 28B) podemos observar que lâminas entre 60% e 80% da ETc associadas à dose de 75% do recomendado de Protamim GR apresentaram menores índices de estresse (até 0,50), mesmo assim, esses valores de índice já indicam valores moderados de estresse. Já as associações entre 40% e 60% da ETc e 100% e 125% da dose de insumo recomendada, apresentam valores elevados de estresse (até > 0,70), que já expressam estresse severo. Esses índices de estresse podem estar associados à baixa disponibilidade de água e à elevada dose de insumo Protamim GR, podendo estar retendo ainda mais a água no solo e dificultando a absorção pelas raízes.

Figura 28 - Mapas de contorno do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamim GR, avaliados às 9h (A) e 12h (B).



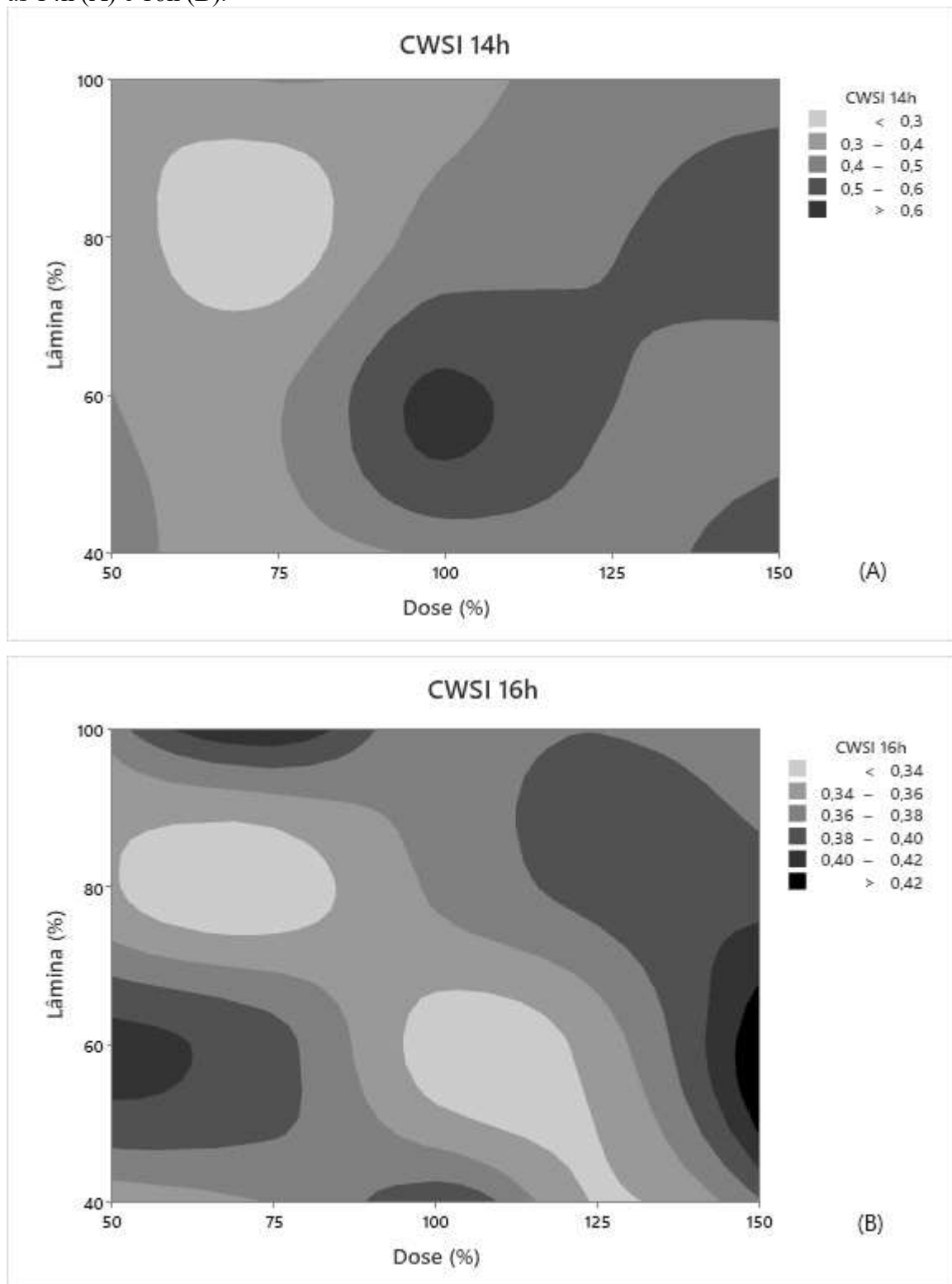


Fonte: Elaborado pelo Autor.

As 14h (Figura 29A), podemos observar que os valores gerais de estresse diminuíram, variando 0,3 e 0,6, mas ainda existe associação de tratamentos que expressam elevado estresse, como a associação entre 60% da lâmina de irrigação e 100% da dose recomendada do insumo, que já era observado desde a avaliação das 12h. Os menores valores de estresse foram observados na associação entre 80% da ETc e 75% da dose de Protamim GR recomendada, ainda refletindo os achados das 9h e 12h, e que também foram achados às 16h (< 0,34) (Figura 29B) que expressam valores de CWSI moderados.

Às 16h (Figura 29B) os valores do índice CWSI, no geral, apresentaram baixa menores que os horários de 14h e 16h, com valores entre 0,34 e 0,43. Esses valores expressam que nenhum tratamento está sofrendo de estresse severo, até as associações que apresenta maiores CWSI (60% da ETc e 15% da dose de Protamim GR recomendada), apenas de leve a moderado.

Figura 29 - Mapas de contorno do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) em plantas de pimentão submetidas a diferentes lâminas de irrigação e doses de Protamin GR, avaliados às 14h (A) e 16h (B).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, há evidências de que o manejo de irrigação e de adubação orgânica, através do Protamim GR, influenciam diretamente no desempenho produtivo e fisiológico do pimentão vermelho TAURUS.

A lâmina de 80% da ETc combinada a doses intermediárias de Protamin GR (75% a 100% da recomendação), apresentaram melhores desempenhos nos resultados gerais, proporcionando melhores condições de crescimento, maior produtividade e índices de estresse hídrico mais baixos, indicando maior eficiência fisiológica, levando à conclusão de que com o manejo adequado, e possivelmente pelo uso de hidrogel, menores lâminas podem auxiliar em produções satisfatórias, que resultam em menor desperdício do uso de água e maior aproveitamento do recursos.

Os efeitos do uso de hidrogel foram mais visíveis em lâminas deficitárias. Por fim, o trabalho reforça que a utilização de práticas que reduzam o uso de água no cultivo protegido de hortaliças pode auxiliar na redução do desperdício e se tornar uma solução para locais com baixa disponibilidade de recursos hídricos, como regiões de clima semiárido.

7 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

As condições climáticas durante o estudo foram adversas para o pimentão, pois os altos picos de temperatura e a elevada umidade relativa podem ter ocultado os resultados de estresse e desempenho fisiológico observados na planta.

O acúmulo de biomassa responde de forma significativa aos tratamentos experimentados. As condições mais favoráveis para a produção de biomassa aérea (MFPA e MSPA) foram observadas quando houve um déficit hídrico moderado (aproximadamente 75% da ETc) e a aplicação de doses de Protamin GR um pouco superiores às recomendadas (cerca de 140-150%). Isso indica que a limitação de oxigênio causada pelo excesso de água foi mais restritiva do que a falta de água em níveis moderados.

A irrigação excessiva (plena) prejudica o Ψ_F por causa da má aeração das raízes, ao passo que a falta moderada de água e o uso de Protamin GR incentivam a atividade fisiológica. Em vez de afetar diretamente a abertura ou fechamento estomático, o Protamin GR funciona principalmente como um bioestimulante que favorece o desenvolvimento das raízes e aumenta a taxa de fotossíntese.

As combinações que resultam em maior estresse hídrico (CWSI mais alto) costumam ser aquelas com pouca disponibilidade de água e altas doses do insumo.

Para otimizar a fisiologia da cultura, as condições mais favoráveis foram observadas com um déficit hídrico moderado (cerca de 50% - 80% da reposição da ETc) e doses apropriadas de Protamin GR (aproximadamente 75% - 100% da dose sugerida), refletindo o equilíbrio entre aeração das raízes e disponibilidade de nutrientes/água.

REFERÊNCIAS

- AGBA, O. A.; OKRI, A. P. Green pepper (*Capsicum annuum* L.) performance as influenced by poultry manure treatment. **IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science**, [s. l], v. 16, n. 1, p. 25–30, 2023.
- AHMED, E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. **Journal of Advanced Research**, [s. l] v. 6, n. 2, p. 105-121, 2015.
- ALADENOLA, O.; MADRAMOOTOO, C. Response of greenhouse-grown bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to variable irrigation. **Canadian Journal of Plant Science**, [s. l] v. 94, n. 2, p. 303-310, 2014.
- ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, Ê. F. F.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; LIMA, G. S. Necessidade hídrica e coeficiente de cultivo do pimentão fertirrigado. **Irriga**, [s. l] v. 17, n. 4, p. 481-493, 2012.
- AMBROSINI, S.; SEGA, D.; SANTI, C.; ZAMBONI, A.; VARANINI, Z.; PANDOLFINI, T. Evaluation of the potential use of a collagen-based protein hydrolysate as a plant multi-stress protectant. **Frontiers in plant science**, [s. l] v. 12, p. 600623, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. 75 p.
- ARAGÃO, M. F. **Monitoramento do déficit hídrico por imagens térmicas em meloeiro irrigado com e sem hidrogel agrícola**. 2025. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2025.
- ÁVILA-POZO, P.; PARRADO, J.; MARTIN-PRESAS, L.; ORTS, J. M.; TEJADA, M. Application of a protein hydrolysate-based biostimulant obtained from slaughterhouse sludge on pepper crops. **Horticulturae**, [s. l] v. 9, n. 10, 1147, 2023.
- BARRETO, E. E. S.; ALVES, A. M.; OLIVEIRA, P. A. M.; BARRETO, L. G. A.; ARAÚJO, L. M. S. **Panorama da produção agrícola em ambiente protegido na Serra da Ibiapaba**. Fortaleza: Instituto Agropolos do Ceará, 2022.
- BOYACI, S., KOCIEĆKA, J., ATILGAN, A., LIBERACKI, D., ROLBIECKI, R., SALTUK, B., STACHOWSKI, P. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for high tunnel greenhouse tomatoes under different irrigation levels. **Atmosphere**, [s. l] v. 15, n. 2, 205, 2024.
- BOYER, J. S. **Measuring the Water Status of Plants and Soils**. New York: Academic Press, 1995. (Cap. 2: Pressure Chamber).
- BRAGA, M. B.; MAROUELLI, W. A. **Produção integrada de pimentão – PIP: Irrigação e fertirrigação na cultura do pimentão**. Documentos, 152. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2017.

BRASIL. Decreto n.º 4.954, de 14 jan. 2004. Regulamenta a Lei n.º 6.894/1980. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2004.

BRASIL. Lei n.º 12.890, de 10 dez. 2013. Altera a Lei n.º 6.894/1980 e inclui remineralizadores. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2013.

BRASIL. Lei n.º 6.894, de 16 dez. 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização de fertilizantes etc. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1980.

CARDOZO, M. T. D., GALBIATTI, J. A., DE SANTANA, M. J., CAETANO, M. C. T., CARRASCHI, S. P., DE NOBILE, F. O. Pimentão (*Capsicum annuum*) fertilizado com composto orgânico e irrigado com diferentes lâminas de irrigação. **Irriga**, [s. l.] v. 21, n. 4, p. 673-684, 2016.

CARMO, M.; MACAGNAN, D.; CARVALHO, A. Progresso da mancha-bacteriana do pimentão. **Horticultura Brasileira**, [s. l.] v. 19, n. 3, p. 342-347, 2001.

CARRIJO, O. A.; SOUZA, R. B.; MAROUELLI, W. A. ANDRADE, R. J. **Fertirrigação de hortaliças**. Circular Técnica 32, Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2004. 13 p.

CARVALHO, V. I. R. D. **Avaliação dos efeitos da aplicação de um polímero hidro retentor na redução de água de irrigação, na produtividade e qualidade em tomate de indústria**. 2025. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica), Escola superior Agrária de Santarém, Instituto Politécnico de Santarém, Santarém – Portugal, 2025.

CASTILLA, N. **Invernaderos de plástico: Tecnología y Manejo**. Madrid: Mundi-Prensa, 2005.

CHAI, Q.; GAN, Y.; ZHAO, C.; XU, H-L.; WAKSOM, R. M.; NIU, Y.; SIDDIQUE, K. H. M. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.] v. 36, n. 1, p. 3, 2016.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, [s. l.] v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.

COLLINS, M. N.; NECHIFOR, M.; TANASĂ, F.; ZĂNOAGĂ, M.; MCLOUGHLIN, A.; STRÓZYK, M. A.; CULEBRAS, M.; TEACĂ, C. A. Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications – a review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.] v.131, p.828–849, 2019.

COSTA, J. M.; ORTUÑO, M. F.; CHAVES, M. M. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. **Journal of Integrative Plant Biology**, [s. l.] v. 49, n. 10, p. 1421-1434, 2012.

COSTA, J. N. *et al.* Thermal behavior and yield of yellow melon subjected to different irrigation strategies in a semiarid region. **ACS Agricultural Science & Technology**, [s. l.] v. 5, n. 5, p. 725-738, 2025.

COSTA, J. N. **Termografia infravermelha no monitoramento do estado hídrico do meloeiro**. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências

Agrárias, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2023.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO, 1994. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DUSI, D. M. **Efeito da adição do polímero hidrorretentor na eficiência da adubação nitrogenada no crescimento de *brachiaria decumbens* cv. Basilisk, em dois diferentes substratos**. 2005. 93 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Engenharia Agrícola), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2005.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Fertilizantes no Brasil: produção e consumo**. Brasília: Embrapa, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Uso de fertilizantes no Brasil: retrospectiva histórica**. Brasília: Embrapa, 2002.

ENGLISH, M. Deficit irrigation. I. Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)**, [s. l] v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019**. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome: FAO, 2019.

FARIA JUNIOR, M.J.A., HORA, R.C. Cultivo Protegido. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., GOTO, R. (orgs.). **Hortalças-fruto**. Maringá: EDUEM, 2018, p. 451-487.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, [s. l] v. 58, p. 147-159, 2007.

FERRARA, A.; LOVELLI, S.; DI TOMMASO, T.; PERNIOLA, M. Flowering, growth and fruit setting in greenhouse bell pepper under water stress. **Journal of Agronomy**, [s. l] v. 10, n. 1, p. 12-19, 2011.

FERREIRA, D. F. **SISVAR**: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [s. l] v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 242 p.

FINATTO, J., ALTMAYER, T., MARTINI, M. C., RODRIGUES, M., BASSO, V., HOEHNE, L. A importância da utilização da adubação orgânica na agricultura. **Revista Destaques Acadêmicos**, [s. l] v. 5, n. 4, 2013.

FLORES-VELÁZQUEZ, J.; MENDOZA-PÉREZ, C.; RUBIÑOS-PANTA, J. E.; RUELAS-ISLAS, J. R. Quality and yield of bell pepper cultivated with two and three stems **Horticulturae**, [s. l] v. 8, n. 12, 1187, 2022.

- FRAZÃO, D. S. **Efeito do hidrogel em diferentes profundidades no cultivo do pepineiro**. 2024, 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará - UFC, 2024.
- GARCÍA-TEJERO, I. F.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; MURIEL-FERNANDÉZ, J. L.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J. A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, [s. l] v. 38, n. 2, p. 106-117, 2011.
- GOTO, R.; ROSSI, F. **Cultivo de pimentão em estufas – Manual N° 095**. Viçosa: CPT, 1997. 66 p.
- HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., HORNERO, A., MOTTUS, M., PEÑUELAS, J., GONZÁLEZ-DUGO, V., JIMÉNEZ, J. C., SUARÉZ, L.; ALONSO, L.; ZARCO-TEJADA, P. J. Early diagnosis of vegetation health from hyperspectral and thermal imagery. **Current Forestry Reports**, [s. l] v. 5, n. 3, p. 169-183, 2019.
- IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA: censo agropecuário 2017**. Resultados definitivos. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: maio 2025.
- INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE. **Perfil municipal de São Benedito**. Fortaleza: IPECE, 2017.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO - IPA. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco (2. aproximação)**. 2. ed. Recife: IPA, 2008. 212 p.
- JONES, H. G.; STOLL, M.; SANTOS, T.; SOUSA, C. D.; CHAVES, M. M.; GRANT, O. M. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. **Journal of Experimental Botany**, [s. l] v. 53, n. 378, p. 2249-2260, 2002.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. 3. ed. Piracicaba: Degaspari, 2010.
- KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: FAO. **Deficit Irrigation Practices**. FAO Water Report 22. Rome: FAO, 2002.
- LIMA, E. M. C.; MATIOLLI, W.; THEBALDI, M. S.; REZENDE, F. C.; FARIA, M. D. Produção de pimentão. **Revista Agrotecnologia**, [s. l] v. 3, n. 1, p. 40-56, 2012.
- LOPES FILHO, P. P. **Utilização de diferentes tanques evaporímetros em ambiente protegido**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- LORENZONI, M. Z., SOUZA, Á. H. C., SERON, C. C., REZENDE, R., HERNANDES, P. E. P., ANDREAN, A. F. B. A. Produção de pimentão fertirrigado sob níveis de nitrogênio e potássio em ambiente protegido. In: IX ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA-EPCC, 2015, Maringá – PR. **Anais eletrônicos**, Maringá: UniCesumar, 2015, p. 4-8.
- MACEDO, O. F. L. **Síntese, caracterização e avaliação de hidrogéis superabsorventes**

copolimerizados empregados na liberação lenta de fertilizantes. 2022. 102 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Sergipe - UFS, São Cristóvão, 2022.

MACHUCA, L. M. R. **Impactos fisiológicos e bioquímicos causados pela deficiência hídrica em pimentão.** 2018, 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Botucatu, 2018.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. **Journal of Experimental Botany**, [s. l] v. 63, n. 13, p. 4671-4712, 2012.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação e fertirrigação na cultura do pimentão. In: SOUSA, V. F.; MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (orgs.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças.** Brasília: Embrapa, 2011. cap. 25, p. 697-714.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Irrigação na cultura do pimentão.** Circular Técnica 101. Brasília: Embrapa, 2012.

MARQUES, P. A. A.; CRIPA, M. A. M.; MARTINEZ, E. H. Hidrogel como substituto da irrigação complementar. **Ciência Rural**, [s. l] v. 43, n. 1, p. 1-7, 2013.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.** 3. ed. London/San Diego: Academic Press/Elsevier, 2012.

MATOS FILHO, H. A.; SILVA, C. A.; BASTOS, A. V. S. Níveis de irrigação associados a doses de hidrogel na cultura do pimentão. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s. l] v. 14, n. 2, p. 3906, 2020.

MENDONÇA, T. G., URBANO, V. R., PERES, J. G., SOUZA, C. F. Hidrogel como alternativa no aumento da capacidade de armazenamento de água no solo. **Water Resources and Irrigation Management**, [s. l] v. 2, n. 2, p. 87-92, 2013.

MENEZES, A. S. **Desempenho produtivo do pimentão sob regimes hídricos e doses de hidrogel na Ibiapaba, Ceará.** 2024, 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Piauí - UFPI, Teresina, 2024.

MENEZES, A. S.; PINHEIRO NETO, L. G.; BASTOS, E. A.; RAMOS, D. E. D. O.; VIANA, T. V. D. A.; SOUSA, C. H. C. D.; FAÇANHA, F. V.; LOPES, F. G. N. Water regimes and hydrogel applied on bell pepper grown in a protected environment. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l] 2024.

MENEZES, A., BASTOS, E. A., NETO, L. G. P., VIANA, T. V. A., BEZERRA, M. A., & FAÇANHA, R. V. Respostas de pimentão híbrido em campo aberto com hidrogel e regimes hídricos. **Scientia Plena**, [s. l] v. 21, n. 2, e020201, 2025.

MÖLLER, M.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; MERON, M.; TSIPRIS, J.; NAOR, A.; OSTROVSKY, V.; SPRINTSIN, M.; COHEN, S. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**, [s. l] v. 58, n. 4, p. 827-838, 2007.

- MORTATE, R. K.; ARAÚJO, M. M.; LIMA, M. W. P.; BINOTTI, F. F. S. Resposta de mudas de pimentão submetidas a reguladores via foliar. **Revista de Ciência e Tecnologia**, [s. l] v. 10, n. 1, p. 57-64, 2018.
- NASCIMENTO, S. D., AGUIAR, E. D., LIMA, G. D. C., NOVAES, L. P., COSTA, P. D. Aspectos gerais da palma forrageira e alternativas de manejo: uma associação do hidrogel agrícola e da adubação foliar. **Nutrition & Food Science/Time**, [s. l] v. 17, p. 8681-8698, 2020.
- NAVROSKI, M. C.; ARAÚJO, M. M.; REININGER, L. R. S.; MUNIZ, M. F. B.; PEREIRA, M. de O. Influência do hidrogel no crescimento e no teor de nutrientes nas mudas de *Eucalyptus dunnii*. **Floresta**, [s. l] Curitiba, v. 45, n. 2, p. 315-328, 2015.
- NEVES, O. S. C.; AVRELLA, E. D.; PAIM, L. P.; FIOR, C. S. Water retention in hydrogel substrates: influence of the material characteristics and the fertilizing level. **Ciência Florestal**, [s. l] Porto Alegre, v. 31, n. 4, p. 1751– 1767. 2021.
- NICK, C.; BOREM, A. **Pimentão do plantio à colheita**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2016. 204 p.
- OLADOSU, Y., RAFII, MY, AROLU, F., CHUKWU, SC, SALISU, MA, FAGBOHUN, IK, MUFTAUDEEN, T. K.; SWARAY, S.; HALIRU, B.S. Superabsorbent polymer hydrogels for sustainable agriculture: A review. **Horticulturae**, [s. l] v. 8, n. 7, p. 605, 2022.
- OLIVEIRA FILHO, P., JÚNIOR, M. V., ALMEIDA, C. L., LIMA, J. S., NASCIMENTO COSTA, J., ROCHA, J. P. A. Crescimento de cultivares de pimentão em função da adubação potássica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s. l] v. 12, n. 4, p. 2814-2822, 2018.
- PAGAY, V.; KIDMAN, C. M. Evaluating remotely-sensed grapevine (*Vitis vinifera* L.) water stress responses across a viticultural region. **Agronomy**, [s. l] v. 9, n. 11, p. 682, 2019.
- PATRA, S. K., PODDAR, R., BRESTIC, M., ACHARJEE, P. U., BHATTACHARYA, P., SENGUPTA, S., PAL, P., BAM, N., BISWAS, B., BAREK, V., ONDRISIK, P., SKALICKY, M., HOSSAIN, A. Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing crop and water productivity under water deficit condition. **International Journal of Polymer Science**, [s. l] v. 2022, n. 1, p. 4914836, 2022.
- PRUEGER, J. H., PARRY, C. K., KUSTAS, W. P., ALFIERI, J. G., ALSINA, M. M., NIETO, H., WILSON, T. G.; HIPPS, L. E.; ANDERSON, M. C.; HATFIELD, J. L.; GAO, F.; McKEE, L. G.; McELRONE, A.; AGAM, N.; LOS, S. A. Crop Water Stress Index of an irrigated vineyard in the Central Valley of California. **Irrigation Science**, [s. l] v. 37, n. 3, p. 297-313, 2019.
- QUEBRAJO, L., PÉREZ-RUIZ, M., PÉREZ-URRESTARAZU, L., MARTINEZ, G., EGEEA, G. Linking thermal imaging and soil remote sensing to enhance irrigation management of sugar beet. **Biosystems Engineering**, [s. l] v. 165, p. 77-87, 2018.
- QUEIROGA, T. B. **Fisiologia do cultivo e da qualidade de Pimentão vermelho submetido a lâminas de Irrigação e adubações**. 2019, 88 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura

Tropical). Universidade Federal de Campina Grande – UFPB, Pombal – PB, 2019.

REIFSCHNEIDER, F.J. B. **Capsicum: pimentas e pimentões do Brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia/ Embrapa Hortaliças, p.14-46, 2000.

RITCHIE, G.A. HINCKLEY, T.M. The pressure chamber as an instrument for ecological research. **Advances in Ecological Research**, [s. l] v. 9, p. 165–254, 1975.

RODRÍGUEZ-DOMINGUEZ, C. M.; FORNER, A.; MARTORELL, S.; CHOAT, B.; LOPEZ, R.; PETERS, J. M.; PFAUTSCH, S.; MAYR, S.; CARINS-MURPHY, M. R.; MCADAM, S. A. M.; RICHARDSON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; MENEZES-SILVA, P. E.; TORRES-RUIZ, J. M.; BATZ, T. A.; SACK, L. Leaf water potential measurements using the pressure chamber: synthetic testing of assumptions towards best practices for precision and accuracy. **Plant, Cell & Environment**, [s. l] v. 45, n. 7, p. 2037-2061, 2022.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Biostimulants in agriculture. **Frontiers in plant science**, [s. l] v. 11, p. 40, 2020.

SAHA, A., SEKHARAN, S., MANNA, U. Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review. **Soil and Tillage Research**, [s. l] v. 204, p. 104736, 2020.

SANTOS, J. C. C. D., SALOMÃO, L. C., SILVA, L. F. V. D., OLIVEIRA, R. F. D., CANTUARIO, F. S. D., PEREIRA, A. I. D. A. Utilização de polímero hidroretentor e lâminas de irrigação para racionalização de recursos hídricos no cultivo do pimentão. **Irriga**, [s. l] v. 27, n. 2, p. 408-418, 2022.

SARAIVA, G. F., ANDRADE, R., SOUZA, G. Termografia por infravermelho como ferramenta de diagnóstico precoce de estresse hídrico severo em soja. **Agrarian Academy**, [s. l] v. 1, n. 02, 2014.

SEDIYAMA, M. A. N., VIDIGAL, S. M., SANTOS, M. R. D., & SALGADO, L. T. Rendimento de pimentão em função da adubação orgânica e mineral. **Horticultura Brasileira**, [s. l] v. 27, n. 3, p. 294-299, 2009.

SEDIYAMA, M. A. N.; MARLEI, R. S.; VIDIGAL, S. M.; PINTO, C. L. O.; JACOB, L. L. Nutrição e produtividade de plantas de pimentão colorido, adubadas com biofertilizantedesuíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l] Campina Grande, v.18, n.6, p.588-594,2014.

SHI, X. N.; WEN, W. B.; WANG, A. Q. Effect of surfactant on porosity and swelling behaviors of guar gum-g-poly(sodium acrylate-co-styrene)/ attapulгите superabsorbent hydrogels, **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, [s. l] v. 88, p. 279-286, 2011.

SOUSA, A. M. **Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada para produção da cultura do pimentão**. 2022. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento**

Vegetal. 6ª ed. – Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TURNER, N.C. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. **Irrigation Science**, [s. l] v. 9, p. 289–308, 1988.

ULLAH, M. S.; MALEKIAN, R.; RANDHAWA, G. S.; GILL, Y. S.; SINGH, S.; ESAU, T. J.; ZAMAN, Q. U.; AFZAAL, H.; DU, D. L.; FAROOQUE, A. A. The potential of biochar incorporation into agricultural soils to promote sustainable agriculture: insights from soil health, crop productivity, greenhouse gas emission mitigation and feasibility perspectives—a critical review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, [s. l] v. 23, n. 4, p. 1105-1130, 2024.

VALNIR JÚNIOR, M.; LIMA, V. L. A. de; GOMES FILHO, R. R.; CARVALHO, C. M. de; SOARES, F. A. L.; LIMA, S. C. R. V. Lâminas de irrigação e frequência de aplicação no crescimento do meloeiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, [s. l] Fortaleza – CE, v. 7, n. 1, 2013.

VIOL, M. A., DE A. C., J., LIMA, E. M. C., MATTOS, R. W., REZENDE, F. C., RODRIGUES, J. L. M. Déficit hídrico e produção do tomate cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, [s. l] v. 11, n. 1, p. 1244-1253, 2017.

WITTEWER, S. H.; CASTILLA, N. Protected cultivation of horticultural crops worldwide. **HortTechnology**, [s. l] Alexandria, v. 5, no. 1, p. 6-23, 1995.

WOFFORD JÚNIOR, D. J.; KOSKI, A. J. **A polymer for the drought years**. Colorado Green, Colorado. 1990.

YILDIRIM, M., DEMIREL, K., BAHAR, E. Effect of restricted water supply and stress development on growth of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under drought conditions. **J. Agro. Crop Sci**, [s. l] v. 3, n. 1, p. 1-9, 2012.

YU, Y.; LIU, L.; KONG, Y.; ZHANG, E.; LIU, Y. Synthesis and properties of Namely chitosan cross-linked poly(acrylic acid-co-acrylamide) superabsorbents. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l] v.19, p. 926-934, 2011.

ZWIRTES, A. L. **Características morfofisiológicas e produtividade de plantas de sorgo submetidas à irrigação deficitária**. 2013, 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, 2013.