

**INSTITUTO AGRONÔMICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL  
E SUBTROPICAL**

**IRRIGAÇÃO INTELIGENTE: MONITORAMENTO DA  
IRRIGAÇÃO POR SENSORES DE PLANTA, SOLO E  
CLIMA**

**PHILLIPE MARQUES DE REZENDE**

Campinas-SP

Março/2026

**INSTITUTO AGRONÔMICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL E**  
**SUBTROPICAL**

**IRRIGAÇÃO INTELIGENTE: MONITORAMENTO DA**  
**IRRIGAÇÃO POR SENSORES DE PLANTA, SOLO E**  
**CLIMA**

**PHILLIPE MARQUES DE REZENDE**

Dissertação apresentada como requisito para a defesa de **mestrado** do PPG-IAC em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração em Sistemas de Manejo e Qualidade Ambiental.

**Orientadora: Dra. Isabella Clerici De Maria**  
**Coorientadora: Dra. Jane Maria de Carvalho Silveira**

Campinas-SP  
Março/2026

Ficha elaborada pela bibliotecária do Seção de Documentação Científica do Instituto Agronômico

R467i Rezende, Phillipe Marques de  
Irrigação inteligente: monitoramento da irrigação por sensores de planta, solo e clima / Phillipe Marques de Rezende. Campinas, 2026. 73 fls.

Orientadora: Isabella Clerici De Maria  
Co-orientadora: Jane Maria de Carvalho Silveira  
Dissertação (Mestrado) Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agronômico

1.Agricultura digital. 2. CWSI. 3. Eficiência do Uso da Água.  
4.Sustentabilidade. 5. Tecnologia. 6. Sensoriamento remoto.  
I. De Maria, Isabella Clerici II. Silveira, Jane Maria de Carvalho  
III. Título

CDD.630.285

Pós-Graduação – Agricultura Tropical e Subtropical  
Reconhecimento Homologado pela Portaria MEC Nº 609 de 14/03/2019 - D.O.U. 18/03/2019

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos 20 de março de 2026, às 14h00, reuniu-se a banca examinadora homologada pelo Programa de Pós- Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, composta pelos membros abaixo listados visando à defesa de dissertação de mestrado de Phillipe Marques de Rezende, para obtenção do título de "MESTRE", conforme Processo SAA nº PRT7403/2024-78. A sessão pública de defesa foi realizada em formato híbrido, sob a presidência da Profª. Drª. Isabella Clerici De Maria, orientadora do candidato, sendo aberta ao público. Iniciados os trabalhos, o candidato submeteu-se ao exame de sua dissertação, intitulada "Irrigação inteligente: monitoramento da irrigação por sensores de planta, solo e clima". Terminado o exame, procedeu-se ao julgamento, cujo resultado foi o seguinte:

Profª. Drª. Isabella Clerici De Maria - IAC	APROVADO (X)	REPROVADO ( )
Prof. Dr. Gustavo Lopes Muniz - FEAGRI/Uni	APROVADO (X)	REPROVADO ( )
Profª. Drª. Luís Henrique Bassoi - CNPDIA	APROVADO (X)	REPROVADO ( )

Apurados os resultados, constatou-se que o candidato foi habilitado, fazendo jus, portanto, ao título de "MESTRE EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL", na área de concentração: Sistema de Manejo e Qualidade Ambiental, do que, para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pelos membros da comissão examinadora:



Profª. Drª. Isabella Clerici De Maria - IAC



Prof. Dr. Gustavo Lopes Muniz - FEAGRI/Uni

Profª. Drª. Luís Henrique Bassoi - CNPDIA (participação presencial/remota)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha coorientadora, Jane Maria de Carvalho Silveira, e à orientadora, Isabella Clerici De Maria, pela confiança, orientação segura, disponibilidade e valiosas contribuições ao longo de todo o mestrado. Seus ensinamentos e dedicação foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos amigos de mestrado, Elen Saturnino Ferreira e Ana Carolina Vidal, agradeço pela parceria, troca de conhecimentos, apoio nos momentos desafiadores e pelos inúmeros aprendizados compartilhados durante essa caminhada.

Aos meus pais, expresso minha mais profunda gratidão pela força, incentivo, sabedoria e apoio incondicional em todos os momentos. À minha irmã, pelo companheirismo e constante incentivo, e à minha sobrinha, Lívia, por trazer leveza, alegria e motivação nos dias mais desafiadores, tornando essa trajetória ainda mais especial. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Agradeço a FAPESP pela concessão da bolsa (proc. 2024/10180-0) e ao projeto (proc. 2022/09319-9).

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 HIPÓTESE .....	2
1.2 OBJETIVO .....	2
1.2.1 Objetivo Geral .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Cultivo de uva fina de mesa no brasil.....	3
2.2 Sensores digitais .....	4
2.3 Manejo de irrigação via planta-clima-solo .....	5
2.4 Índice de estresse hídrico da cultura.....	7
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	8
3.1 Distritos agrotecnológicos .....	8
3.2 Área de estudo .....	10
3.3 Caracterização físico-hídrica e química do solo nas áreas de estudo .....	11
3.4 Coeficiente de uniformidade de irrigação .....	16
3.5 Monitoramento de solo-planta-clima.....	17
3.5.1 Monitoramento agroclimatológico .....	18
3.5.2 Umidade, condutividade elétrica e temperatura do solo e temperatura da copa .....	20
3.5.3 Condutância estomática.....	21
3.5.4 Índice de estresse hídrico da cultura.....	21
3.6 Estimativa de produtividade e eficiência do uso da água.....	24
3.7 Análise estatística .....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1 Balanço hídrico de São Miguel Arcanjo.....	27
4.2 Coeficiente de uniformidade de irrigação .....	30
4.3 Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e umidade do solo .....	32
4.4 Condutância estomática.....	38
4.5 Comportamento das linhas de base .....	41
4.6 Linha de base inferior e superior .....	51
4.7 Índice de estresse hídrico da videira.....	59
4.8 Irrigação total necessária e eficiência do uso da água.....	63
5 CONCLUSÕES .....	66
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Índice de irrigação dos Distritos Agrotecnológicos. ....	9
Tabela 2.	Potenciais culturas dos distritos tecnológicos para irrigação. ....	10
Tabela 3.	Classificação textural na área irrigada e não irrigada. ....	12
Tabela 4.	Caracterização da fertilidade do solo das áreas irrigada e não irrigada. ....	14
Tabela 5.	Estádios fenológicos da videira. ....	17
Tabela 6.	Resultados dos coeficientes de uniformidade de irrigação por microaspersão na área irrigada. ....	30
Tabela 7.	Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, Coeficiente de Uniformidade de Distribuição e Coeficiente de Uniformidade Estatístico. ....	31
Tabela 8.	Parâmetros do ajuste de Van Genuchten para as áreas irrigada e não irrigada nas profundidades de 0,20 e 0,40 metros. ....	32
Tabela 9.	Análise da variância para condutância estomática da videira para três épocas, duas áreas e três horários diferentes. ....	39
Tabela 10.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de repouso fenológico. ....	48
Tabela 11.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de repouso fenológico. ....	49
Tabela 12.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de brotação. ....	49
Tabela 13.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de brotação. ....	49
Tabela 14.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de brotação e florescimento. ....	50
Tabela 15.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de brotação e florescimento. ....	50
Tabela 16.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de crescimento do fruto. ....	50
Tabela 17.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de crescimento do fruto. ....	51
Tabela 18.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de emborrachamento do fruto. ....	51
Tabela 19.	Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de emborrachamento do fruto. ....	51
Tabela 20.	Equações e coeficientes de determinação dos limites superiores em área irrigada e não irrigada em diferentes estádios fenológicos. ....	58
Tabela 21.	Produtividade, eficiência no uso de água (EUA), produção da videira. ....	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de equipamentos de irrigação no DAT de São Miguel Arcanjo, SP.....	9
Figura 2. Localização do Distrito Agrotecnológico de São Miguel Arcanjo, SP.....	10
Figura 4. Variação dos dados mensais de Precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) e evapotranspiração real (ET <sub>r</sub> ) do DAT de São Miguel Arcanjo .....	29
Figura 5. Ajuste de Van Genuchten: .....	33
Figura 6. Umidade volumétrica do solo na profundidade de 0,20 e 0,40 m.....	34
Figura 7. Dados de condutividade elétrica no solo.....	36
Figura 8. Dados de temperatura do solo .....	37
Figura 9. Dados médios de condutância estomática nos horários das 9, 12 e 15 horas na cultura da videira. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, diferem entre si. ....	39
Figura 10. Dados de déficit de pressão vapor durante o dia em cada estágio fenológico com dados coletados a 20 minutos. ....	40
Figura 11. Comportamento das linhas de base horária no estágio de repouso na área: (A) irrigada; (B) não irrigada. ....	42
Figura 12. Comportamento das linhas de base horária no estágio de brotação na área: (A) irrigada; (B) não irrigada. ....	43
Figura 13. Comportamento das linhas de base horária no estágio de brotação e florescimento na área: (A) irrigada; (B) não irrigada. ....	44
Figura 14. Comportamento das linhas de base horária no estágio de crescimento do fruto na área: (A) irrigada; (B) não irrigada. ....	45
Figura 15. Comportamento das linhas de base horária no estágio de emborrachamento do fruto na área: (A) irrigada; (B) não irrigada. ....	46
Figura 16. NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Repouso fenológico da área irrigada; e (B) Repouso fenológico da área não irrigada. ....	53
Figura 17. NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Brotação na área irrigada; e (B) Brotação na área não irrigada.....	54
Figura 18. NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Brotação e florescimento na área irrigada; e (B) Brotação e florescimento na área não irrigada. ....	55
Figura 19. NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Crescimento do fruto na área irrigada; e (B) Crescimento do fruto na área não irrigada. ....	56
Figura 20. NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Emborrachamento do fruto na área irrigada; e (B) Emborrachamento do fruto na área não irrigada.....	57
Figura 21. Resultados do CWSI para cada estágio fenológico. ....	59
Figura 22. Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico.....	60
Figura 23. Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico.....	61
Figura 24. Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico.....	61
Figura 25. Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico.....	62
Figura 26. Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico.....	62
Figura 27. Lâmina simulada e a lâmina aplicada pelo produtor em 2025.....	64

**Figura 28.** Lâmina simulada e aplicada em função de Dias Após a Poda (DAP). .....65

### RESUMO

A crescente irregularidade das precipitações e a intensificação da escassez hídrica impõem desafios ao manejo da irrigação na viticultura, especialmente em regiões com elevada variabilidade climática. O objetivo desse estudo foi avaliar o índice de estresse hídrico de uva fina de mesa em São Miguel Arcanjo, SP, em duas áreas experimentais, irrigada e não irrigada. A uniformidade do sistema de irrigação por microaspersão foi avaliada conforme a norma NBR 15.886-3 da ABNT (2022) e determinada pelos coeficientes de uniformidade (CUC, CUD e CUE). O monitoramento contínuo ao longo do ciclo em tempo real foi realizado com sensores de umidade de solo, temperatura do solo, condutividade elétrica e temperatura da copa. A condutância estomática foi avaliada por meio de medições realizadas em folhas plenamente expandidas e expostas à radiação solar em três horários ao longo do dia, nos diferentes estádios fenológicos. O índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) foi determinado com base na temperatura da copa, medida com sensores de temperatura infravermelho instalados acima da copa da videira na área irrigada e não irrigada. Os resultados do balanço hídrico indicaram concentração das precipitações no período chuvoso e distribuição temporal irregular. O sistema de irrigação apresentou coeficientes de uniformidade inferiores aos recomendados, possivelmente associados à baixa pressão operacional. O monitoramento contínuo da umidade do solo mostrou-se eficiente para controle do conteúdo volumétrico de água. A condutância estomática apresentou baixa variação entre as áreas irrigada e não irrigada. A linha de base inferior (NWSB) apresentou melhor ajuste na área irrigada, enquanto a linha superior foi mais consistente na área não irrigada, conforme esperado. Embora o CWSI tenha apresentado valores pontuais fora da faixa teórica de 0 a 1, constatou-se uma tendência coerente entre esse índice e o conteúdo de água no solo. A produtividade média na área irrigada foi de 40.535 kg ha<sup>-1</sup>, resultando na eficiência de uso da água de 1,99 kg m<sup>-3</sup>, indicando adequada conversão da água aplicada em produção. Conclui-se que a integração do monitoramento da irrigação pelo clima e pelo solo, associado a indicadores fisiológicos da planta e de sensoriamento térmico, constitui tecnologia digital promissora para o manejo inteligente da irrigação em videiras.

**Palavras-chave:** Agricultura digital, CWSI, Eficiência do Uso da Água, Sustentabilidade, Tecnologia, Sensoriamento remoto.

## Smart irrigation: monitoring using plant, soil, and climate sensors

### ABSTRACT

The increasing irregularity of precipitation patterns and the intensification of water scarcity pose significant challenges to irrigation management in viticulture, particularly in regions characterized by high climatic variability. This study aimed to evaluate the Crop Water Stress Index (CWSI) of fine table grapes in São Miguel Arcanjo, São Paulo State, Brazil, under two experimental conditions: irrigated and non-irrigated areas. The uniformity of the microsprinkler irrigation system was assessed according to the ABNT NBR 15.886-3 standard (2022) and determined using the uniformity coefficients (CUC, CUD, and CUE). Continuous real-time monitoring throughout the crop cycle was carried out using sensors for soil moisture, soil temperature, electrical conductivity, and canopy temperature. Stomatal conductance was evaluated through measurements performed on fully expanded leaves exposed to solar radiation at three different times of the day during the distinct phenological stages. The Crop Water Stress Index (CWSI) was determined based on canopy temperature measured by infrared temperature sensors installed above the grapevine canopy in both irrigated and non-irrigated areas. The results indicated rainfall concentration during the wet season and irregular temporal distribution. The irrigation system exhibited uniformity coefficients below the recommended standards, possibly associated with low operating pressure and lack of preventive maintenance. Continuous soil moisture monitoring proved effective for controlling volumetric water content. Stomatal conductance showed low variation between irrigated and non-irrigated areas. The non-water-stressed baseline (NWSB) showed better fitting in the irrigated area, whereas the upper baseline was more consistent in the non-irrigated area, as expected. Although the CWSI exhibited occasional values outside the theoretical range from 0 to 1, a coherent trend was observed between this index and soil water content. Average yield in the irrigated area reached 40,535 kg ha<sup>-1</sup>, resulting in a water use efficiency of 1.99 kg m<sup>-3</sup>, indicating adequate conversion of applied water into crop production. It can be concluded that the integration of irrigation monitoring based on climatic and soil conditions, combined with plant physiological indicators and thermal sensing, represents a promising digital technology for smart irrigation management in grapevines.

**Keywords:** Digital agriculture, CWSI, Water Use Efficiency, Sustainability, Technology, Remote sensing.

# 1 INTRODUÇÃO

Em um contexto de frequência maior de períodos de escassez hídrica e intensificação da competição entre os múltiplos usos da água, torna-se imperativo ampliar a eficiência no uso desse recurso estratégico por meio de tecnologias de monitoramento e manejo da irrigação baseadas na integração de informações climáticas, edáficas e fisiológicas. A redução da disponibilidade hídrica, aliada ao aumento dos custos energéticos e operacionais, tem impulsionado a transição de sistemas convencionais para abordagens fundamentadas na agricultura irrigada digital, nas quais as decisões são orientadas por dados em tempo real.

Nesse cenário, o uso de sensores agrícolas digitais e sistemas automatizados de monitoramento tem se consolidado como alternativa promissora para estimar com maior exatidão a demanda hídrica das culturas, reduzindo tanto aplicações excessivas quanto deficitárias. O monitoramento contínuo permite a detecção precoce de estresses hídricos e a adoção de estratégias de manejo de água mais assertivas, favorecendo boas práticas de irrigação localizada e sistemas mais eficientes.

No caso da cultura da videira, o manejo hídrico assume papel determinante não apenas na produtividade, mas também na qualidade dos frutos, sendo essencial em sistemas de produção de uvas finas de mesa. Nesse contexto, o uso do índice de estresse hídrico da cultura (CWSI, sigla em inglês), proposto por Idso et al. (1981), destaca-se como uma ferramenta com elevado potencial, pois integra variáveis atmosféricas e respostas fisiológicas da planta a partir da relação entre a diferença da temperatura do dossel e do ar e o déficit de pressão de vapor. Apesar de seu reconhecido potencial, a aplicação do CWSI em videiras apresenta limitações importantes, sobretudo pela escassez de estudos que estabeleçam a modelagem de linhas de base específicas para as reais condições edafoclimáticas. Frequentemente, são utilizadas parametrizações generalistas, o que compromete a acurácia do índice e sua aplicabilidade prática no manejo da irrigação.

Diante dessa lacuna, o presente estudo propõe a determinação das linhas de base do CWSI para a videira ‘Moscato’, utilizando a temperatura do dossel como variável-chave sob condições locais de cultivo. A principal inovação consiste na modelagem do índice para a cultivar “Moscato” de uva fina de mesa, em condições edafoclimáticas representativas da região de estudo com e sem irrigação, contribuindo para a redução das incertezas associadas ao uso de modelos generalizados. Dessa forma, o trabalho busca avançar no entendimento da resposta fisiológica da videira ao estresse hídrico e fornecer subsídios técnicos para o desenvolvimento

de estratégias de manejo da irrigação mais precisas, com potencial aplicação em sistemas automatizados e de apoio à decisão.

## **1.1 HIPÓTESE**

A temperatura da copa, associada ao déficit de pressão de vapor (VPD), permite estimar o estado hídrico da videira por meio do índice de estresse hídrico da cultura (CWSI), sendo uma ferramenta eficiente para diferenciar condições de manejo (irrigado e não irrigado) em função do conteúdo de água no solo e subsidiar a tomada de decisão na irrigação.

## **1.2 OBJETIVO**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o índice de estresse hídrico (CWSI) como indicador do estado hídrico da videira, considerando sua relação com o conteúdo de água no solo, variáveis fisiológicas e condições atmosféricas ao longo dos estádios fenológicos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Comparar o balanço hídrico de 2024 e 2025 com a série histórica para São Miguel Arcanjo, SP;
- Avaliar a eficiência do sistema de irrigação e o comportamento da umidade do solo nas áreas de estudo irrigada e não irrigada;
- Obter as linhas de base (inferior e superior) para cada fase fenológica da uva fina de mesa;
- Obter o índice de estresse hídrico para as videiras nas diferentes fases fenológicas;
- Testar a correlação entre o índice de estresse hídrico da videira e a umidade volumétrica do solo;
- Estimar a eficiência do uso da água e produtividade de uva fina de mesa nas áreas irrigada e não irrigada.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultivo de uva fina de mesa no Brasil

A videira (*Vitis vinifera* L.) se destaca por sua relevância econômica e social, ocupando o terceiro lugar na produção mundial de frutos. No Brasil, a viticultura ocupa cerca de 950.423 mil ha (OIV, 2024). A nível mundial, a produção de uvas fina de mesa ultrapassa 33 milhões de toneladas, consolidando-se como uma das frutas mais consumidas e de maior valor agregado (OIV, 2024). Além de seu valor comercial, a cultura apresenta ampla adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, sendo cultivada em regiões de clima temperado, tropical e semiárido.

Os cinco maiores produtores de uva no Brasil são: Rio Grande do Sul, Pernambuco, São Paulo, Bahia e Santa Catarina; juntos, concentram quase 95% de toda a área de vitícola brasileira. A produção de uva no Nordeste é voltada para o comércio de uvas finas de mesa (EMBRAPA, 2023).

Na Região Sudeste, o estado de São Paulo, destacado como importante produtor de uva de mesa. A produção de uva fina de mesa no estado de São Paulo correspondeu a 6.870.058 cx. 7kg (IEA, 2025).

Os estádios fenológicos de floração e frutificação da videira são comumente relacionados ao rendimento da cultura, sendo afetados principalmente pela temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica (Leão; Silva, 2018).

Temperaturas inferiores a 20 °C reduzem a atividade das reações fotossintéticas da videira; no entanto, essa atividade aumenta com a elevação da temperatura do ar até atingir valores ótimos e volta a decrescer quando a temperatura se aproxima de 45 °C. A faixa ideal de temperatura do ar para a videira situa-se entre 12 °C e 22 °C (Piña-Rey et al., 2021), de modo que os meses mais frios representam maior risco de redução da produtividade da cultura.

Segundo Monteiro et al. (2021), a formação da gema fértil é um processo muito importante, visto que esse processo afeta o número de cachos colhidos, fator que determina o rendimento da cultura. Portanto, a formação da inflorescência é altamente afetada por fatores ambientais e endógenos, como por exemplo o vigor dos ramos, balanço hormonal, temperatura, intensidade luminosa, disponibilidade hídrica, nutrição mineral e práticas culturais.

O município de São Miguel Arcanjo no estado de São Paulo apresenta cultivo importante de uva fina de mesa. Embora mais da metade do cultivo ainda seja feito no sistema

de sequeiro, áreas com implementação de tecnologia de irrigação vêm sendo adotadas na região com expectativa de crescimento.

## **2.2 Sensores digitais**

Os sensores são equipamentos que coletam dados de entrada para posteriormente serem analisados e interpretados, podendo medir a umidade do solo, temperatura do solo, teores de NPK, entre outros (Ratnaparkhi et al., 2020). Os dados dos sensores são interpretados agronomicamente para serem aplicados ao manejo da cultura (Ammoniaci et al., 2021).

Segundo Spachos e Gregori (2019), um dos grandes destaques atualmente, tratando-se de sensores, são os sensores proximais, visto que apresentam alto grau de precisão e detalhamento, comparando-se com os sensores remotos, que apresentam certas limitações, como: arquitetura do dossel e condições climáticas ideais.

Os sensores proximais podem ser medidos de várias formas (Martello et al., 2022), podendo ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia, dividindo-se em sensores ativos e sensores passivos. Os autores ressaltam o fato de os sensores ativos não dependerem de fontes externas para emitirem radiação, proporcionando grande vantagem ao mesmo, de modo que são menos afetados pela variação de luz e sombra, visto que é algo recorrente na aquisição de dados no campo. Uma das principais vantagens dessa tecnologia reside na obtenção de dados em tempo real, dispensando etapas adicionais de pós-processamento, como aquelas requeridas por sensores baseados em imagens, o que amplia sua aplicabilidade em sistemas de manejo agrícola, desta maneira facilitando todo o processo de sincronização da coleta, diagnóstico, prescrição e aplicação na cultura.

Segundo Zhuang et al. (2017), o sensoriamento remoto proximal é importante para obtenção de dados de temperatura da copa da cultura de forma rápida e não destrutiva através de imagens multiespectrais e termografia em áreas grandes ou pequenas.

O monitoramento da irrigação em tempo real é uma tendência mundial, portanto a necessidade de utilização de sensores é evidente e primordial para a determinação de novos conceitos em irrigação inteligente.

## 2.3 Manejo de irrigação via planta-clima-solo

O movimento da água no sistema solo-planta-atmosférico ocorre pela diferença de potencial hídrico, do solo para a raiz e do xilema para as folhas. A água flui de zonas onde a energia potencial é maior para zonas onde a energia potencial é menor. Isso cria um déficit hídrico na folha e, em resposta ao déficit hídrico, a planta ativa um mecanismo para o fechamento dos estômatos, pois as células-guarda perdem a pressão de turgescência, que é afetada pelo potencial hídrico foliar, temperatura do ar, concentração de CO<sub>2</sub> e luz (Taiz et al., 2017). O potencial hídrico da folha permite quantificar a água e o estado hídrico das plantas.

Compreender as alterações das relações fisiológicas das plantas associadas à água é fundamental para monitorar a tolerância à seca de espécies e genótipos em condições de déficit, uma vez que a perda de água pelos estômatos está intimamente relacionada ao baixo potencial hídrico na atmosfera. Segundo King et al. (2020), o potencial hídrico é um indicador de estresse hídrico nas plantas e pode ser usado para o planejamento da irrigação e para compreender as relações planta-água.

Segundo El-Hendawy et al. (2017), a planta sob condição de estresse ambiental regula alguns mecanismos fisiológicos, bioquímicos e morfológicos, com a finalidade de diminuir o dano à célula; dessa forma, evita prejuízos ao seu crescimento e à produção. A interpretação dos mecanismos que regulam a planta em condição de estresse serve como orientação técnica para maximizar a sustentabilidade da produção e eficiência hídrica. O índice de estresse hídrico das culturas (Idso et al., 1981) e o índice de reflectância fotoquímica (Wong et al., 2022) são frequentemente relacionados aos indicadores de estresse hídrico, como também: o potencial hídrico foliar, condutância estomática, potencial hídrico do caule e conteúdo de água no solo (King et al., 2020, Gonzalez-Dugo et al., 2020; Lena et al., 2020).

A água disponível no solo desempenha uma função importante no crescimento das plantas, temperatura, transporte químico, reserva de águas subterrâneas, estresse hídrico nas culturas e evapotranspiração (Ochsner, 2024). O movimento da água ocorre dentro do perfil do solo: entre o solo e as raízes das plantas e entre o solo e a atmosfera, dependendo do potencial energético do gradiente.

A retenção de água no solo é influenciada por diversos fatores, principalmente pela granulometria e pela estrutura do solo (Mota et al., 2010), sendo a granulometria uma característica relativamente estável, relacionada à distribuição das partículas minerais sólidas em função do tamanho (Parahybaet et al., 2019). A retenção e a condução de água no solo

ocorrem de forma mais eficiente em sistemas porosos estáveis e bem distribuídos ao longo do perfil do solo (Libardi, 2010). Os macroporos desempenham função importante na aeração e na condução de água em condições saturadas, enquanto os microporos atuam principalmente na retenção e movimentação da água em condições insaturadas (Cassel e Nielsen, 1986).

A curva de retenção de água no solo tem um papel importante, atuando como ferramenta na descrição do comportamento físico-hidráulico e mecânica de solo não saturados (Parahybaet et al., 2019), também essencial para estudo de qualidade do solo para orientação de práticas de uso e manejo sustentável de produção agrícola (Machado et al. 2008, Silva et al. 2010).

A câmara de pressão de Richards (1965) é considerada como método padrão para determinar a curva de retenção de água. Apesar de ser uma técnica amplamente utilizada e validada, apresenta algumas limitações, como: elevado custo do equipamento, tempo elevado para equilíbrio entre umidade e tensão aplicada, além de não reproduzir as condições de campo. De acordo com Meyer & Gee (1999), a capacidade de campo representa a quantidade máxima de água que determinado solo pode reter em sua estrutura, sem que haja perdas por percolação. Geralmente, nesse ponto a tensão da água retida no solo é de -10 kPa (solos arenosos) ou -33 kPa (solos argilosos). O movimento da água no solo é controlado pela gravidade e pela capilaridade, sendo a gravidade responsável por drenar a água contida nos poros maiores (macroporosidade), enquanto que a capilaridade atua predominantemente no movimento de redistribuir a água no perfil do solo. O ponto de murcha permanente é o valor da umidade do solo em que as plantas murcham e não conseguem recuperar a turgescência, mesmo que se mais água for adicionada ao solo, correspondendo ao potencial de -1500 kPa. A capacidade de água disponível no solo indica a quantidade de água que pode ser armazenada no solo e pode ser utilizada pelas plantas, sendo calculada pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Silva et al., 2014).

Elevados conteúdos de água estão associados a baixas tensões, enquanto baixos conteúdos hídricos correspondem a altas tensões. Em condições de alta umidade, os fenômenos de capilaridade exercem grande influência na determinação do potencial mátrico, uma vez que a água ocupa predominantemente os poros maiores do solo e é retida por forças matriciais relativamente fracas. Por outro lado, em baixos teores de água, a retenção passa a ocorrer principalmente nos microporos e nas superfícies das partículas do solo, onde predominam forças de adsorção, tornando a água mais fortemente retida e menos disponível às plantas, com menor influência direta da estrutura do solo (Richards, 1965).

Atualmente, a exatidão do manejo da irrigação envolve não apenas utilização de instrumentação via clima ou via solo ou via planta separadamente, mas uma gestão com monitoramento simultâneo de todos esses fatores que envolvem a demanda hídrica pela cultura, constituindo a irrigação inteligente.

## **2.4 Índice de estresse hídrico da cultura**

O índice de estresse hídrico das culturas (CWSI) está intimamente relacionado a outros indicadores de estresse, incluindo potencial hídrico foliar (King et al., 2020, Gonzalez-Dugo et al., 2020), potencial hídrico do caule, conteúdo de água no solo e condutância estomática (Lena et al., 2020). Dessa forma, o uso do CWSI pode facilitar o planejamento da irrigação (Costa-Filho et al., 2020) para diversas culturas.

O CWSI é definido com base na diferença entre a temperatura da copa ( $T_c$ ) e a temperatura do ar ( $T_a$ ) e o déficit de pressão de vapor (VPD), sendo desenvolvido empiricamente por Idso et al. (1981). A determinação do índice utiliza os limites teóricos superiores e inferiores. O sucesso da avaliação do estado hídrico das plantas depende da determinação precisa dos limites superiores e inferiores para a condição específica da cultura. Uma vez estabelecido, o estado da água na planta pode ser rapidamente determinado a partir de medições com base na temperatura da copa e temperatura do ar e déficit de pressão de vapor (King et al., 2020).

Os limites são limites teóricos que consideram os extremos da planta, do estresse hídrico ao conforto térmico, visto que o limite superior infere que a cultura está completamente seca e limite inferior apresenta a cultura em conforto hídrico, sem nenhum estresse hídrico (Khanal et al., 2017).

A linha de base inferior é obtida pela relação de regressão linear entre a diferença da temperatura da copa e a temperatura do ar ( $T_c - T_a$ )<sub>LL</sub> e o déficit de pressão de vapor atmosférico (VPD) para plantas bem irrigada (Idso et al., 1981). O limite superior ( $T_c - T_a$ )<sub>UL</sub> é estimado em função do gradiente de pressão de vapor (Han et al., 2018a, Han et al., 2018b) ou através de uma testemunha onde seja observado um dossel altamente estressado.

A temperatura da copa tem sido reconhecida como um indicador confiável do estresse hídrico nas plantas, quando correlacionada com a escassez de água. As plantas estressadas tendem a fechar os estômatos para conservar água, o que reduz a condução estomática, minimiza a transpiração e leva ao aumento da temperatura das folhas (Helaly et al., 2022).

A relação entre a temperatura do ar e a temperatura da copa é mais variável durante períodos de déficit hídrico. Consequentemente, o uso da temperatura do dossel para avaliar o crescimento e desenvolvimento das plantas sob disponibilidade limitada de água tem sido sugerido como uma abordagem mais confiável. Estabelecer o índice de estresse hídrico para uva fina de mesa bem como determinar as linhas de base inferior e superior trazem informações importantes para a gestão inteligente de irrigação da videira no futuro.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Distritos agrotecnológicos**

Este estudo é parte do Centro de Ciência para o Desenvolvimento em Agricultura Digital - Semear Digital, financiado pela FAPESP (2022/09319-9 e 2024/10180-0), com foco no uso de tecnologias digitais para aumentar a produtividade de pequenos e médios agricultores. No escopo do Semear Digital foram selecionados dez Distritos Agrotecnológicos (DAT's) com base em indicadores socioeconômicos, considerando a diversidade produtiva e de recursos naturais. Os dez DAT's funcionam como um modelo ou vitrine para tecnologias e serviços digitais que tenham foco na solução de problemas reais do campo. Estabelecidos em diferentes regiões do Brasil: São Miguel Arcanjo-SP, Alto Alegre-SP, Jacupiranga-SP, Lagoinha-SP, Caconde-SP, Guia Lopes da Laguna-MS, Boa Vista do Tupim-BA, Vacaria-RS, Ingaí-MG e Breves-PA, eles possibilitam a identificação de gargalos de conectividade e a investigação e validação de tecnologias digitais para as diversas cadeias produtivas.

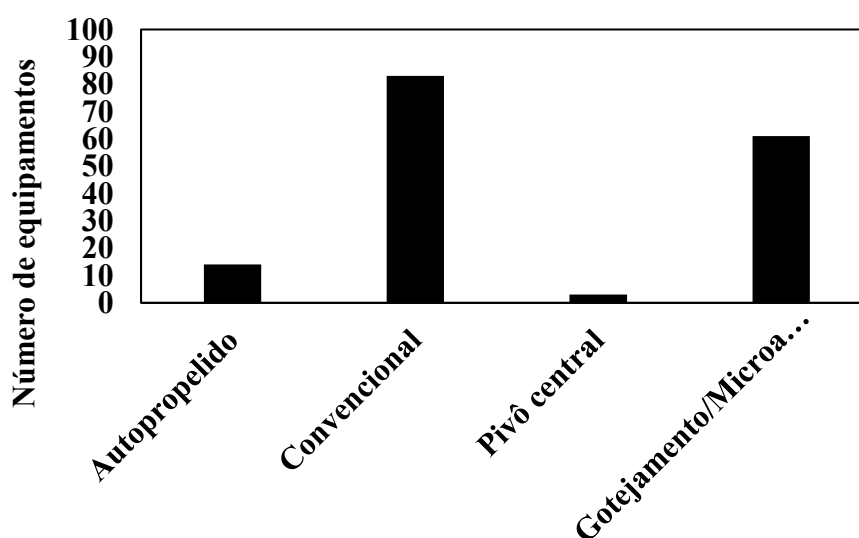
Para a seleção do local deste estudo foram coletadas informações sobre área irrigada, sistemas de irrigação e principais culturas irrigadas em cada um dos DAT's acima descritos. Inicialmente, levando em conta dados da área irrigada e da área agrícola (Brasil, 2025), obteve-se o índice de irrigação de cada um dos DAT's (Tabela 1). Os seguintes DAT's destacaram-se: Alto Alegre, Caconde e São Miguel Arcanjo.

Tabela 1. Índice de irrigação dos Distritos Agrotecnológicos.

DAT	Índice	Número de equipamentos
São Miguel Arcanjo - SP	0,46	161
Guia Lopes da Laguna - MS	0,19	
Boa vista do Tupim – BA	0,18	
Alto Alegre – SP	0,04	19
Jacupiranga – SP	0,02	3
Caconde - SP	0,01	47
Vacaria - RS	0,01	
Ingai - MG	0,00	
Lagoinha - SP	0,00	1
Breves - PA	0,00	

Fonte: Brasil, 2025 e São Paulo, 2019.

Para os DAT's localizados no estado de São Paulo (São Miguel Arcanjo, Alto Alegre, Jacupiranga, Lagoinha e Caconde) foram levantadas informações a respeito do número de equipamentos e sistemas de irrigação (São Paulo, 2019) (Figura 1). O DAT de São Miguel Arcanjo apresentou o maior índice de irrigação e a maior diversidade de sistemas de irrigação.



**Figura 1.** Número de equipamentos de irrigação no DAT de São Miguel Arcanjo, SP. Fonte: São Paulo, 2019.

Para os DAT's com maiores índices de irrigação, São Miguel Arcanjo-SP, Guia Lopes da Laguna-MS e Boa Vista do Tupim-BA, foram levantadas as principais culturas econômicas com potencial para irrigação (IBGE, 2024) (Tabela 2).

Tabela 2. Potenciais culturas dos distritos tecnológicos para irrigação.

DAT	Cultura perene e semiperene	Cultura temporária
São Miguel Arcanjo-SP	Uva fina e rústica	Milho grão e feijão
Boa Vista do Tupim-BA	Abacaxi	Milho silagem e milho grão
Guia Lopes da Laguna-MS	-	Milho grão

Com base nessas informações, para este estudo foi selecionado o DAT de São Miguel Arcanjo-SP e a cultura da uva fina de mesa, dado seu grande potencial econômico e demanda por irrigação.

### 3.2 Área de estudo

O estudo foi realizado no distrito agrotecnológico de São Miguel Arcanjo-SP (Figura 2), com coordenadas 23°52'42" S e 47°59'50" W, 710 m de altitude, no período de março de 2025 a fevereiro de 2026. Segundo a classificação de Köppen-Geigero, o clima predominante na região é do tipo Cfa, temperado, sem estação seca e com verão quente. A temperatura média anual é de 19,2 °C, com precipitação média anual de 1454 mm. O solo das áreas irrigadas e não irrigadas foram classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo (Silva et al., 2025; Rossi 2017).

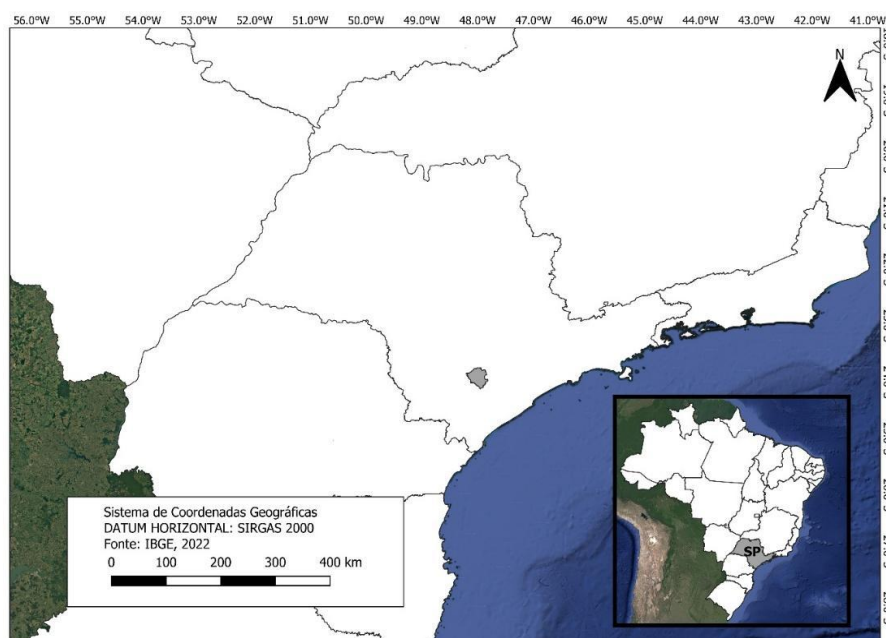


Figura 2. Localização do Distrito Agrotecnológico de São Miguel Arcanjo, SP.

Foram selecionadas duas áreas de estudo no DAT, sendo uma área irrigada (latitude 23°58'41,92"S e longitude 47°59'58,65"O) e outra não irrigada (latitude 23°59'57,08"S e longitude 47°59'46,28"O). Ambas com aproximadamente um hectare, com o cultivo de uva fina de mesa (*Vitis vinifera* L.), cultivar “Moscato”. As plantas nas duas áreas são conduzidas em sistema de espaldeira (altura de 1,9 m) com espaçamento de 3,8 x 3,0 m.

A área irrigada utiliza um sistema de irrigação por microaspersão, com microaspersores espaçados em 3,0 x 3,8 m, com quatro setores de irrigação. Nesse estudo, o manejo da irrigação da cultura foi realizado de acordo com o cronograma estabelecido pelo produtor. Cabe mencionar que as videiras são protegidas contra a entrada de pássaros e a ocorrência de chuva de granizo por meio de uma cobertura de clarite, para a proteção das plantas.

### 3.3 Caracterização físico-hídrica e química do solo nas áreas de estudo

A caracterização físico-hídrica das áreas de estudo envolveu a coleta de amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de um trado holandês, armazenadas em sacos plásticos e devidamente identificadas, sendo coletadas quatro amostras deformadas compostas para cada local (área irrigada e área não irrigada). As amostras indeformadas foram coletadas utilizando anéis volumétricos de aço inox de 100 cm<sup>3</sup> de volume. A coleta foi realizada com o auxílio de um castelinho e um martelo para garantir a cravação dos anéis ao solo. Os anéis com solo indeformado foram acondicionados em latas e espuma até o encaminhamento ao laboratório.

A retenção de água foi determinada por meio de mesa de retenção e de câmara de pressão (Richards, 1965; Teixeira et al., 2017), nas pressões de 0, 1, 3, 6, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa. Os dados foram ajustados pela expressão matemática de van Genuchten (1980) (Equação 1) e, a partir do ajuste foram determinados a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\psi/\alpha)^m]^n} \quad (1)$$

Em que:

$\theta$  é a umidade do solo a base de volume (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);

$\Psi$  o potencial de água no solo (kPa);

$\theta_r$  a umidade residual (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\theta_s$  a umidade de saturação (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);

$\alpha$ ,  $m$  e  $n$  os parâmetros empíricos da equação de van Genuchten.

A determinação da densidade de partículas (Tabela 3) foi realizada pelo método do picnômetro utilizando 10 g de solo (amostra deformada) seca em estufa por 24 horas a 105°C. Após esse período, a amostra foi deixada para esfriar no dessecador. No início da análise, a temperatura da água deionizada foi medida com um termômetro portátil. Em seguida, pesou-se cerca de 3 g de solo em um cadinho e transferiu-se para o picnômetro utilizando um funil, o qual foi limpo com um pincel para evitar resíduos. Com a amostra no picnômetro, foi adicionada água deionizada até preencher metade do volume do frasco, suficiente para cobrir o solo. Os picnômetros foram então colocados no dessecador, com suas tampas numeradas e dispostas de forma circular, sendo aplicado vácuo para remover o ar da mistura. O picnômetro foi mantido na câmara de vácuo até a eliminação das bolhas. Após a remoção do vácuo, completou-se o volume do picnômetro com água deionizada e colocou-se a tampa correspondente. A tampa foi preenchida com água deionizada até que a água saísse pela tampa. O picnômetro foi então seco externamente, caso houvesse excesso de água, e o conjunto (picnômetro + amostra + água) foi pesado. Ao final da análise, o conteúdo do picnômetro (amostra e água deionizada) foi retirado, e o frasco foi lavado até a completa remoção da amostra. Depois, completou-se com água deionizada novamente, limpou-se o excesso de água e o conjunto foi pesado uma última vez (picnômetro + água).

A análise granulométrica para determinar as frações de argila, silte e areia (Tabela 3) nas amostras deformadas foi realizada no laboratório do IAC utilizando o método da pipeta (Camargo et al., 2009).

Tabela 3. Classificação textural na área irrigada e não irrigada.

<b>Identificação</b>	<b>Profundidade cm</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte g kg<sup>-1</sup></b>	<b>Areia</b>	<b>Dp* g cm<sup>-3</sup></b>	<b>Classificação textural</b>
Irigada	0-20	598	81	321	2,56	argilosa
Irigada	20-40	597	85	318	2,62	argilosa
Não irrigada	0-20	435	139	426	2,57	argilosa
Não irrigada	20-40	433	136	431	2,75	argilosa

\*Densidade de partículas (Dp)

Os atributos químicos da fertilidade do solo (pH, P, K, Ca, Mg, Mn, B, Zn, Cu, Fe, H+Al, SB, M.O., CTC e V%) da área irrigada e não irrigada (Tabela 4) foram determinados no laboratório do IAC, de acordo com a metodologia descrita em Rajj et al. (2001).

Tabela 4. Caracterização da fertilidade do solo das áreas irrigada e não irrigada.

Identificação	Prof.	M.O.	pH	P resina	B	Cu	Fe	Mn	Zn	K+	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	SB	CTC	V	CE
	m	g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>	-----mg dm <sup>-3</sup> -----						-----mmolc dm <sup>-3</sup> -----				%	dS m <sup>-1</sup>		
Área irrigada	0,2	28	6,6	532	0,95	8,3	28	17,4	18	3,4	186	26	14	215,4	229,4	94	0,3
Área irrigada	0,4	18	6,8	315	1,03	8,2	30	11,4	7,5	3,3	125	20	14	148,3	162,3	91	0,3
Área não irrigada	0,2	23	6,1	61	0,51	18,7	35	5,1	3,4	1,8	53	13	23	67,8	90,8	75	0,4
Área não irrigada	0,4	25	5,6	26	0,53	3,2	42	4,5	1,8	2,7	47	12	33	61,7	94,7	65	0,2

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); boro (B) hidrogênio + alumínio (H+Al); Ferro (Fe); cobre (Cu); cálcio (Ca); Soma de bases (SB); Capacidade de troca de cátions (CTC); condutividade elétrica (CE), zinco (Zn); manganês (Mn).

Observa-se que o teor de fósforo (P resina) é substancialmente superior na área irrigada, com valores de 532 e 315 mg dm<sup>-3</sup> na profundidade de 0,2 m e 0,4 m, respectivamente, em contraste com 61 e 26 mg dm<sup>-3</sup> na área não irrigada. De acordo com o IAC (2022), os valores de P estão Muito Alto, exceto para área não irrigada na profundidade de 0,4 m. Os valores elevados de P estão relacionados a altas aplicações de fosforo na região, como relatado pelo produtor.

Os teores de potássio (K<sup>+</sup>) foram semelhantes em ambas as áreas, enquanto o zinco (Zn) foi mais elevados na área irrigada, especialmente na profundidade de 0,2 m. Em contrapartida, a área não irrigada apresenta valores relativamente maiores de ferro (Fe), enquanto o manganês (Mn) apresentou teores mais elevados na área irrigada. O teor de Cu na área não irrigada na profundidade de 0,2 m foi maior que na área irrigada devido à alta aplicação de produtos fitossanitários a base de cobre como calda bordalesa, como relatado pelo produtor. De acordo com o IAC (2022), o valor do Cu e Fe, em ambas as áreas, estão altos.

No que se refere aos cátions trocáveis, nota-se que cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) apresentam valores mais elevados na área irrigada, sobretudo na profundidade de 0,2 m (186 e 26 mmolc dm<sup>-3</sup>, respectivamente), em comparação à área não irrigada (53 e 13 mmolc dm<sup>-3</sup>). Esse comportamento se reflete diretamente na soma de bases (SB) e na capacidade de troca catiônica (CTC), que também são superiores na área irrigada. Conseqüentemente, a saturação por bases (V%) atinge valores elevados (94% e 91%), caracterizando um solo com alta fertilidade química nessa condição (IAC, 2022). Os valores elevados de cálcio estão associados a alta aplicação de calcário na área de estudo.

Por outro lado, a área não irrigada apresenta maiores valores de H+Al, especialmente na camada mais profunda (33 mmolc dm<sup>-3</sup>), indicando maior acidez potencial e menor disponibilidade de bases. Isso se reflete em menores valores de SB, CTC e saturação por bases (75% e 65%), evidenciando um ambiente menos favorável ao desenvolvimento das culturas.

Os valores de pH mostram-se ligeiramente mais elevados na área irrigada, variando entre 6,6 e 6,8, enquanto na área não irrigada situam-se entre 5,6 e 6,1, indicando valores adequados de pH para ambas as áreas. Já a condutividade elétrica (CE) permanece baixa em ambas as condições, indicando baixa salinidade.

### 3.4 Coeficiente de uniformidade de irrigação

A avaliação do sistema de irrigação por microaspersão foi realizada em agosto de 2025, selecionando o setor mais próximo aos sensores de solo e planta. A determinação da uniformidade de distribuição de água de irrigação por microaspersão seguiu a normativa NBR 15.886-3 da ABNT (2022), durante uma hora de funcionamento da irrigação.

Os instrumentos utilizados para avaliação do sistema de irrigação foram os coletores com hastes de alumínio, provetas graduadas em mililitros, cronômetros, trena métricas e manômetro de glicerina.

Na área foi marcada uma malha de coletores de 100 m<sup>2</sup> (10x10m), com 100 coletores de 8,6 cm de diâmetro, espaçados equidistantes a 0,9 m e a 0,6 m de altura. O volume de água contido em cada coletor foi medido utilizando provetas graduadas de 500 ml e 100 ml. Antes de iniciar o teste de uniformidade, colocou-se um coletor com 100 ml de água para monitorar a evaporação e outro coletor para coleta de precipitação.

Durante a avaliação foi realizada a medição da vazão ao longo de duas linhas laterais, nas extremidades do setor irrigado, seguindo os microaspersores localizados no início, 1/3, 2/3 e final da linha de irrigação.

Para determinar a vazão foi realizada a coleta do volume de água aplicado pelo microaspersor durante o período de 30 segundos, com três repetições para cada microaspersor, sendo a medição do volume feita com auxílio de uma proveta. A pressão de operação do sistema de irrigação foi monitorada através de um manômetro de glicerina, no início e ao final das linhas laterais.

Com base nos dados coletados foram determinados o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição – CUD (equação 2); o Coeficiente Uniformidade de Christiansen – CUC (equação 3); e o Coeficiente De Uniformidade Estatístico – CUE (equação 4).

$$CUD = 100 \cdot \frac{X_{25}}{\bar{X}} \quad (2)$$

Em que:

CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição;

$\bar{X}$  = média dos volumes dos coletados, em mm;

$\bar{X}_{25}$  – Média dos 25% menores volumes coletados, em mm.

$$CUC = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \right] \quad (3)$$

Em que:

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen;

$\bar{X}$  = média dos volumes coletados, em mm;

$X_i$  – média das 25% menores volumes coletados, em mm;

n – número de observações.

$$CUE = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{S_d}{\bar{X}} \right] \quad (4)$$

Em que:

CUE - Coeficiente de Uniformidade Estatístico;

Sd - desvio padrão dos valores do volume coletado, em mm;

$\bar{X}$  = média dos volumes coletados, em mm.

### 3.5 Monitoramento de solo-planta-clima

Para o monitoramento das condições hídricas das plantas, o desenvolvimento da videira foi dividido em seis estádios fenológicos, considerando dias após a poda (DAP) conforme mostra a Tabela 5, assim descritas: período de brotação, de 15 até 25 DAP; brotação e florescimento, de 26 até 75 DAP; crescimento do fruto, de 76 até 116 DAP; emborrachamento ou amolecimento do fruto, de 117 até 136 DAP; maturação e colheita, de 137 até 243 DAP; e repouso fenológico, de 244 a 365 DAP, completando o ciclo da cultura.

Tabela 5. Estádios fenológicos da videira.

<b>Fase fenológica</b>	<b>Estádio fenológico</b>	<b>DAP</b>	<b>Kc</b>
<b>I</b>	Brotação	15 a 25	0,65
<b>II</b>	Brotação e florescimento	26 a 75	0,8
<b>III</b>	Crescimento do fruto	76 a 116	1,12
<b>IV</b>	Emborrachamento ou amolecimento do fruto	117 a 136	1,12
<b>V</b>	Maturação e colheita	137 a 243	0,7
<b>VI</b>	Repouso fenológico	244 a 365	Sem irrigação

\*DAP- Dias Após o Poda; Kc- coeficiente da cultura. Fonte: Soares e Costa (2000) (adaptado pelos autores)

### 3.5.1 Monitoramento agroclimatológico

O balanço hídrico mensal da série histórica foi obtido com base em uma série de dados da FAO, 1993 (período de 1971 a 2000) e do INMET (período de 2000 a 2023). As principais variáveis meteorológicas adquiridas foram: temperatura máxima diária média, em °C; temperatura mínima diária média, em °C, umidade relativa máxima, em %; umidade relativa mínima, em %, velocidade média do vento, em m.s<sup>-1</sup>, radiação solar média, em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, precipitação, em mm.dia<sup>-1</sup>.

Para a elaboração do balanço hídrico (BH) dos anos de 2024 e 2025, utilizaram-se dados meteorológicos provenientes das estações do INMET e do CIIAGRO, com registros em intervalos de uma hora e de 20 minutos, respectivamente, durante o estágio de repouso fenológico da cultura. As estações automáticas se encontram a uma distância de aproximadamente 9,68 quilômetros da área irrigada. Posteriormente, foi instalada uma estação meteorológica automatizada da marca Campbell, a partir da qual passaram a ser coletados os dados climatológicos nas demais fases fenológicas. As variáveis meteorológicas coletadas foram: temperatura máxima diária média, em °C; temperatura mínima diária média, em °C; umidade relativa máxima, em %; umidade relativa mínima, em %; velocidade média do vento, em m.s<sup>-1</sup>; radiação solar média, em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>; precipitação, em mm. A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith, em mm.dia<sup>-1</sup> (equação 5).

Para a estimativa do balanço hídrico climatológico (BHC), adotou-se o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), o qual possibilita a determinação do armazenamento de água no solo (ARM), da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), da deficiência hídrica (DEF) e do excedente hídrico (EXC). A aplicação do método requer, como dados de entrada, as médias climatológicas de precipitação acumulada (P) e de evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), além da capacidade de água disponível no solo (CAD). Para o presente estudo, adotou-se o valor de CAD igual a 42,8 mm, determinado a partir da curva de retenção de água no solo.

A evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (Allen et al., 1998), conforme apresentado na Equação 5, utilizando dados meteorológicos obtidos da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025) e do sistema CIIAGRO para a fase de repouso fenológico. Para as demais fases da cultura, utilizaram-se dados provenientes de estação meteorológica instalada na área irrigada.

$$ETp = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (5)$$

Em que:

ETp – evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

Rn - é o saldo de radiação à superfície (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

G - é fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

T - é a temperatura média do ar a 2,0 m de altura (°C);

U<sub>2</sub> - é a velocidade do vento a 2,0 m de altura (m s<sup>-1</sup>);

e<sub>s</sub> - é a pressão de saturação de vapor (kPa);

e<sub>a</sub> - é a pressão de atual de vapor (kPa);

(e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>) - é o déficit de pressão de vapor (kPa);

Δ - é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>);

γ - é a constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

O cálculo do balanço hídrico foi realizado de forma sequencial ao longo dos meses, considerando inicialmente o solo na condição de capacidade de campo. A diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (P – ETp) foi utilizada como base para a atualização das variáveis do balanço. Quando P ≥ ETp, assumiu-se que a evapotranspiração real (ETr) é igual à evapotranspiração potencial (ETr = ETp), ocorrendo reposição da água no solo até o limite da CAD; valores excedentes foram contabilizados como EXC. Em contrapartida, quando P < ETp, ocorreu depleção do armazenamento hídrico, resultando na redução do conteúdo de água no solo e, após o esgotamento da CAD, na ocorrência de deficiência hídrica (DEF).

Durante os períodos de déficit hídrico, a evapotranspiração real (ETr) foi estimada em função da disponibilidade de água no solo, sendo inferior à ETp. O cálculo do armazenamento de água no solo (ARM) foi realizado por meio da relação exponencial proposta por Thornthwaite e Mather:

$$Armaz = CAD * e^{\left(\frac{neg.acum}{CAD}\right)} \quad (6)$$

Onde:

Armaz – armazenamento de água no solo;

CAD – Capacidade de Água Disponível;

Neg.acum – corresponde ao negativo acumulado, obtido pela soma sequencial dos valores negativos de (P – ETp). O negativo acumulado representa a intensidade do déficit

hídrico ao longo do tempo, sendo reiniciado quando ocorre reposição hídrica suficiente para que o solo retorne à capacidade de campo.

A evapotranspiração real (ETr), em condições de restrição hídrica, foi calculada a partir da relação entre a precipitação e a variação do armazenamento de água no solo, enquanto a deficiência hídrica (DEF) foi obtida pela diferença entre ETp e ETr (DEF = ETp – ETr). Os cálculos foram realizados em planilhas eletrônicas, permitindo a obtenção dos valores mensais e acumulados das variáveis do balanço hídrico, bem como a caracterização do regime hídrico da área de estudo.

A CAD do solo foi calculada através da equação 7:

$$CAD = (\theta_{PMP} - \theta_{CC}) * Z \quad (7)$$

em que,

CC - Umidade do solo à capacidade de campo para o potencial mátrico de -10 kPa,  $m^3 m^{-3}$ ;

PMP - Umidade do solo no ponto de murchamento permanente para o potencial mátrico de - 1500 kPa,  $m^3 m^{-3}$ , e

Z – Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, 400 mm.

### **3.5.2 Umidade do solo, condutividade elétrica, temperatura do solo e temperatura da copa**

O monitoramento da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo bem como a temperatura da copa foi realizado em tempo real com captura de dados a cada 20 minutos abrangendo os estádios fenológicos da videira no período de 18 de março de 2025 a 07 de janeiro de 2026.

Para monitorar a temperatura, umidade e condutividade elétrica (CE) do solo, foram instalados cinco sensores, modelo Teros 12, marca Meter Group, na área irrigada e da mesma forma na área não irrigada. Três sensores foram instalados na profundidade de 20 centímetros, sendo um deles instalado na entrelinha de plantio e dois na linha de plantas, no mesmo perfil foram instalados dois sensores à 40 centímetros. Os sensores foram conectados ao Datalogger (modelo ZL6), que foi configurado para registrar e armazenar a cada vinte minutos durante todo o ciclo da videira.

Para a determinação da temperatura da copa ( $T_c$ ) foi instalado em cada área de estudo um termômetro infravermelho (IRR), modelo SIL411 da Apogge Instruments, o qual foi conectado ao mesmo Datalogger. Os IRRs foram instalados nos dias 11 e 12 de março de 2025, no sentido leste-oeste, a 50 centímetros acima da copa da videira e com ângulo de visada de  $30^\circ$  com intervalo de leitura de vinte minutos.

### **3.5.3 Condutância estomática**

As avaliações de condutância estomática foram realizadas no estágio fenológico de repouso fenológico, de brotação e florescimento e de crescimento do fruto.

As medições de condutância estomática foram realizadas com o auxílio de um porômetro foliar (modelo SC-1, Meter Group). As avaliações foram conduzidas em dez plantas marcadas, tanto na área irrigada e não irrigada, sendo padronizadas as leituras em folhas localizadas na porção superior da planta (no terceiro ou quarto ramo, a partir do meristema apical em direção à base). A identificação e marcação das plantas foram realizadas em 12 de março de 2025, seguindo os eixos leste-oeste e norte-sul, em ambas as áreas experimentais, com o intuito de garantir representatividade espacial da condutância estomática. Foram selecionadas folhas jovens, expostas diretamente à radiação solar, sem sombreamento e sem sintomas aparentes de doenças.

Considerando a localização dos estômatos na videira, todas as leituras foram realizadas na face abaxial (inferior) das folhas, portanto, as leituras foram realizadas com a face abaxial para cima pelo porômetro foliar. Os valores de condutância estomática foram registrados em  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

As medições de condutância estomática foram efetuadas nos horários de 9h, 12h e 15h; em um intervalo máximo de uma hora para a realização das leituras em dez plantas em cada área experimental.

### **3.5.4 Índice de estresse hídrico da cultura**

O índice de estresse hídrico da cultura (CWSI - Crop Water Stress Index) foi determinado conforme a metodologia proposta por Idso et al. (1981), apresentada na equação 8. Essa metodologia considera a diferença de temperatura da copa ( $T_c$ ), a qual foi obtida por

termômetro infravermelho (IRR) e a temperatura média do ar ( $T_a$ ), obtida pela estação meteorológica, ambas obtidas em intervalos de vinte minutos para os diferentes estádios fenológicos da videira.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}} \quad (8)$$

Em que:

CWSI - sigla em inglês: Crop Water Stress Index que é o índice de estresse hídrico da cultura;

$T_c$  – temperatura da copa ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_a$  – temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

$(T_c - T_a)$  – diferença entre a temperatura da copa e a temperatura do ar atual.

$(T_c - T_a)_{LL}$  – linha base de temperatura inferior, correspondente à cultura sem déficit hídrico (cultura bem irrigada);

$(T_c - T_a)_{UL}$  – linha de base de temperatura superior, correspondente à cultura com estresse hídrico.

Os valores do CWSI variam de 0 a 1, em que valores próximos de 0 indicam condições adequadas de suprimento hídrico à cultura, enquanto valores próximos de 1 refletem elevado nível de estresse hídrico. Os limites superior e inferior do índice de estresse hídrico foram determinados com base em dados obtidos nas áreas de estudo, correspondentes as áreas irrigada e não irrigada, cultivadas com uva fina de mesa. Para a elaboração das linhas de base, foram coletados dados meteorológicos visando à determinação do déficit de pressão de vapor, calculado a partir da temperatura e da umidade relativa do ar, sendo essas variáveis obtidas por meio de uma estação meteorológica instalada na área irrigada.

O déficit de pressão de vapor (VPD) foi calculado em função da pressão de saturação de vapor d'água no ar e da umidade relativa do ar, conforme a equação 9.

$$VPD = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} - \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} * \frac{RH}{100} \quad (9)$$

Em que:

VPD – Déficit de Pressão de Vapor (kPa);

$e_s$  - pressão de vapor de saturação (kPa);

$e_a$  - pressão parcial de vapor do ar (kPa);

$e^{\circ}$  - pressão de saturação de vapor em determinada temperatura do ar (kPa);

RH – Umidade Relativa do ar (%);

Tmax – Temperatura máxima do ar (°C);

Tmin – Temperatura mínima do ar (°C).

De acordo com Idso et al. (1981), o limite inferior  $(T_c - T_a)_{LL}$ , também chamada de linha de base sem estresse hídrico (NWSB) é obtido pela regressão linear de  $(T_c - T_a)$  em função do VPD conforme a equação 10. O limite superior foi obtido pela extrapolação do NWSB para um VPD negativo, que compensa a diferença de pressão de vapor residual devido a  $(T_c - T_a)$  em  $VPD = 0$  (equação 11):

$$(T_c - T_a)_{LL} = a + b VPD \quad (10)$$

$$(T_c - T_a)_{UL} = a + b [SPV(T_a) - SPV(T_a + a)] \quad (11)$$

Em que:

a - intercepto da regressão linear;

b - inclinação da regressão linear;

SPV - diferença entre a pressão de vapor de saturação avaliada à temperatura do ar ( $T_a$ ) e a temperatura do ar mais elevada igual à temperatura do ar mais “a” (ou seja,  $T_a + a$ ) (kPa).

Os dados utilizados para obtenção do NWSB foram filtrados conforme Silveira et al. (2024), uma vez que a radiação líquida e a velocidade do vento interferem na determinação do modelo. Para modelagem do comportamento das linhas de base superior os filtros consideraram o período entre 10h e 17h e valores de VPD maior que 3 kPa. Enquanto que para modelagem das linhas de base inferior para cada estágio fenológico, os dados foram filtrados considerando o período entre 10h e 17h, valores de VPD menor que 2 kPa, radiação solar incidente entre 71 e 534  $W m^{-2}$ , a velocidade do vento foi restrita a valores inferiores a 6  $m s^{-1}$  e ausência de precipitação para todos estágios fenológicos.

EMBRAPA (2009) classifica o índice de estresse hídrico da cultura entre 0 e 0,1 como ótimas, 0,1 e 0,2 favoráveis, 0,2 e 0,4 adequadas, 0,4 e 0,6 Razoáveis, 0,6 e 0,8 desfavoráveis, 0,8 e 1 críticas.

### 3.6 Estimativa de produtividade e eficiência do uso da água

A eficiência do uso da água (EUA) para produção de biomassa foi estimada através da razão entre a produtividade de frutos da videira e o volume total de água aplicada na área irrigada, conforme a equação 12.

$$EUA = \frac{P}{Vt} \quad (12)$$

Onde:

EUA – Eficiência no uso da água ( $\text{kg m}^{-3}$ );

P – Produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

Vt – Volume total aplicado no ciclo ( $\text{m}^{-3} \text{ha}^{-1}$ ).

A produtividade foi estimada em função do número de cachos por planta contados na fase de crescimento/emborrachamento de frutos, após a fase de raleio dos cachos, realizada da mesma forma na área irrigada e na área não irrigada. O raleio consiste em ajustar a carga produtiva da planta por meio da remoção de uvas excedentes, doenças ou algum dano físico, garantindo melhor distribuição de assimilados e maior uniformidade no desenvolvimento dos frutos. Foram contabilizados o número de cachos em 10 plantas de cada área experimental, com o número de cachos e o peso médio de cachos obtido de uma amostragem representativa de cinco cachos durante o ciclo produtivo de 2026 obteve a produtividade por planta. A poda da área irrigada foi ocorreu no dia 19 de agosto de 2025, enquanto a poda da área não irrigada ocorreu no dia 26 de setembro de 2025.

Para o calcular a lâmina simulada no ciclo da videira foi necessário calcular primeiramente evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>). A quantidade de água requerida para cultura para fins de manejo e planejamento e manejo da irrigação, foi estimada em função da evapotranspiração da cultura por meio da expressão:

$$ETc = ET_o * Kc \quad (13)$$

Onde:

ET<sub>c</sub> – Evapotranspiração da cultura, em mm dia;

ET<sub>o</sub> – Evapotranspiração de referência ou também denominada de evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), em mm dia;

$K_c$  - coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) representa as características específicas do cultivo utilizado, como fração da área coberta pela cultura, altura do dossel e cobertura do solo, entre outras.

O manejo da irrigação foi realizado com base na reposição hídrica de acordo com a demanda da cultura e dados climáticos e a disponibilidade de água no perfil explorado pelas raízes. Para isso, foi necessário calcular a CAD (equação 7), determinada a partir dos parâmetros físicos do solo, obtidos por meio da curva de retenção de água.

A lâmina máxima de irrigação a ser aplicada foi determinada calculando-se a Irrigação Real Necessária (IRN) e a Irrigação Total Necessária (ITN). A IRN foi obtida pela equação 14.

$$IRN = ARM_{m\acute{a}x} - ARM_{cr\acute{i}t} \quad (14)$$

Em que,

IRN – Irrigação real necessária, mm

$ARM_{m\acute{a}x}$  – Armazenamento máximo de água no solo, mm

$ARM_{cr\acute{i}t}$  – Armazenamento crítico de água no solo, mm

A ITN dada pela quantidade de água que deve ser retirada para que a planta receba a IRN, considerando as perdas no processo de irrigação. A ITN foi calculada considerando-se a eficiência do sistema de irrigação ( $E_f$ ), da seguinte forma (equação 16):

$$ITN = \frac{IRN}{E_f} \quad (16)$$

em que:

ITN – Irrigação Total Necessária (mm);

IRN – Irrigação Real Necessária (mm);

$E_f$  - é a eficiência de aplicação do sistema (adimensional), adotou-se 0,85.

A fração de água disponível passível de ser consumida sem causar estresse à cultura, denominada fração de depleção ( $f$ ), foi adotada conforme recomendações para a videira. O momento de irrigar foi definido quando o armazenamento de água no solo atingiu valores inferiores ao limite de CRA, caracterizando a necessidade de reposição hídrica. Dessa forma, a Capacidade Real de Água (CRA) foi determinada por:

$$CRA = CAD * f \quad (15)$$

em que:

CRA – Capacidade Real de Água, em mm;

f – Fator de disponibilidade, 0,5 para fins de cálculo.

### 3.7 Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando os softwares Microsoft Excel®, Sisvar® e GNU Octave®. O CWSI foi calculado em todas os estádios fenológicos da videira utilizando dados provenientes da estação meteorológica e do sensor de temperatura do dossel. A partir dos dados do CWSI foram realizadas as regressões com a umidade do solo.

A análise da condutância estomática foi realizada por análise de variância (ANOVA) considerando os seguintes fatores: estádios fenológicos, horário de leitura e área irrigada e não irrigada, permitindo avaliar a significância das relações entre as variáveis analisadas. A produtividade foi analisada pelo teste T na área irrigada e não irrigada.

A avaliação do desempenho da linha de base inferior foi realizada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), apresentados nas Equações 11 e 12, respectivamente. Esses indicadores possibilitaram avaliar tanto a capacidade explicativa do modelo quanto a magnitude dos desvios entre os valores observados e estimados. A aplicação de outliers ou a média dos dados foi realizada para melhorar a qualidade do ajuste quando necessário.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

Em que:

$y_i$  – valor de Tc-Ta medido;

$y_m$  – média dos valores Tc-Ta medido;

$\hat{y}_i$  – valor  $(Tc-Ta)_{LL}$  estimado;

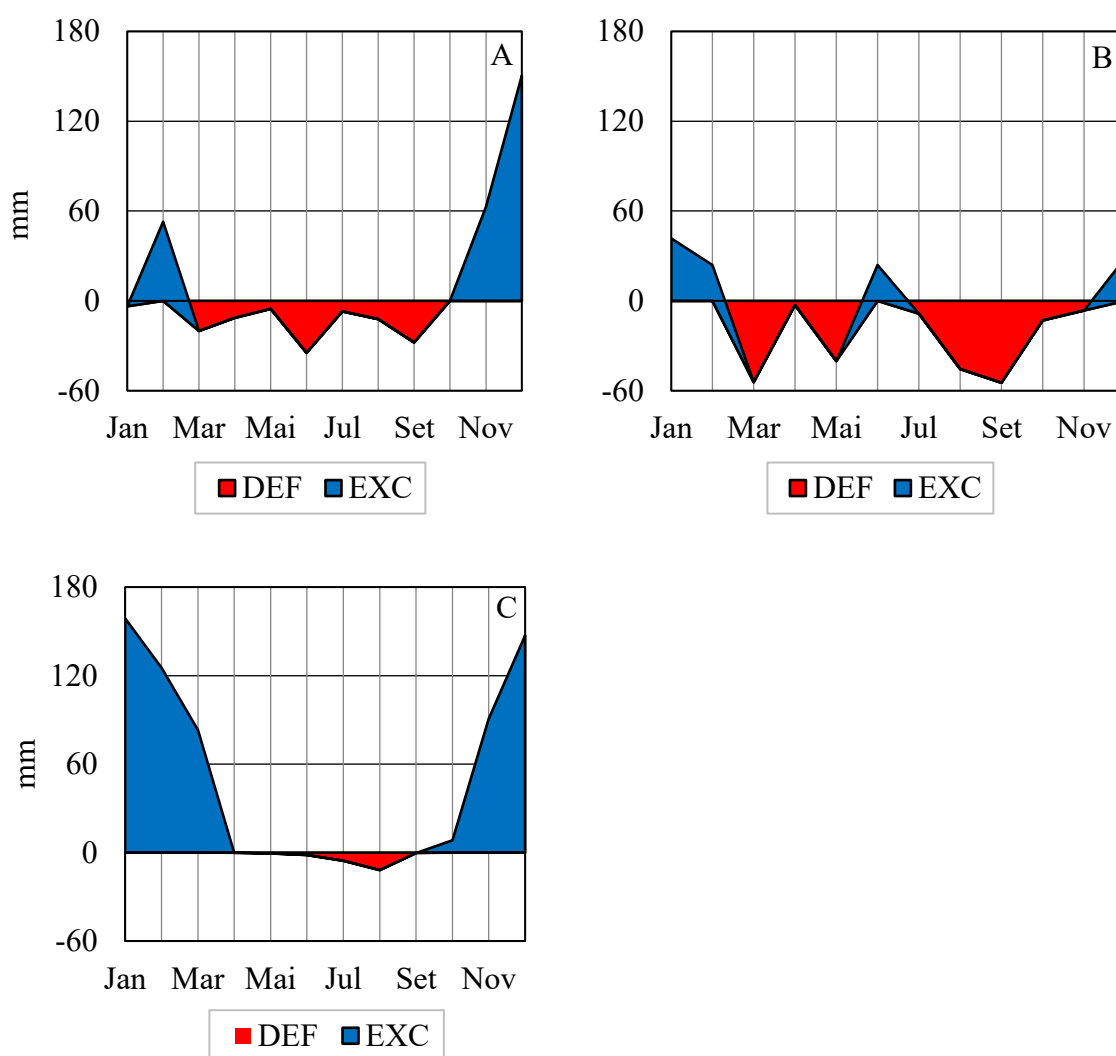
n - Número de observações.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas considerando um nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), garantindo rigor na interpretação dos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Balanço hídrico de São Miguel Arcanjo

A Figura 3C apresenta o balanço hídrico da série histórica para o município de São Miguel Arcanjo (SP). Observa-se que o déficit hídrico ocorre predominantemente entre abril e setembro, totalizando aproximadamente 20 mm anuais. Em contrapartida, o excesso hídrico concentra-se entre setembro e abril, atingindo cerca de 613 mm por ano, o que caracteriza o regime climático típico da região, com estação chuvosa bem definida e período seco concentrado no inverno.



**Figura 3.** Balanço hídrico para São Miguel Arcanjo-SP com dados providos da estação meteorológica da FAO, CIAGRO, INMET e Campbell: A) Balanço hídrico de 2024; B) Balanço hídrico de 2025; C) Balanço hídrico de série histórica. DEF – deficiência; EXC – excedente.

Em relação ao ano de 2024 (Figura 3A), a temperatura máxima média anual foi de 21,55 °C e a mínima média anual de 12,41 °C. Houve excesso hídrico entre janeiro e março e entre outubro e dezembro, totalizando 266 mm ao longo do ano. Por outro lado, o déficit hídrico estendeu-se de março a outubro, com valor acumulado de 122 mm. Assim, oito dos doze meses de 2024 apresentaram déficit hídrico, evidenciando distribuição irregular da disponibilidade de água ao longo do ano nos meses de janeiro, março a outubro.

No mesmo ano, foram registrados 1.054,93 mm de precipitação, evapotranspiração potencial (ETp) de 908,85 mm e evapotranspiração real (ETr) de 813,93 mm (Figura 4). A maior evapotranspiração de referência (ETo) ocorreu em janeiro, com 127 mm, enquanto o menor valor foi observado em outubro, com 37 mm. O mês de dezembro apresentou a maior precipitação mensal, totalizando 244 mm. Em contraste, junho registrou a menor ETr do ano, com 17,9 mm, refletindo as condições climáticas mais amenas e a menor disponibilidade hídrica nesse período.

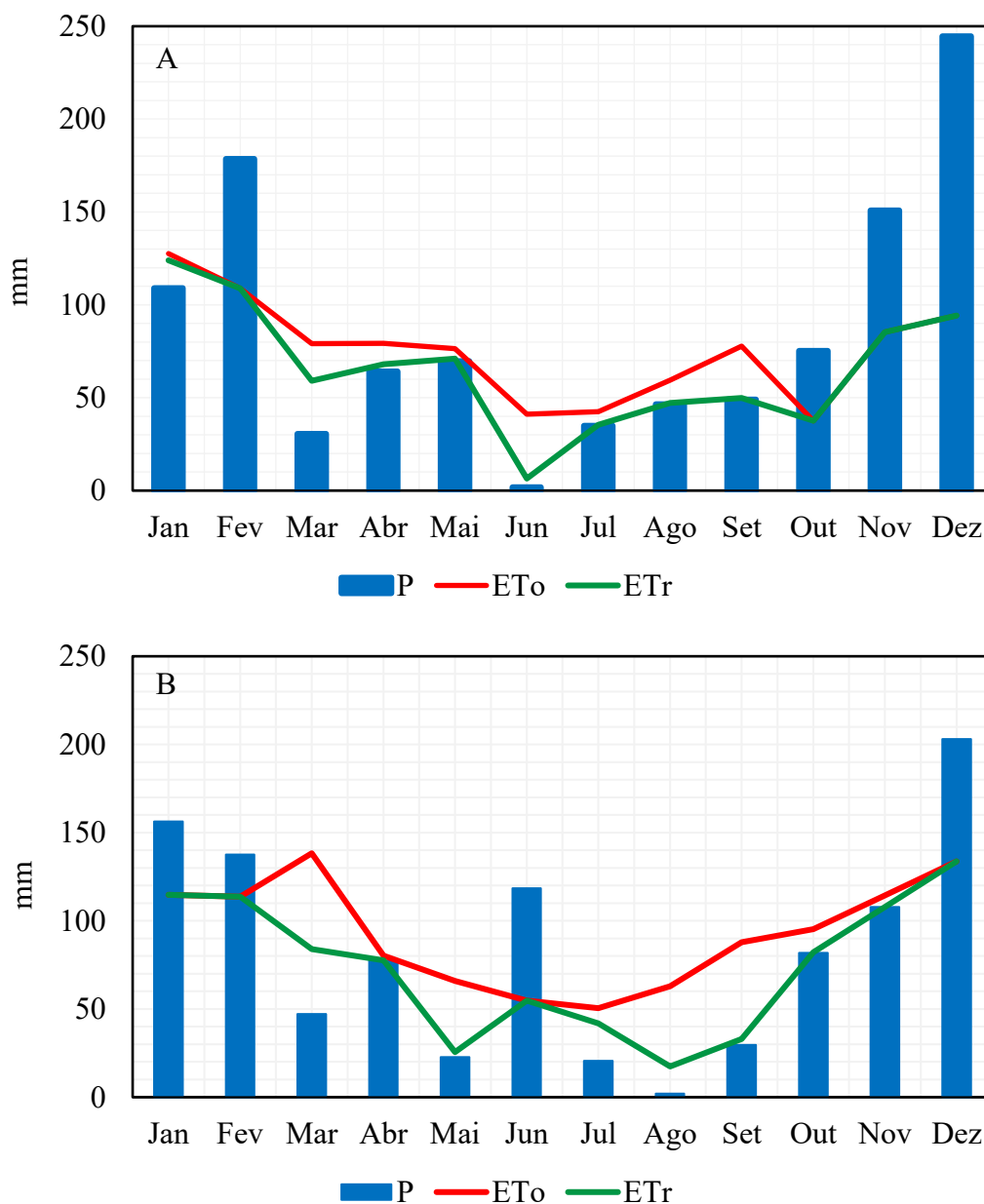
Observou-se ainda que, nos meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro de 2024, os valores de ETr foram iguais ou muito próximos aos de ETo. Esse comportamento indica que a água disponível no solo foi suficiente para atender à demanda atmosférica, evidenciando ausência ou mínima restrição hídrica nesses meses (Figura 4A).

Para o ano de 2025 (Figura 3B), as temperaturas médias anuais foram de 21,91 °C para a máxima e 17,21 °C para a mínima. O mês de janeiro apresentou a maior precipitação do ano, com 156,40 mm. O mês de junho registrou precipitação acumulada atípica de 118,4 mm, resultando em excesso hídrico de 23,9 mm, condição incomum para esse período, normalmente caracterizado por baixos índices pluviométricos.

O balanço hídrico de 2025 indicou oito de doze meses em déficit hídrico no ano com 225,8 mm e 118 mm de excedente, cada vez demonstrando a necessidade de irrigação em meses de déficit hídrico. A precipitação anual foi de 1004,40 mm, a ETp totalizou 1112,13 mm e a ETr atingiu 886,12 mm (Figura 4B). Na Figura 4B é possível observar que nos meses de janeiro, fevereiro, abril, junho e dezembro os valores de ETr e ETo são iguais, significando que nesses meses o solo basicamente não apresentou nenhuma ou pouca restrição hídrica.

A ETp média mensal em 2024 foi de 75,74 mm, sendo o menor valor encontrado de 37,5 mm em julho e o maior valor foi de 127,56 mm em janeiro, enquanto a ETp média mensal para 2025 foi de 92,68 mm, o menor valor foi encontrado no mês julho com 50,46 mm e maior valor no mês de março com 138,29 mm (Figura 4A). O valor médio mensal de ETr em 2024

foi de 65,6 mm, os valores mensais variaram de 35,3 mm a 124,0 mm para julho e janeiro, respectivamente. Em 2025, ETr apresentou um valor médio mensal de 73,8 mm, o mês de agosto apresentou o menor valor de ETr com 17,4 mm e dezembro maior valor com 133,7 mm.



**Figura 4.** Variação dos dados mensais de Precipitação (P), evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração real (ETr) do DAT de São Miguel Arcanjo: (A) 2024; (B) 2025.

Os balanços hídricos de 2024 e 2025 e da série histórica evidenciam alterações relevantes no regime pluviométrico local. A maior temperatura média do ar foi observada em janeiro de 2024 (29,03°C), enquanto a menor ocorreu em junho (6,67°C) de 2024. Esses valores sugerem possível ocorrência de estresse térmico nas videiras, uma vez que a faixa considerada ideal para a cultura situa-se entre 12 °C e 22 °C (Piña-Rey et al., 2021), o que pode aumentar o

risco de redução da produtividade. Em relação à série histórica, observou-se menor duração do período chuvoso, que se concentrou nos meses da extremidade do ano, além de maior número de meses com déficit hídrico nos anos avaliados em relação a série histórica. Esses resultados indicam que há irregularidade na distribuição temporal das precipitações em relação ao comportamento histórico, o que reforça a necessidade de estratégias adequadas de manejo da irrigação na região.

#### 4.2 Coeficiente de uniformidade de irrigação

Durante a análise do teste de uniformidade de irrigação a velocidade do vento foi de  $1,92 \text{ m.s}^{-1}$  com direção do vento de  $133,27^\circ$ , sem precipitação registrada, umidade relativa de 91,65% e evaporação registrada durante o teste de apenas 1 milímetro. O teste foi realizado em ambiente aberto e atendendo à recomendação de velocidade máxima de  $2,2 \text{ m.s}^{-1}$ , de acordo com a NBR 15.886-3 (ABNT, 2022). Não foi possível obter as informações recomendadas pelos fabricantes dos microaspersores instalados na área por não apresentar a marca nos mesmos e pelo produtor ter a informação do fabricante.

A partir dos volumes coletados em campo foi obtida a vazão dos microaspersores, em que a vazão do emissor na primeira linha lateral foi igual a  $63,26 \text{ L h}^{-1}$ , enquanto que na segunda linha lateral foi igual a  $63,95 \text{ L h}^{-1}$ , ou seja, a variação da vazão foi igual a 1,75% e 1,42% na primeira linha e na segunda linha, respectivamente. Os valores de variação da pressão encontrados ficaram abaixo de 10% do recomendado por Keller e Karmeli (1975), em emissores localizados nas extremidades, funcionando uniformemente.

O volume médio da aplicação dentro de uma hora de avaliação foi de uma lâmina média de  $5,43 \text{ mm.h}^{-1}$ .

A Tabela 6 apresenta os resultados de CUD, CUC e CUE para avaliação de desempenho do sistema de irrigação por microaspersão da área experimental.

Tabela 6. Resultados dos coeficientes de uniformidade de irrigação por microaspersão na área irrigada.

<b>IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO</b>	
CUD (%)	49,03
CUC (%)	68,06
CUE (%)	62,53

O sistema de irrigação por microaspersão apresentou os seguintes resultados para os coeficientes de uniformidade: CUD de 49,03%, CUC de 69,06% e CUE de 62,53%. Os coeficientes de uniformidade, de acordo com a classificação de Keller e Karmeli (1974), foram classificados como ruins, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, Coeficiente de Uniformidade de Distribuição e Coeficiente de Uniformidade Estatístico.

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>CUD (%)</b>	<b>CUC (%)</b>	<b>CUE (%)</b>
<b>Excelente</b>	> 90	> 84	90-100
<b>Bom</b>	80-90	68-84	80-90
<b>Razoável</b>	70-80	52-68	70-80
<b>Ruim</b>	60-70	36-52	60-70
<b>Inaceitável</b>	< 60	< 36	< 60

Fonte: Keller e Karmeli (1974).

Para Bernardo, Soares e Mantovani (2006), sistemas localizados por microaspersão, desde que bem projetados, apresentam CUD entre 80 e 90%. O resultado do CUD obtido na avaliação do sistema de irrigação na área irrigada indica que o sistema precisa de revisão hidráulica, como verificação de pressões de operação, limpeza dos emissores e nivelamento das linhas. Vieira et al. (2020) e Neto et al. (2024), avaliando sistemas de irrigação por gotejamento e aspersão convencional, respectivamente, em lavouras comerciais, também encontraram coeficientes classificados como ruins. Souza et al. (2005) descrevem que a perda de uniformidade da aplicação, geralmente, é causada pela manutenção inapropriada do sistema, acarretando perdas de até 60% da uniformidade. Segundo Mantovani *et al.* (2009), a uniformidade dos microaspersores é reduzida pelo tempo de uso do sistema, principalmente pela falta de manutenção preventiva do sistema de irrigação, dessa forma, comprometendo a uniformidade da lâmina aplicada, influenciando a eficiência do uso da água pelas plantas.

As medições de pressão de operação do sistema mantiveram-se estáveis em todos os pontos de coleta, apresentando o valor de 100 kPa, o que indica boa uniformidade na distribuição da pressão ao longo das linhas laterais. Entretanto, os resultados dos coeficientes de uniformidade sugerem que o sistema de irrigação apresenta problemas de desempenho na aplicação da irrigação na videira, geralmente, esses problemas estão relacionados a

entupimentos parciais dos emissores, falta de manutenção, diferenças topográficas no terreno e pressão de operação (Andrade et al., 2021). Os resultados obtidos por Vieira et al. (2020) corroboram a hipótese de que a pressão de operação foi um dos fatores que afetou o desempenho do sistema de irrigação, visto que as pressões resultantes dos sistemas variaram de 100 a 150 kPa para os sistemas avaliados pelos autores.

### 4.3 Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e umidade do solo

Os parâmetros das curvas de retenção de água no solo obtidas a partir de nove pontos de tensão, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980), estão apresentados na Tabela 8. Os parâmetros foram ajustados pelo conteúdo de água no solo e tensão pelo programa @RETC.

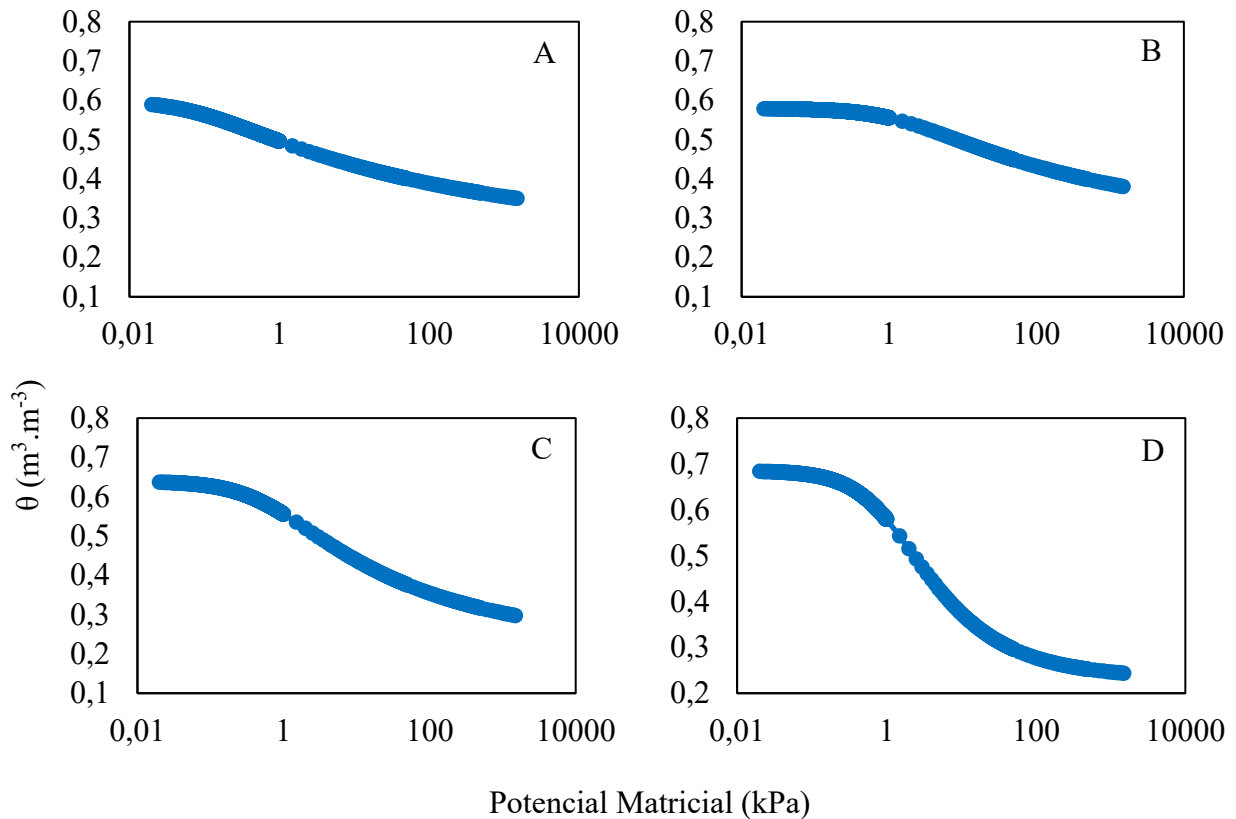
Tabela 8. Parâmetros do ajuste de Van Genuchten para as áreas irrigada e não irrigada nas profundidades de 0,20 e 0,40 metros.

<b>Identificação</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>n</b>	<b><math>\theta_r</math></b>	<b><math>\theta_s</math></b>	<b>m</b>	<b><math>\theta_{CC}</math></b>	<b><math>\theta_{PMP}</math></b>
Área irrigada prof. 0,20 m	13,63	1,07	0,266	0,600	0,129	0,392	0,329
Área irrigada prof. 0,40 m	0,76	1,08	0,285	0,580	0,148	0,432	0,351
Área não irrigada prof. 0,20 m	1,91	1,11	0,231	0,640	0,206	0,215	0,090
Área não irrigada prof. 0,40 m	0,91	1,23	0,233	0,690	0,417	0,277	0,236

Nos pontos de menor potencial matricial (tensões de -1, -3, -6, -10 e -30 kPa) a quantidade de água no solo é maior. Como pode-se observar na Figura 5, a diferença entre os parâmetros  $\theta_s$  e  $\theta_r$  foi maior na área não irrigada nas duas profundidades, indicando maior capacidade de armazenamento de água no solo na área não irrigada.

A capacidade de campo (CC) do solo foi determinada em -10 kPa, apresentando teor volumétrico médio de 0,392  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área irrigada na profundidade de 0,20 m, 0,432  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área irrigada na profundidade de 0,40 m, 0,215  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área não irrigada profundidade 0,20 m, 0,277  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área não irrigada profundidade 0,40 m, enquanto o ponto de murcha permanente (PMP), determinado a -1500 kPa, apresentou valor de 0,329  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área irrigada na profundidade de 0,20 m, 0,351  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área irrigada na profundidade de 0,40 m, 0,090

$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  área não irrigada profundidade 0,20 m e  $0,236 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área não irrigada profundidade 0,40 m.

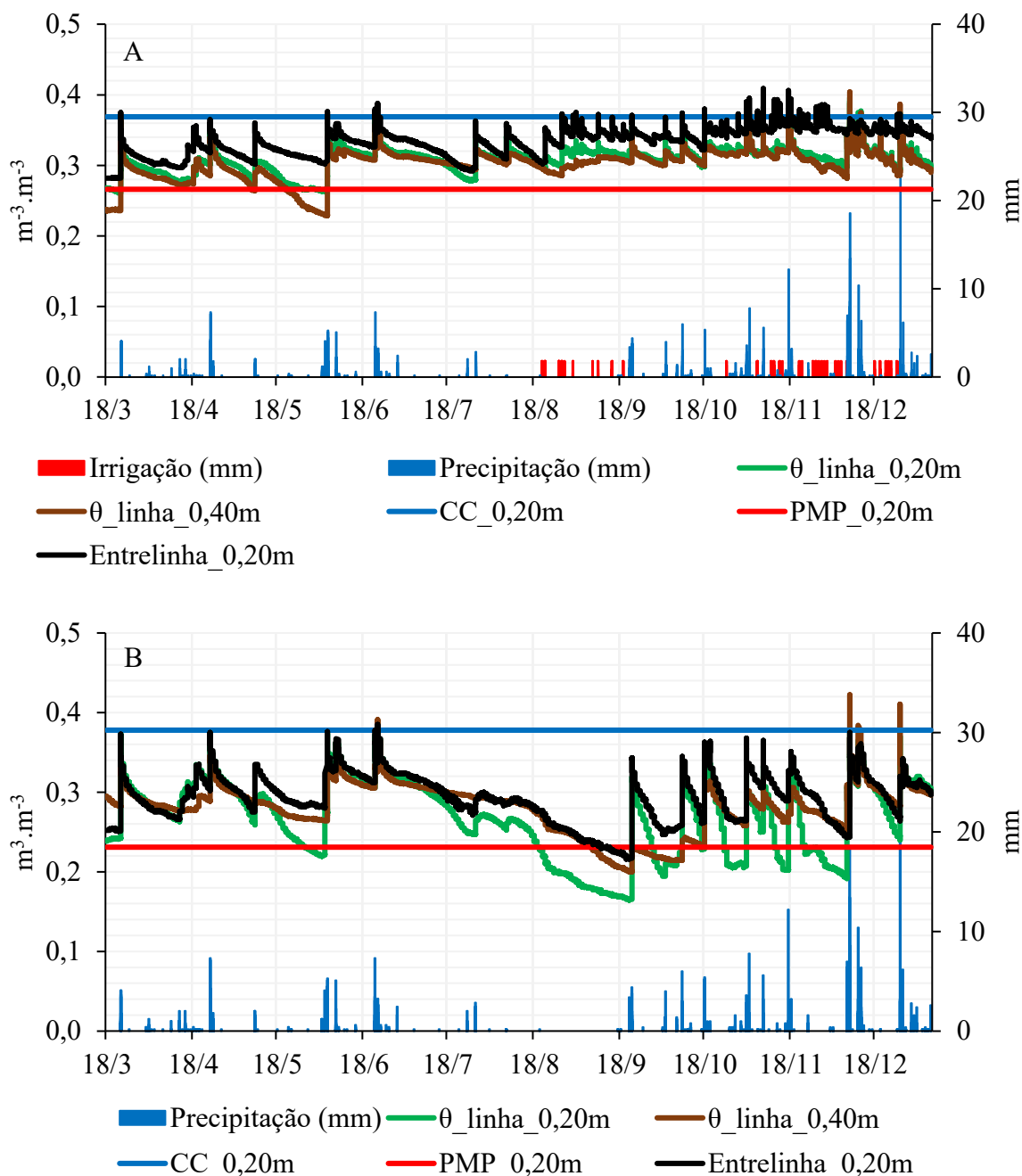


**Figura 5.** Ajuste de Van Genuchten: (A) área irrigada profundidade de 0,2 m; (B) área irrigada profundidade de 0,4 m; (C) área não irrigada profundidade de 0,2 m; (D) área não irrigada profundidade de 0,4 m.

A diferença entre os dois potenciais resultou em uma Disponibilidade Total de Água (DTA) de  $0,63 \text{ mm cm}^{-1}$  na área irrigada na profundidade de 0,2 m e  $0,81 \text{ mm cm}^{-1}$  na profundidade de 0,4 m, enquanto que na área não irrigada foi de  $1,25 \text{ mm cm}^{-1}$  e  $0,41 \text{ mm cm}^{-1}$ , respectivamente.

Os valores medidos de CC e PMP foram iguais a  $0,369$  e  $0,266 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área irrigada e  $0,378$  e  $0,231 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na área não irrigada, o que corresponde a uma Capacidade de Água Disponível (CAD) de 41,2 e 58,8 mm, respectivamente. Portanto, a área não irrigada consegue armazenar 42,7% mais água que a área irrigada.

A Figura 6 apresenta a variação da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 0,20 e 0,40 m, juntamente com os valores medidos da CC e PMP, no período de 18 de março de 2025 a 07 de janeiro de 2026. Também são demonstradas as entradas hídricas provenientes de irrigação e precipitação, permitindo interpretar o comportamento do solo nas áreas irrigada e não irrigada.



**Figura 6.** Umidade volumétrica do solo na profundidade de 0,20 e 0,40 m: (A) área irrigada e (B) área não irrigada.

Na área irrigada, a umidade volumétrica do solo variou entre 0,261 e 0,373  $m^3 \cdot m^{-3}$  na profundidade de 0,20 m e entre 0,229 e 0,373  $m^3 \cdot m^{-3}$  a 0,40 m (Figura 6A). Na área não irrigada (Figura 6B), os valores oscilaram de 0,219 a 0,390  $m^3 \cdot m^{-3}$  a 0,20 m e de 0,229 a 0,391  $m^3 \cdot m^{-3}$  a 0,40 m. De modo geral, observou-se maior variabilidade da umidade na ausência de irrigação, enquanto na área irrigada os valores permaneceram mais estáveis ao longo do período avaliado.

O comportamento da umidade foi semelhante entre as profundidades monitoradas com o sensor instalado na entrelinha, embora diferenças relevantes tenham sido registradas ao longo do ciclo fenológico. Durante o estágio de repouso fenológico, não houve aplicação de irrigação, sendo o fornecimento retomado apenas após a poda, realizada em 19 de agosto de 2025.

No mês de junho, verificou-se redução expressiva do conteúdo volumétrico de água no solo. Na profundidade de 0,20 m, o valor foi de  $0,266 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto a 0,40 m foi de  $0,229 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 6A), indicando condição de déficit hídrico, com valores próximos ao ponto de murcha permanente (PMP), tanto na área irrigada quanto na não irrigada. Esse comportamento está associado ao período de baixa precipitação característico desse estágio fenológico.

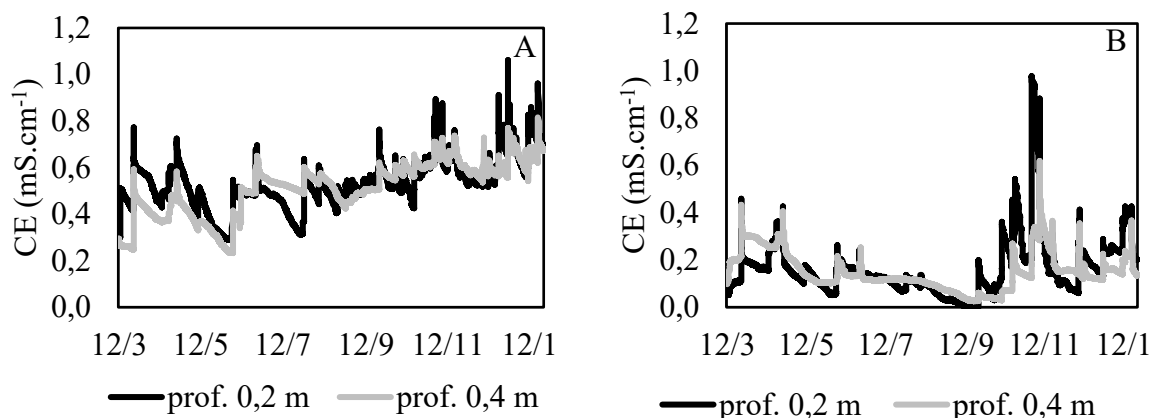
Na área não irrigada, a umidade do solo atingiu  $0,220 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  a 0,20 m de profundidade no mês de junho, valor que ultrapassou o PMP. Em contrapartida, a 0,40 m o conteúdo de água foi de  $0,281 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , evidenciando maior retenção hídrica nas camadas mais profundas do perfil. Ao longo dos diferentes estágios fenológicos, observou-se que a área não irrigada apresentou diversos períodos com valores iguais ou inferiores ao PMP (Figura 6B). Já na área irrigada, essa condição ocorreu apenas durante o repouso fenológico, demonstrando maior disponibilidade hídrica proporcionada pela irrigação.

Verificou-se ainda que o sensor instalado na entrelinha registrou, de modo geral, valores de umidade superiores aos observados nos sensores posicionados na linha de plantio. Esse resultado sugere maior extração de água pelo sistema radicular na linha de plantio, indicando que as raízes da videira se concentram predominantemente nessa região. Através dos volumes coletados na avaliação do sistema de irrigação é perceptível que o microaspersores na área de estudo irrigada molharam mais a entrelinha devido a sobreposição da lâmina.

A precipitação contribuiu de forma mais expressiva entre novembro e dezembro, período caracterizado por chuvas mais regulares, com média de 18,6 mm por aplicação. As lâminas aplicadas via sistema de irrigação seguiram o manejo adotado pelo produtor, realizando as aplicações de irrigação no estágio de brotação e terminando no emborrachamento do fruto.

De forma integrada, os resultados indicam que a irrigação foi fundamental para manter a umidade do solo predominantemente dentro da faixa de disponibilidade hídrica compreendida entre o ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de campo (CC) na área irrigada. Esses achados reforçam a importância do monitoramento contínuo da umidade do solo como ferramenta estratégica para o manejo da irrigação, subsidiando a tomada de decisão e permitindo melhor compreensão das respostas da cultura às variações hídricas ao longo do ciclo fenológico.

A Figura 7 apresenta os valores de condutividade elétrica (CE) do solo nas profundidades de 0,20 m e 0,40 m. Na área irrigada (Figura 7A), a CE variou de 0,282 a 0,912  $\text{mS.cm}^{-1}$  na profundidade de 0,20 m e de 0,233 a 0,738  $\text{mS.cm}^{-1}$  a 0,40 m. Na área não irrigada (Figura 7B), os valores oscilaram entre 0,004 e 0,978  $\text{mS.cm}^{-1}$  a 0,20 m e entre 0,025 e 0,619  $\text{mS.cm}^{-1}$  a 0,40 m.



**Figura 7.** Dados de condutividade elétrica no solo em: (A) área irrigada; (B) Não irrigada.

De acordo com Embrapa (2004), soluções com condutividade elétrica de 4,1  $\text{dS m}^{-1}$  podem provocar efeitos tóxicos em determinadas variedades. Mas, de modo geral, os valores observados situaram-se abaixo dos limites considerados críticos ou limitantes para o desenvolvimento da videira.

Observa-se que os maiores valores de CE ocorreram na profundidade de 0,20 m, devido à aplicação de fertilizantes minerais nessa camada, à evaporação e à dinâmica de redistribuição da água no perfil do solo. A menor CE observada na profundidade de 0,40 m, possivelmente é função da lixiviação promovida pelas precipitações e pela irrigação.

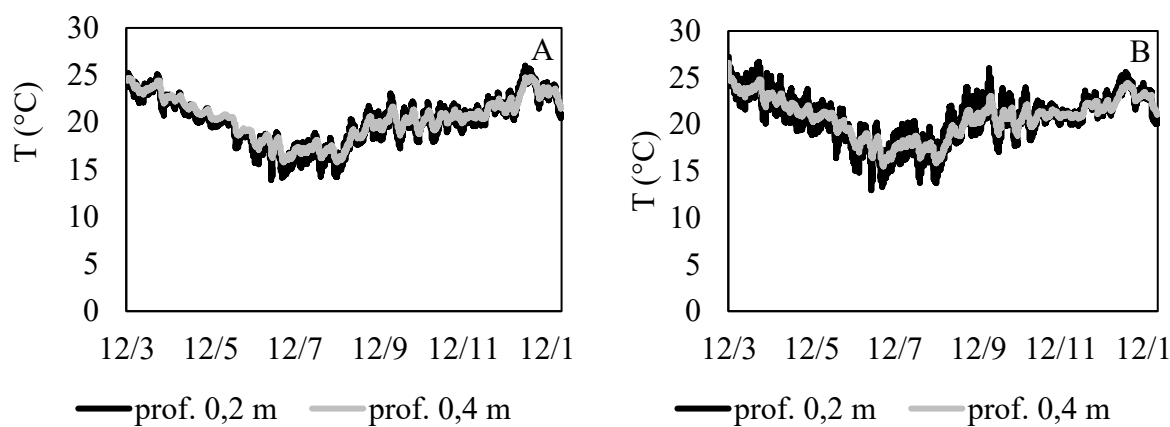
A condutividade elétrica (CE) apresentou comportamento semelhante nas duas profundidades avaliadas; contudo, a partir de 28 de julho de 2025, os valores passaram a se aproximar de forma mais consistente entre 0,20 m e 0,40 m. Esse padrão pode estar associado ao início das aplicações recorrentes de produtos fitossanitários e fertilizantes realizadas pelo produtor, as quais podem ter contribuído para a redistribuição de sais no perfil do solo.

De modo geral, observou-se maior concentração de CE na camada superficial (0,20 m), em ambas as áreas, entretanto, em algumas datas específicas, foram registrados valores superiores de CE na profundidade de 0,40 m. Esse comportamento pode estar relacionado à

aplicação de lâminas de irrigação mais elevadas ou à ocorrência de precipitações intensas, que favoreceram a lixiviação dos sais da camada superficial para camadas mais profundas do solo.

A correlação entre a condutividade elétrica (CE) e a umidade do solo apresentou valor de 0,66, indicando uma relação moderada positiva entre as variáveis. Observou-se comportamento semelhante entre os valores de CE e umidade, de modo que o aumento da umidade do solo esteve associado ao incremento da CE. Esse resultado sugere que o excesso de água de irrigação não promoveu lixiviação significativa dos sais ao longo do perfil do solo, uma vez que os valores de CE permaneceram abaixo dos níveis considerados prejudiciais ao desenvolvimento das plantas. Resultados divergentes foram relatados por Pereira Filho et al. (2017), que observaram aumento da condutividade elétrica do solo cultivado com feijão-caupi à medida que o regime hídrico foi reduzido de 100 para 50% da ETc, associado ao uso de água de irrigação com maiores concentrações salinas.

A temperatura do solo na área irrigada variou de 13,9 a 25,2 °C na profundidade de 0,20 m e de 15,8 a 25,0 °C a 0,40 m (Figura 8A). Na área não irrigada (Figura 8B), os valores oscilaram entre 13,0 e 27,3 °C na camada superficial e entre 15,5 e 26,6 °C na profundidade de 0,40 m. De modo geral, a amplitude térmica foi maior na área não irrigada quando comparada à área irrigada.



**Figura 8.** Dados de temperatura do solo em: (A) área irrigada; (B) Não irrigada.

O comportamento da temperatura do solo ao longo dos diferentes estádios fenológicos foi semelhante em ambas as profundidades. Os maiores valores foram registrados no mês de março, enquanto os menores ocorreram em junho, período correspondente ao estágio de repouso fenológico da videira. Essa variação acompanha o regime sazonal da radiação solar e da temperatura do ar.

Observou-se comportamento inversamente proporcional entre a temperatura e a umidade do solo, indicando que o aumento da umidade esteve associado à redução da temperatura do solo. Resultados semelhantes foram relatados por Vieira et al. (2020), os quais observaram relação oposta entre essas variáveis, evidenciando que, nos períodos em que a temperatura do solo apresentou menores valores, a umidade do solo foi mais elevada.

Resultados semelhantes foram relatados por Oliveira et al. (2019), os quais destacam que a temperatura no perfil do solo varia em função da profundidade e das condições de cobertura superficial, sendo comum a redução da amplitude térmica em camadas mais profundas devido à menor influência direta da radiação solar.

A maior amplitude térmica foi registrada na profundidade de 0,20 m, atingindo aproximadamente 12 °C. Em contraste, a profundidade de 0,40 m apresentou menor oscilação térmica.

A dinâmica térmica observada está relacionada ao balanço de energia no solo: durante o dia, a superfície absorve radiação solar e aquece, promovendo condução de calor para camadas mais profundas; à noite, ocorre liberação gradual do calor armazenado, resultando em redução progressiva da temperatura superficial. Esse processo explica a maior amplitude térmica nas camadas mais rasas do solo.

#### **4.4 Condutância estomática**

As leituras da condutância estomática (gs) na área irrigada variaram entre 17,8 e 66,9  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  com valor médio de 31,9  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto que na área não irrigada observou-se amplitude mais elevada, com valores entre 14,2 e 97,2  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e média de 33,8  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Resultados semelhantes foram encontrados por Dayer et al. (2020) medindo a condutância estomática no período noturno, os autores encontraram valores que variaram de 8 a 17  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para uva “Grenache” e “Syrah” e de 15 a 25  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em “Semillon”.

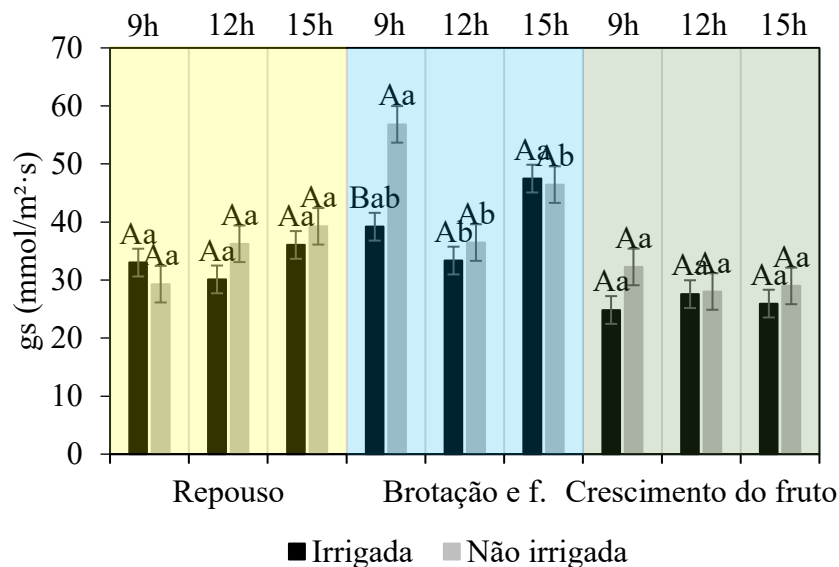
A Tabela 9 apresenta a análise ANOVA da condutância estomática da videira com três fatores ( $p < 0,05$ ) de significância. Observou-se interação significativa entre os fatores ( $p < 0,05$ ), indicando que a resposta da gs variou em função do estágio fenológico, do horário e da área de avaliação.

A Figura 9 apresenta o teste de média das leituras de gs nas videiras nos estádios fenológicos e em três horários avaliados.

Tabela 9. Análise da variância para condutância estomática da videira para três épocas, duas áreas e três horários diferentes.

FV	GL	Fc
Época (E)	2	39,12*
Área (A)	1	7,96*
Horário (H)	2	5,09*
E X A	2	0,91 <sup>ns</sup>
E X H	4	4,46*
A X H	2	1,25 <sup>ns</sup>
E X A X H	4	3,02*
Resíduo	162	
CV (%)	27,31	

\* significativo a 5% e <sup>ns</sup> não significativo, respectivamente pelo teste F. FV – Fonte de Variação; GL – Grau de Liberdade; CV – Coeficiente de Variação



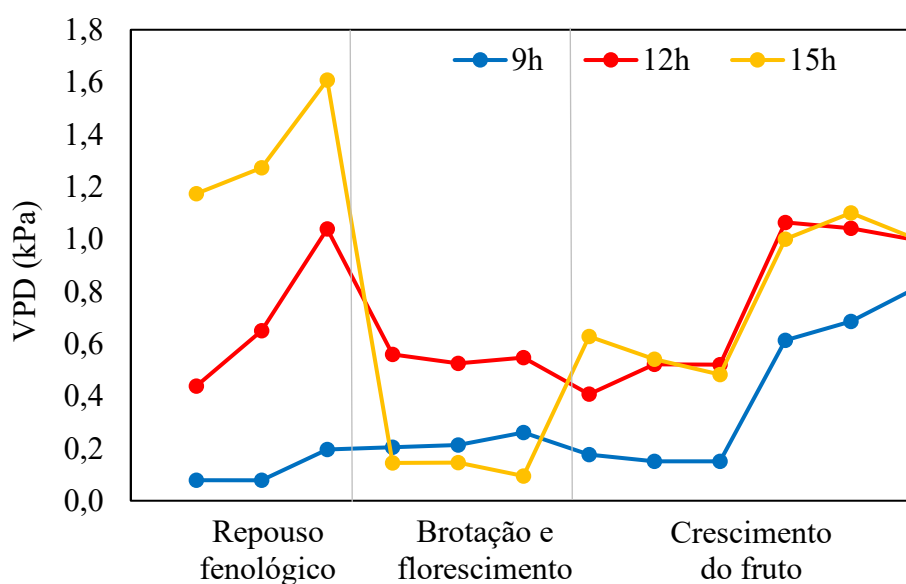
**Figura 9.** Dados médios de condutância estomática nos horários das 9, 12 e 15 horas na cultura da videira. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, diferem entre si.

Durante o período de repouso fenológico, nos horários de 9h, 12h e 15h, a condutância estomática não apresentou diferença estatística entre as áreas irrigada e não irrigada. PÉREZ e RUBIO (2022) relatam que no estágio de repouso fenológico, também denominado de repouso vegetativo, a videira entra em dormência em temperaturas abaixo de 10 °C, o que explica o motivo de não apresentar diferença estatística entre os tratamentos. Contudo, nesse estágio fenológico houve grande restrição hídrica para cultura, onde a umidade do solo foi de 0,301 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> na profundidade de 0,20 m, chegando a ultrapassar o PMP em algumas datas. Resultados

semelhantes foram encontrados por Bassoi et al. (2021), onde relatam que a restrição hídrica moderada, em torno de 50% da capacidade de campo, afetou negativamente a videira ‘Syrah’, acarretando na redução da fotossíntese líquida, transpiração e condutância estomática.

Na fase de brotação e florescimento, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as áreas irrigada e não irrigada nos horários de 12h e 15h. Contudo, às 9h, a área não irrigada apresentou maior condutância estomática média ( $56,83 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), diferindo significativamente da área irrigada, como demonstrado na Figura 9. Nesse horário, a umidade do solo estava em  $0,204 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na profundidade de 0,20 m, indicando que havia restrição hídrica e a planta estava em estresse hídrico, entretanto, a umidade relativa do ar estava em 89,08%. Esse comportamento indicava maior possibilidade de abertura estomática nas primeiras horas do dia na condição sem irrigação, possivelmente associada a respostas fisiológicas as condições climáticas, visto que o VPD era de 0,23 kPa e a temperatura do ar média era de  $18,02^\circ\text{C}$  no horário de avaliação das 9h (Figura 10). Silva et al. (2023) observaram que as respostas de gs dos clones estudados são influenciadas pelo aumento do VPD entre 2 a 3 kPa e outras condições climáticas, como: baixa precipitação e meses quentes e secos.

Por sua vez, na fase de crescimento do fruto, a condutância estomática não diferiu estatisticamente entre as áreas irrigada e não irrigada em nenhum dos horários avaliados (Figura 9). O teste de médias de Tukey não detectou diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que, nesse estágio, o manejo hídrico adotado não influenciou de forma expressiva a resposta estomática das videiras.



**Figura 10.** Dados de déficit de pressão vapor durante o dia em cada estágio fenológico com dados coletados a 20 minutos.

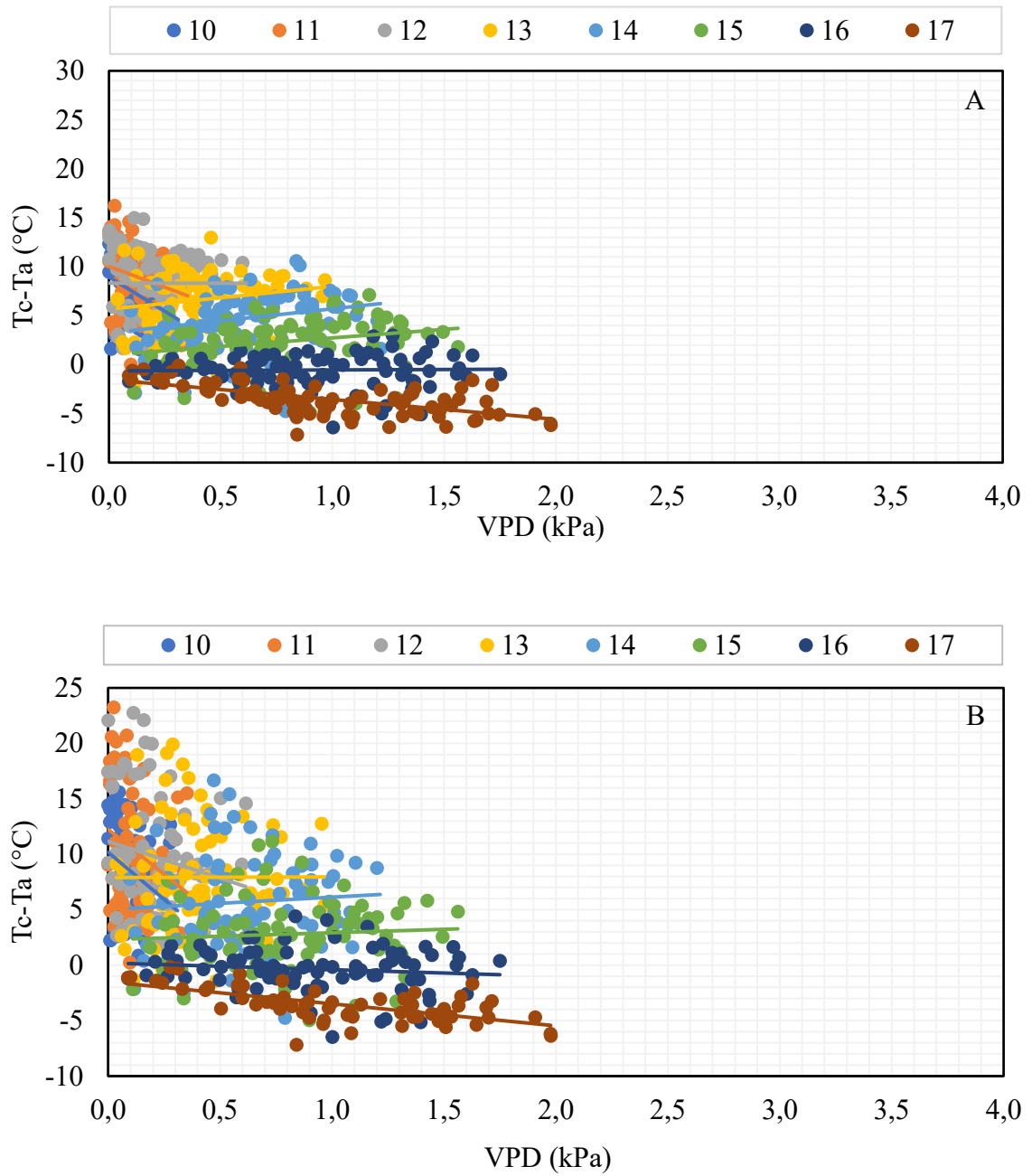
O VPD no horário de 9h variou entre 0,08 a 0,81 kPa, no horário de 12h o VPD variou entre 0,41 a 1,06 kPa, enquanto o horário de 15h os dados variaram entre 0,09 a 1,61 kPa durante a avaliação da condutância estomática. Observa-se que VPD durante o período da manhã apresenta ser mais estável e com VPD menor em relação aos horários de 12h e 15h, contudo, durante o estágio fenológico de brotação e florescimento o VPD diminuiu no horário de 15h. Durante o estágio fenológico de crescimento do fruto, o VPD foi semelhante no horário de 12h e 15h.

O VPD não é o único fator que afeta a gs, existem uma associação de fatores (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade do solo são exemplos) que afetam a gs.

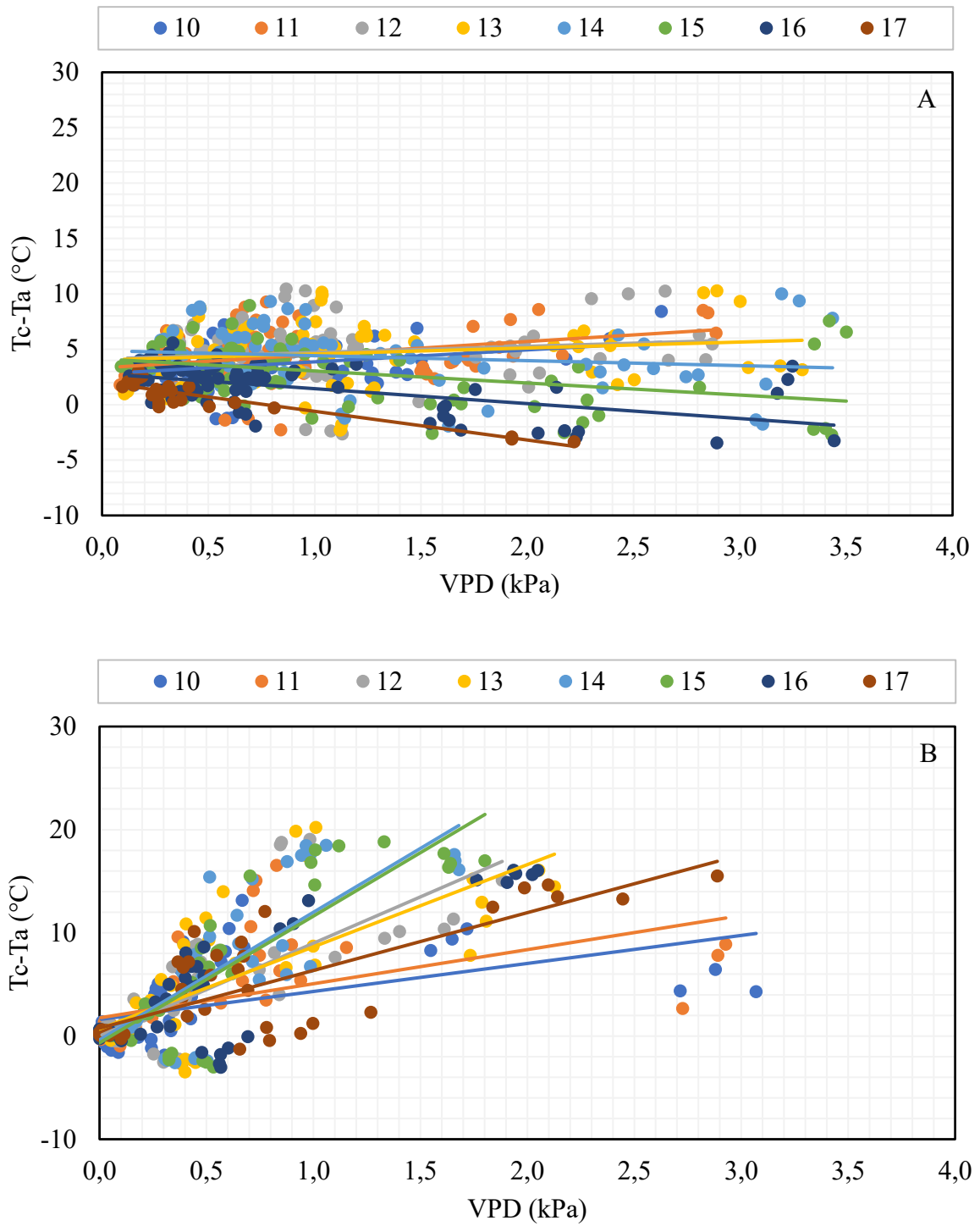
#### **4.5 Comportamento das linhas de base**

As linhas de base horárias de 10 até 17 horas para a área irrigada e não irrigada, obtidas pela diferença entre a temperatura da copa ( $T_c$ ) e a temperatura do ar ( $T_a$ ) em função do déficit de pressão de vapor (VPD) são apresentadas na Figura 11. Para essa análise, os dados foram filtrados considerando o período entre 10h e 17h, valores de VPD maiores que 3 kPa para os estádios fenológicos de repouso, brotação, brotação e florescimento, crescimento do fruto e emborrachamento do fruto.

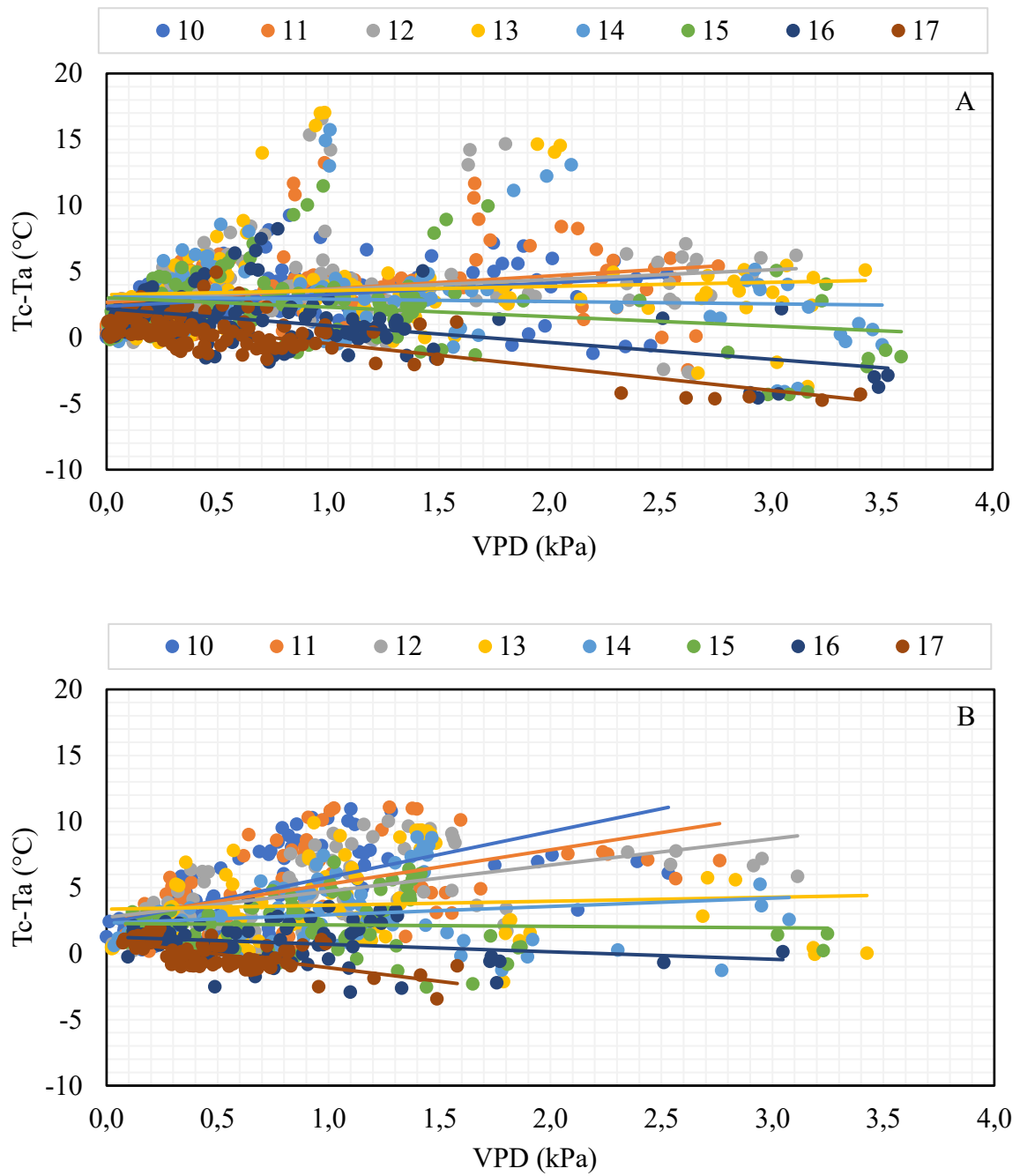
Observaram-se valores positivos de inclinação das regressões lineares nas Figuras 11A e 11B (no intervalo entre 13h e 16h), 12A (entre 10h e 17h), 13B (entre 10h e 14h), 14A (entre 10h e 16h), 15A (entre 10h e 14h) e 15B (especificamente às 11h, 13h e 16h).



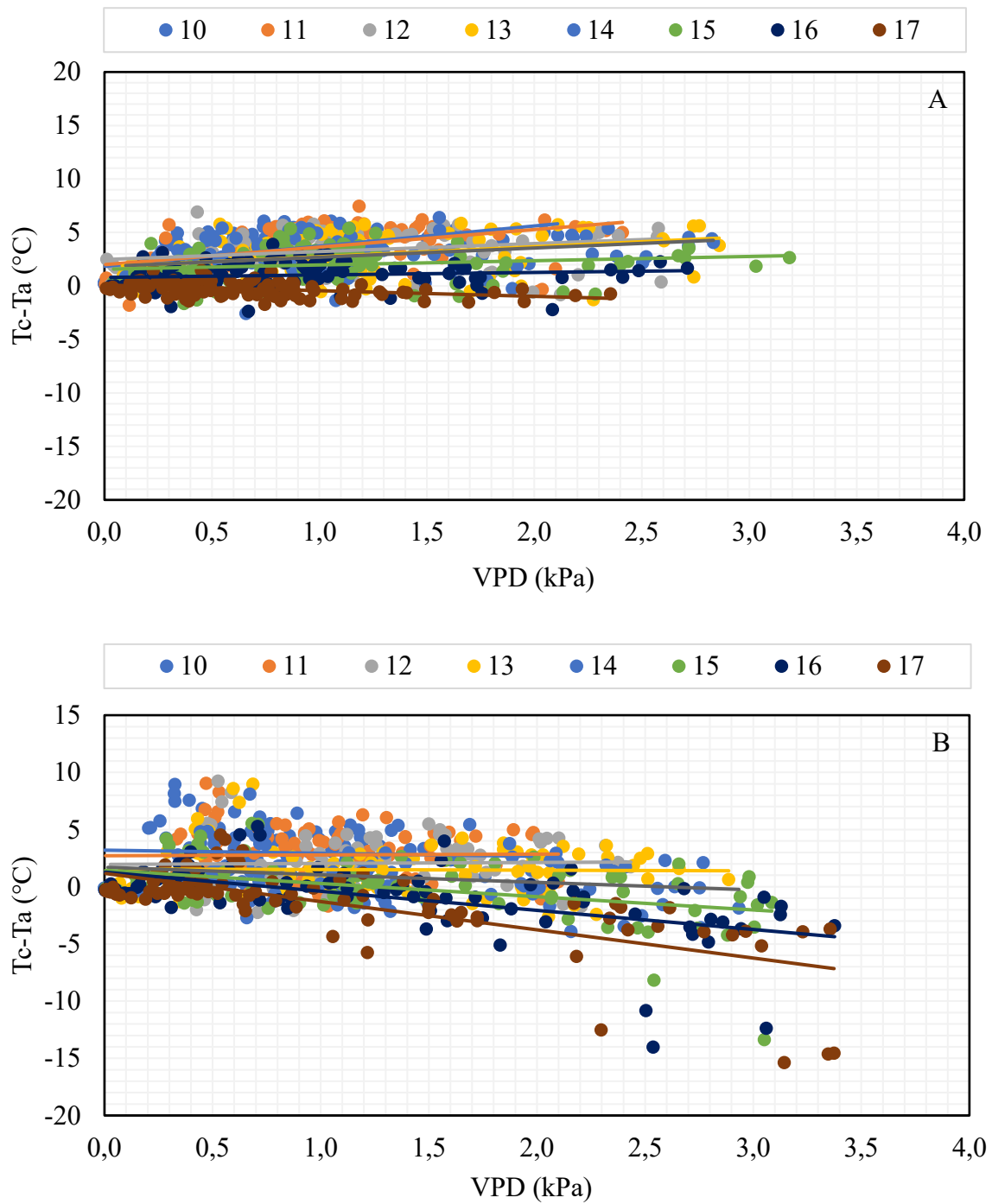
**Figura 11.** Comportamento das linhas de base horária no estágio de repouso na área: (A) irrigada; (B) não irrigada.



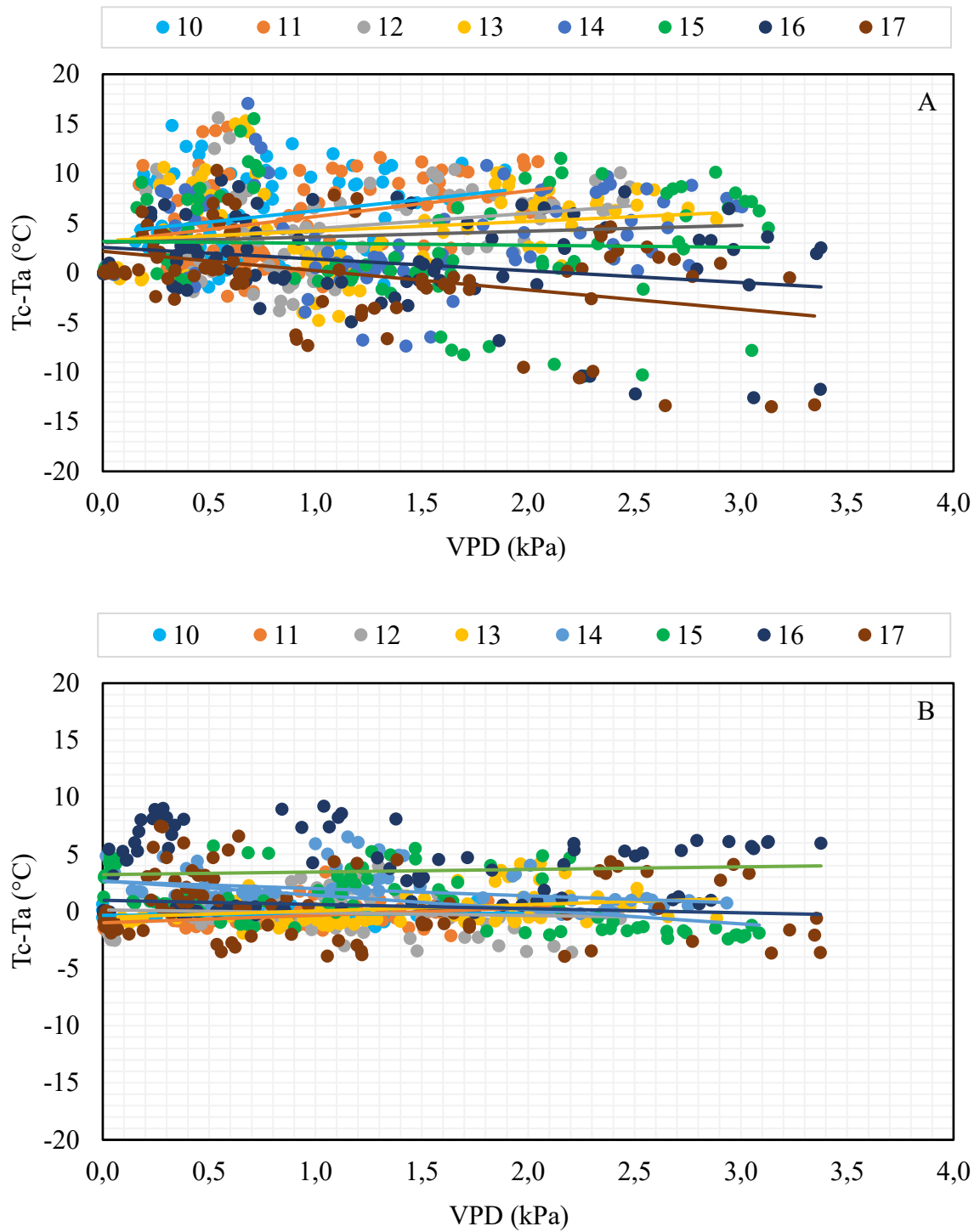
**Figura 12.** Comportamento das linhas de base horária no estágio de brotação na área: (A) irrigada; (B) não irrigada.



**Figura 13.** Comportamento das linhas de base horária no estágio de brotação e florescimento na área: (A) irrigada; (B) não irrigada.



**Figura 14.** Comportamento das linhas de base horária no estágio de crescimento do fruto na área: (A) irrigada; (B) não irrigada.



**Figura 15.** Comportamento das linhas de base horária no estágio de emborrachamento do fruto na área: (A) irrigada; (B) não irrigada.

A inclinação positiva indica aumento da diferença entre a temperatura da copa e o do ar com o incremento do déficit de pressão de vapor (VPD), sugerindo maior limitação transpiratória nesses horários, possivelmente associada a condições de estresse hídrico.

Observou-se ainda que tanto a inclinação quanto o intercepto apresentaram variação acentuada ao longo do dia nas Figuras 11A, 11B e 15B. Nos demais estádios fenológicos, os valores de intercepto mostraram-se relativamente semelhantes entre os horários avaliados, enquanto as inclinações apresentaram maior variabilidade. Resultados semelhantes foram relatados por Silveira et al. (2024) na cultura do feijão, em que a linha de base sem estresse apresentou deslocamento do intercepto ao longo do dia, mantendo inclinação praticamente constante.

Verificou-se que, às 17h, a inclinação foi negativa na maioria dos estádios fenológicos, com exceção da Figura 12B, que diz respeito ao comportamento das linhas de base na área não irrigada na fase de brotação. Esse comportamento pode estar relacionado à redução do VPD no final da tarde, promovendo menor diferença entre a temperatura da copa e do ar. Importante relatar ainda que esse comportamento infere uma condição de estresse hídrico em uma fase de grande importância para a produção da uva fina de mesa.

Nas Figuras 11A e 11B, observou-se aumento progressivo do VPD ao longo do dia, concomitante à redução da diferença de temperatura entre copa e ar. A análise conjunta dessas figuras indica que, entre 16h e 17h, a diferença de temperatura manteve-se relativamente estável, mesmo com variação do VPD, sugerindo possível ajuste estomático ou estabilização das condições microclimáticas no final do período diurno.

Outro aspecto relevante é a dispersão dos dados, especialmente para valores de VPD de até 1,5 kPa. Jackson et al. (1988) destacam a sensibilidade de métodos empíricos a alterações na radiação líquida e na velocidade do vento, fatores que influenciam a definição das linhas de base. Ainda permanece uma incerteza quanto à origem da alta dispersão dos dados de NWSB em videiras, entretanto, Gonzalez-Dugo (2020) ressalta que essa variabilidade ainda não é completamente compreendida, sugerindo que outros processos fisiológicos e microclimáticos podem estar contribuindo para o comportamento observado.

A linha de base horária com os dados provindos da área irrigada apresentou maiores condições de ausência ou baixa limitação hídrica. Por outro lado, na área não irrigada, a relação  $T_c - T_a$  em função do VPD indicou maior limitação transpiratória, sugerindo ocorrência de estresse hídrico mais frequente e maior sensibilidade às variações microclimáticas.

As Tabelas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 apresentam os valores de intercepto, erro padrão, valor  $p$  e intervalo de confiança de 95% referentes às regressões lineares horárias para as áreas irrigada e não irrigada, durante os estádios de repouso fenológico, brotação, brotação e florescimento, crescimento do fruto e emborrachamento do fruto.

Observou-se que, na área irrigada, a inclinação das regressões foi semelhante nos horários de 13h e 14h. Na área não irrigada, comportamento semelhante foi verificado entre 10h e 13h e entre 15h e 17h, durante o estágio de repouso fenológico. Esse padrão sugere estabilidade da resposta térmica da cultura em determinados períodos do dia, possivelmente associada à menor variação nas condições micrometeorológicas nesses intervalos.

A variação do intercepto pode estar relacionada à radiação líquida ( $R_n$ ), uma vez que se espera um aumento desse parâmetro com a elevação da radiação solar, conforme descrito por Jackson et al. (1981). No presente estudo, a  $R_n$  média foi de  $164,65 \text{ W m}^{-2}$ , o que pode ter contribuído para os maiores valores de intercepto observados no estágio de repouso fenológico, tanto na área irrigada quanto na não irrigada. Nessa fase, a diferença de temperatura variou de  $-7,1 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $16,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , indicando ampla amplitude térmica e maior sensibilidade da cultura às condições atmosféricas.

As regressões lineares apresentaram significância estatística ( $p < 0,05$ ) na maioria dos horários avaliados (Tabelas 12, 14, 15, 17 e 18). Entretanto, nas Tabelas 10 e 11, os modelos não foram significativos entre 10h e 14h e às 17h. Já na Tabela 13 houve significância entre 10h e 11h; na Tabela 16, entre 10h e 16h; e na Tabela 19, entre 14h e 17h, além das 10h. Essa variabilidade na significância estatística pode estar associada a alterações na radiação, na velocidade do vento e no déficit de pressão de vapor ao longo do dia, fatores que influenciam diretamente as linhas de base.

Tabela 10. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estágio de repouso fenológico.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	8,96	0,59	1,52849E-25	7,78	10,13
<b>11h</b>	10,03	0,64	1,49774E-26	8,76	11,29
<b>12h</b>	8,25	0,70	2,77194E-19	6,86	9,64
<b>13h</b>	5,67	0,70	4,16619E-12	4,28	7,05
<b>14h</b>	3,23	0,71	1,83883E-05	1,82	4,65
<b>15h</b>	1,00	0,65	0,125180785	-0,28	2,29
<b>16h</b>	-0,64	0,45	0,160526896	-1,54	0,26
<b>17h</b>	-1,52	0,30	2,58097E-06	-2,13	-0,92

Tabela 11. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de repouso fenológico.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	10,24	1,39	3,4293E-06	7,26	13,21
<b>11h</b>	13,57	1,11	5,41085E-16	11,33	15,81
<b>12h</b>	11,92	1,11	8,55617E-17	9,72	14,13
<b>13h</b>	8,77	1,37	1,611E-08	6,04	11,49
<b>14h</b>	5,65	1,34	8,08843E-05	2,97	8,33
<b>15h</b>	2,21	1,20	0,070640015	-0,19	4,62
<b>16h</b>	0,71	0,72	0,329834458	-0,74	2,15
<b>17h</b>	-1,38	0,37	0,000385921	-2,11	-0,64

Tabela 12. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de brotação.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	2,79	0,34	0,0000000000	2,11	3,47
<b>11h</b>	3,32	0,45	0,0000000003	2,42	4,23
<b>12h</b>	4,14	0,57	0,0000000003	3,01	5,27
<b>13h</b>	4,04	0,58	0,0000000011	2,89	5,19
<b>14h</b>	4,87	0,53	0,0000000000	3,82	5,92
<b>15h</b>	4,13	0,43	0,0000000000	3,27	4,99
<b>16h</b>	2,79	0,30	0,0000000000	2,20	3,39
<b>17h</b>	1,54	0,20	0,0000000000	1,15	1,93

Tabela 13. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de brotação.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	1,60	0,62	0,012665211975	0,36	2,85
<b>11h</b>	1,77	0,74	0,020845298391	0,28	3,25
<b>12h</b>	0,01	0,74	0,986843191055	-1,48	1,51
<b>13h</b>	0,68	0,88	0,441186344384	-1,08	2,44
<b>14h</b>	-0,37	0,83	0,656413837429	-2,03	1,29
<b>15h</b>	-0,66	0,69	0,342312011329	-2,04	0,72
<b>16h</b>	-0,07	0,56	0,902728305242	-1,19	1,05
<b>17h</b>	0,76	0,55	0,173946049131	-0,35	1,87

Tabela 14. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de brotação e florescimento.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	2,37	0,26	0,00000000000	1,85	2,88
<b>11h</b>	2,68	0,36	0,00000000002	1,96	3,40
<b>12h</b>	2,90	0,46	0,00000000564	1,98	3,81
<b>13h</b>	3,25	0,49	0,00000000080	2,28	4,21
<b>14h</b>	3,09	0,43	0,00000000005	2,24	3,94
<b>15h</b>	3,02	0,34	0,00000000000	2,35	3,69
<b>16h</b>	2,18	0,24	0,00000000000	1,71	2,66
<b>17h</b>	1,32	0,14	0,00000000000	1,05	1,59

Tabela 15. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de brotação e florescimento.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	2,32	0,43	8,59965E-07	1,45	3,18
<b>11h</b>	2,64	0,49	7,63163E-07	1,66	3,62
<b>12h</b>	2,74	0,44	2,32206E-08	1,86	3,62
<b>13h</b>	3,36	0,58	1,15326E-07	2,21	4,51
<b>14h</b>	2,31	0,48	7,83326E-06	1,35	3,27
<b>15h</b>	2,27	0,38	7,22432E-08	1,51	3,04
<b>16h</b>	1,26	0,27	1,59322E-05	0,72	1,81
<b>17h</b>	0,99	0,16	3,58323E-08	0,67	1,31

Tabela 16. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de crescimento do fruto.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	1,83	0,27	0,00000000145	1,29	2,38
<b>11h</b>	1,99	0,34	0,00000006381	1,32	2,66
<b>12h</b>	2,47	0,33	0,00000000004	1,81	3,13
<b>13h</b>	1,81	0,36	0,00000264518	1,09	2,52
<b>14h</b>	1,82	0,31	0,00000006348	1,21	2,44
<b>15h</b>	1,57	0,28	0,00000028139	1,00	2,13
<b>16h</b>	0,80	0,20	0,00013955804	0,40	1,20
<b>17h</b>	0,09	0,11	0,40725276020	-0,12	0,30

Tabela 17. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de crescimento do fruto.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	3,20	0,58	3,43924E-07	2,05	4,35
<b>11h</b>	2,71	0,59	1,36527E-05	1,54	3,88
<b>12h</b>	1,95	0,59	0,001344534	0,78	3,12
<b>13h</b>	1,56	0,50	0,00227549	0,58	2,55
<b>14h</b>	1,70	0,41	7,99925E-05	0,89	2,52
<b>15h</b>	1,44	0,42	0,001043138	0,60	2,29
<b>16h</b>	1,28	0,42	0,003146461	0,44	2,12
<b>17h</b>	1,17	0,39	0,00374461	0,39	1,95

Tabela 18. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área irrigada no estádio de emborrachamento do fruto.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	3,97	0,94	5,75845E-05	2,11	5,83
<b>11h</b>	3,07	0,97	0,002255387	1,13	5,01
<b>12h</b>	2,90	1,00	0,00478665	0,91	4,89
<b>13h</b>	3,25	0,92	0,000662042	1,42	5,07
<b>14h</b>	3,04	0,94	0,001771927	1,17	4,91
<b>15h</b>	3,17	1,09	0,004711995	1,00	5,34
<b>16h</b>	2,56	0,84	0,003218619	0,88	4,24
<b>17h</b>	2,17	0,76	0,005359261	0,66	3,68

Tabela 19. Parâmetros estatísticos do intercepto para cada horário na área não irrigada no estádio de emborrachamento do fruto.

<b>Tempo</b>	<b>Intercepto</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Valor-p</b>	<b>95% de intervalo de confiança</b>	
<b>10h</b>	-0,34	0,08	5,71438E-05	-0,50	-0,18
<b>11h</b>	-0,49	0,34	0,158439501	-1,17	0,19
<b>12h</b>	0,14	0,39	0,727556986	-0,64	0,91
<b>13h</b>	-0,51	0,30	0,091044734	-1,10	0,08
<b>14h</b>	3,15	0,30	2,61535E-17	2,56	3,74
<b>15h</b>	2,68	0,37	1,48408E-10	1,95	3,41
<b>16h</b>	3,23	0,53	3,79103E-08	2,17	4,29
<b>17h</b>	0,98	0,46	0,036096884	0,07	1,90

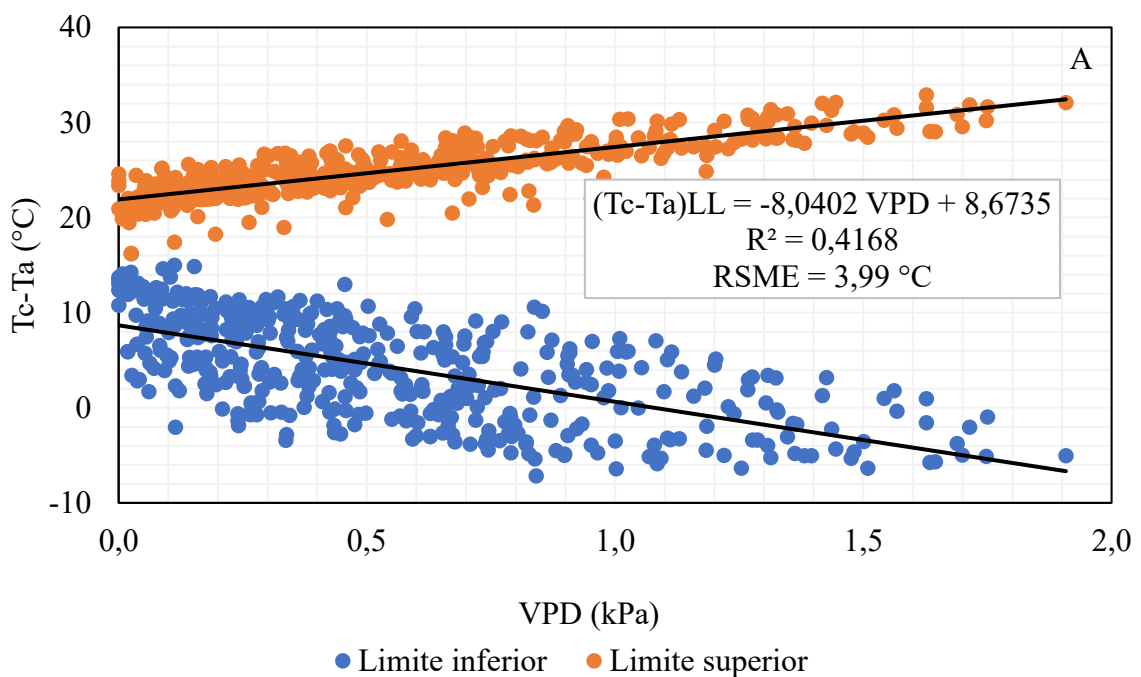
#### 4.6 Linha de base inferior e superior

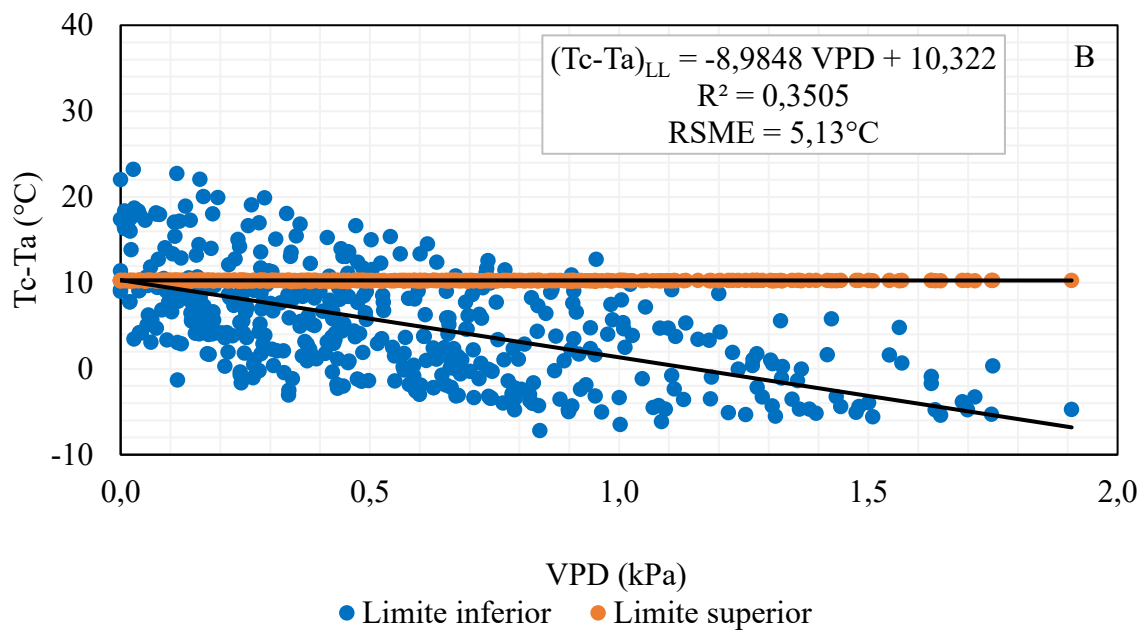
No presente estudo, devido à ausência de informações sobre cobertura de nuvens, adotou-se o déficit de pressão de vapor (VPD) como critério indireto para a seleção de

condições atmosféricas representativas de estabilidade radiativa. Além disso, a velocidade do vento foi restrita a valores inferiores a  $6 \text{ m s}^{-1}$ . De acordo com Katimbo et al. (2022), apenas dados obtidos em dias de céu claro devem ser utilizados, aplicando-se também filtros específicos para a velocidade do vento.

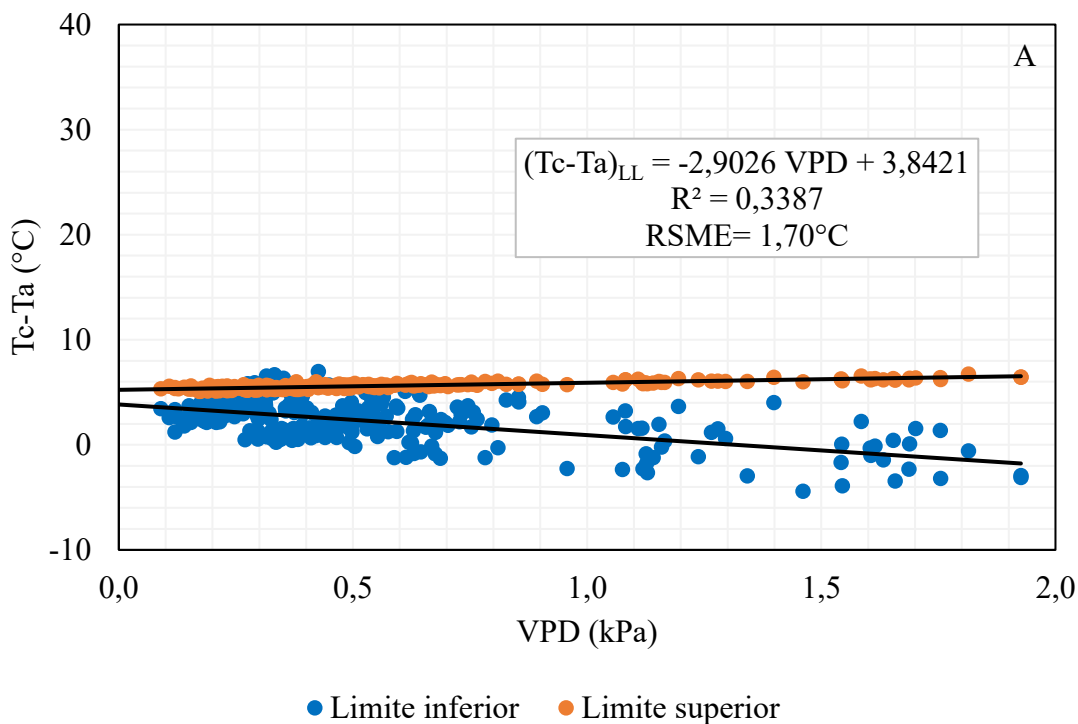
Dessa forma, foram considerados apenas os dados registrados entre 10h e 17h, com VPD inferior a 2 kPa, radiação solar incidente entre 71 e  $534 \text{ W m}^{-2}$  e ausência de precipitação. Esses critérios visaram aumentar a robustez da análise da relação entre  $T_c - T_a$  e VPD.

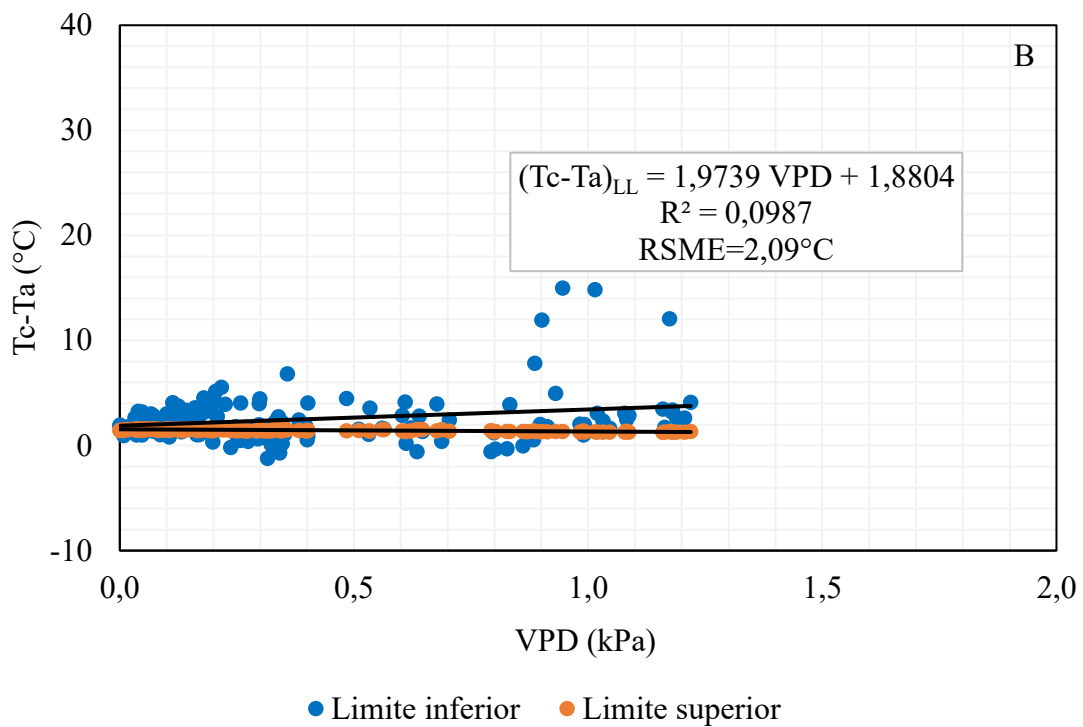
A Figura 16 a 20 apresenta a NWSB e linha de base superior na área irrigada e não irrigada para os diferentes estádios fenológicos (repouso, brotação, brotação e florescimento, crescimento do fruto e emborrachamento do fruto).



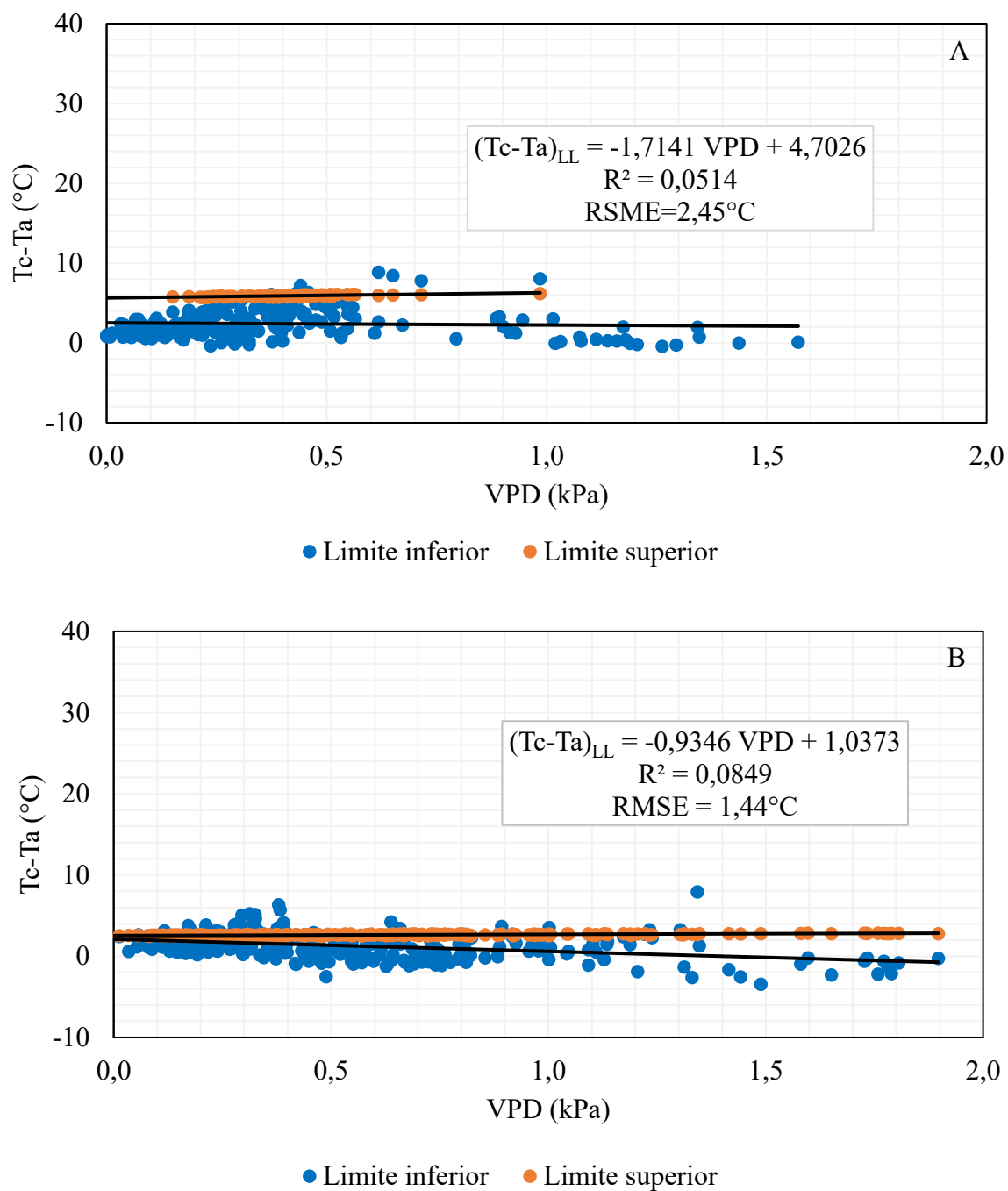


**Figura 16.** NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Repouso fenológico da área irrigada; e (B) Repouso fenológico da área não irrigada.

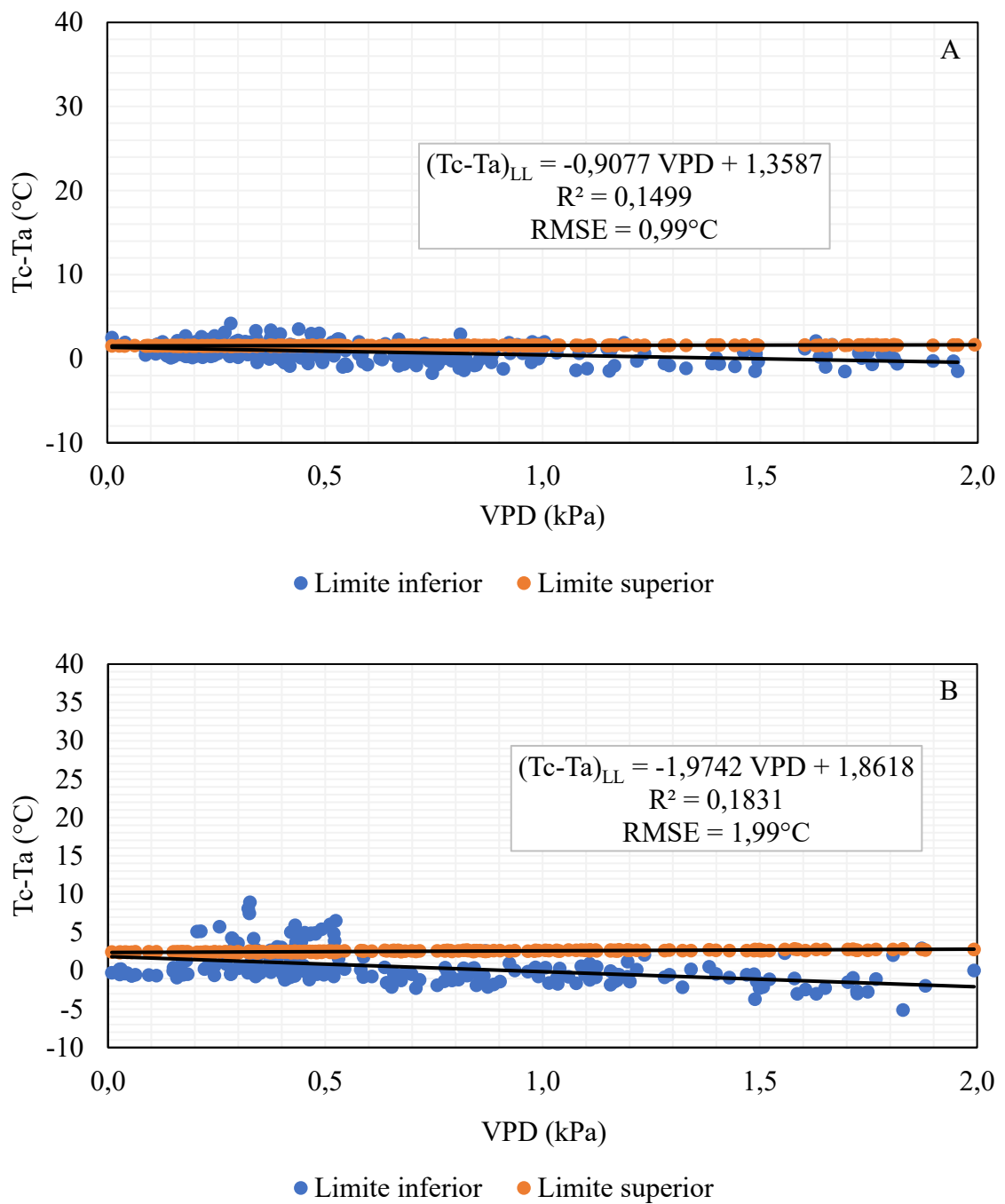




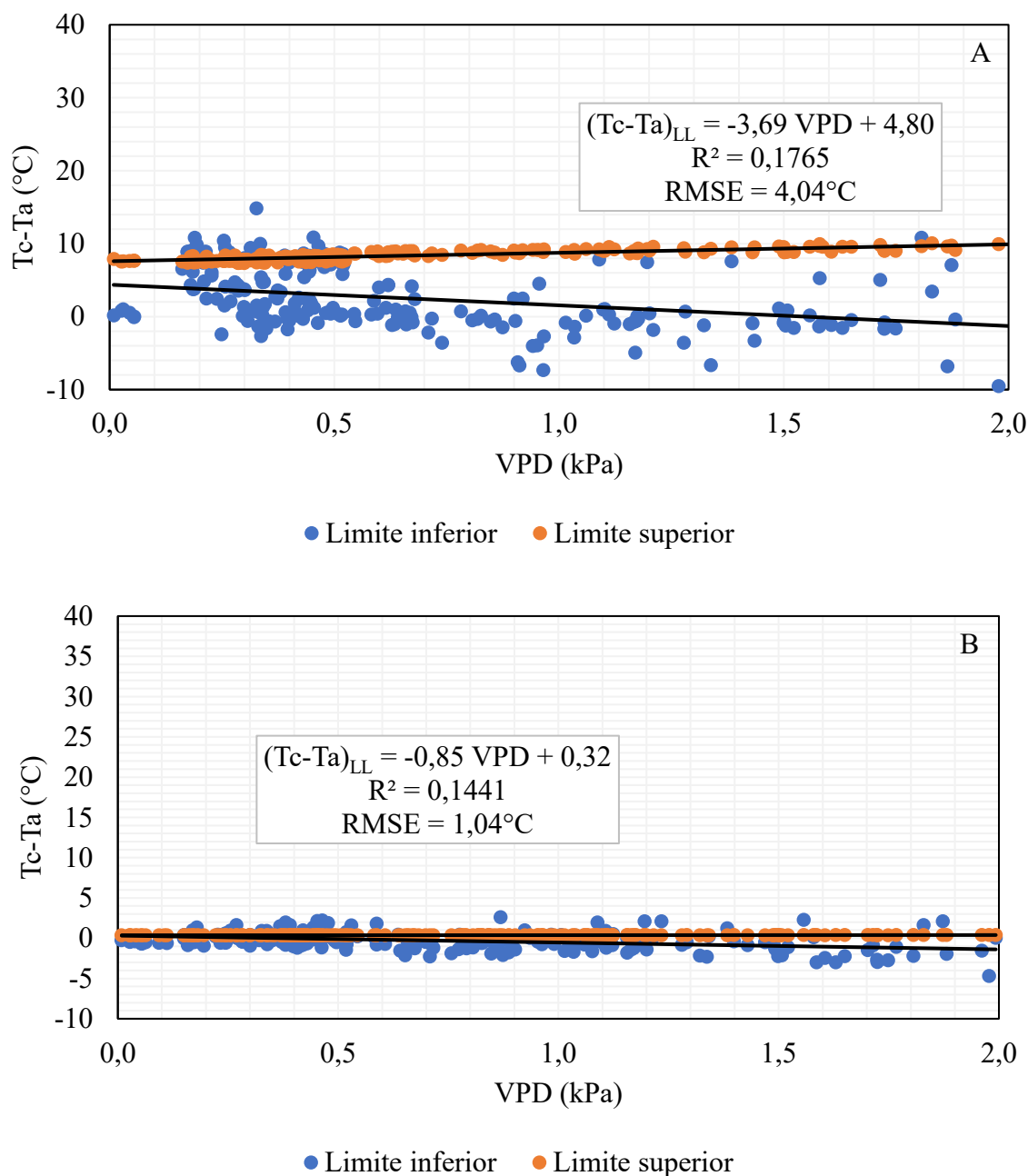
**Figura 17.** NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Brotação na área irrigada; e (B) Brotação na área não irrigada.



**Figura 18.** NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Brotação e florescimento na área irrigada; e (B) Brotação e florescimento na área não irrigada.



**Figura 19.** NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Crescimento do fruto na área irrigada; e (B) Crescimento do fruto na área não irrigada.



**Figura 20.** NWSB e linha de base superior durante as diferentes fases do ciclo da videira: (A) Emborrachamento do fruto na área irrigada; e (B) Emborrachamento do fruto na área não irrigada.

Os resultados obtidos da NWSB na Figura 16A com inclinação foram de  $-8,04^\circ C \cdot kPa^{-1}$ , intercepto de  $8,67^\circ C$ ,  $R^2$  de 0,41 e  $RSME$  de  $3,99^\circ C$ . Enquanto, na área não irrigada (Figura 16B), os valores correspondentes a inclinação, intercepto,  $R^2$  e  $RSME$  foram  $-8,98^\circ C \cdot kPa^{-1}$ ,  $10,32^\circ C$ , 0,35 e  $5,13^\circ C$ , respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Bellvert et al. (2015), onde o  $R^2$  variou de 0,40 a 0,67 para a videira, dependendo do estágio fenológico e cultivares. Observa-se que os coeficientes do estágio de repouso fenológico são altos, fato

esse causado pela diferença de temperatura no intervalo de -7,1 e 16,2°C na área irrigada e -7,2 e 23,2°C na área não irrigada.

Na Figura 17A, fase de brotação área irrigada, os coeficientes obtidos na NWSB foram: inclinação de  $-2,90^{\circ}\text{C}\cdot\text{kPa}^{-1}$ , intercepto de  $3,84^{\circ}\text{C}$ ,  $R^2$  de 0,33 e RSME de  $1,70^{\circ}\text{C}$ , enquanto na Figura 17B, fase de brotação área não irrigada, resultou em coeficientes de inclinação de  $1,97^{\circ}\text{C}\cdot\text{kPa}^{-1}$ , intercepto de  $1,88^{\circ}\text{C}$ ,  $R^2$  de 0,09 e RSME de  $2,09^{\circ}\text{C}$ . O estágio fenológico de brotação na área não irrigada resultou na inclinação positiva da reta, o comportamento anormal ocorreu possivelmente pela arquitetura da copa não estar completamente formada e com folhas jovens, resultados semelhantes foram observados por Goes et al. (2025). De maneira geral, o RMSE foi maior, em aproximadamente  $1,0^{\circ}\text{C}$  na área não irrigada, exceto na fase de emborrachamento que na área irrigada apresentou maior RMSE do que na área não irrigada em cerca de  $3,0^{\circ}\text{C}$ .

A Tabela 20 apresenta os coeficientes a e b e o  $R^2$  para área irrigada e não irrigada nos estádios fenológicos de repouso, brotação, brotação e florescimento, crescimento do fruto e emborrachamento do fruto.

Tabela 20. Equações e coeficientes de determinação dos limites superiores em área irrigada e não irrigada em diferentes estádios fenológicos.

Estádio fenológico	Irigada			Não irrigada		
	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
Repouso fenológico	19,11	9,05	0,28	26,28	12,70	0,38
Brotação	8,00	9,55	0,24	1,45	-3,63	0,00
Brotação e florescimento	5,81	4,61	0,11	5,31	11,54	0,17
Crescimento do fruto	3,41	11,50	0,14	7,07	18,93	0,26
Emborrachamento do fruto	12,52	10,55	0,22	1,85	36,65	0,08

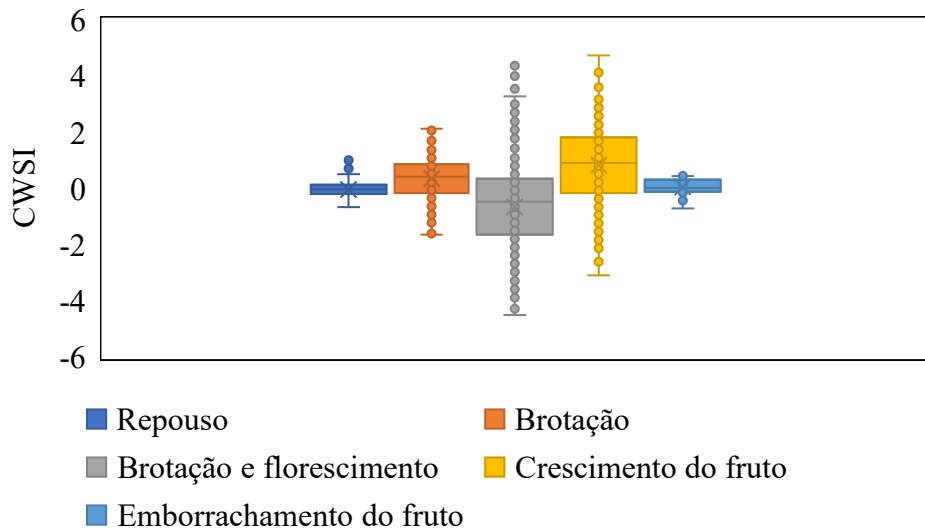
A linha de base superior foi derivada a partir dos coeficientes da NWSB. O limite superior é uma constante obtida pela extrapolação do NWSB para um VPD negativo, simulando a planta totalmente estressada.

A linha de base superior no estágio de brotação na área não irrigada apresentou inclinação negativa, entretanto, esse comportamento é anormal para a linha de base superior. O motivo desse comportamento nesse estágio foi explicado na NWSB.

O estágio de repouso fenológico, ou fase de dormência, é caracterizado pela ausência de irrigação e, portanto, não é considerado o período mais adequado para a modelagem da NWSB, uma vez que essa linha de base inferior representa a planta sob condições hídricas ótimas, ou seja, bem irrigada, conforme relatado por Idso et al. (1981). Para as condições de cultivo da videira, na região de São Miguel Arcanjo, o período de repouso coincide com o período de baixas temperaturas, fator que limita o desenvolvimento vegetativo da videira, portanto, não é feita irrigação mesmo na área de estudo com sistema de irrigação disponível.

#### 4.7 Índice de estresse hídrico da videira

A Figura 21 ilustra os valores de CWSI para cada estágio fenológico da videira.



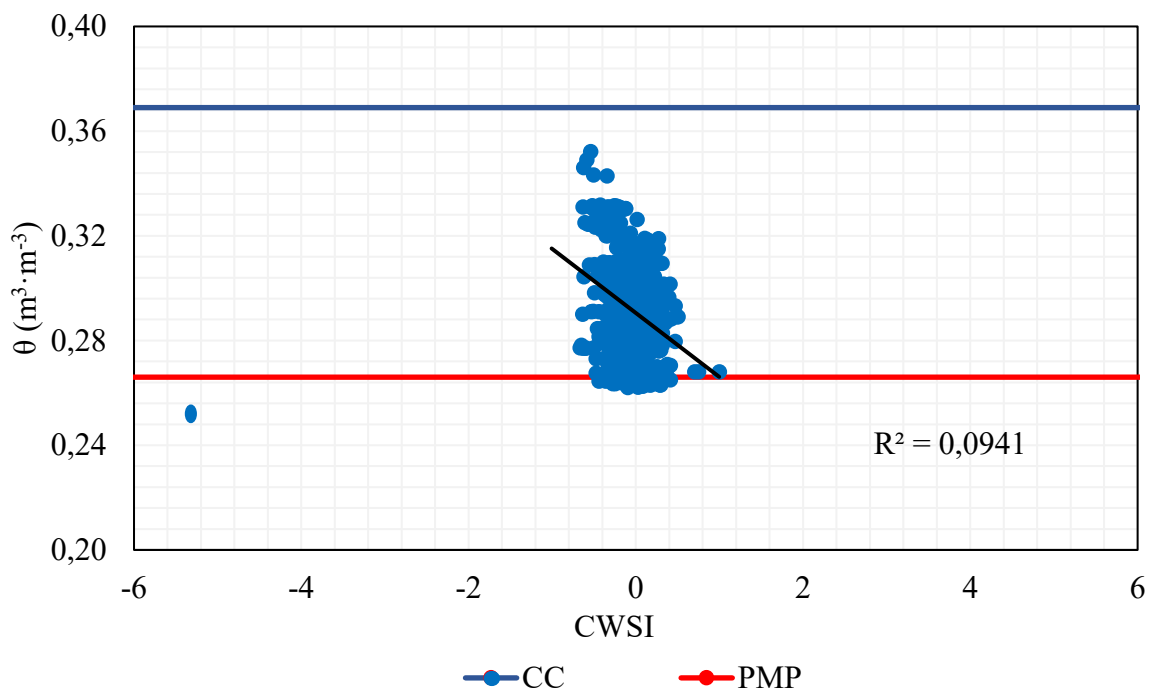
**Figura 21.** Resultados do CWSI para cada estágio fenológico.

Os valores de CWSI não se limitaram à faixa de valores entre 0 e 1, como demonstrado na Figura 21. Yuan et al. (2004) relataram esse problema, em que pelo método empírico os valores do CWSI excedem a faixa entre 0 e 1. Resultados semelhantes foram encontrados por Goes et al. (2025), em que os valores de CWSI ultrapassaram o intervalo entre 0 e 1.

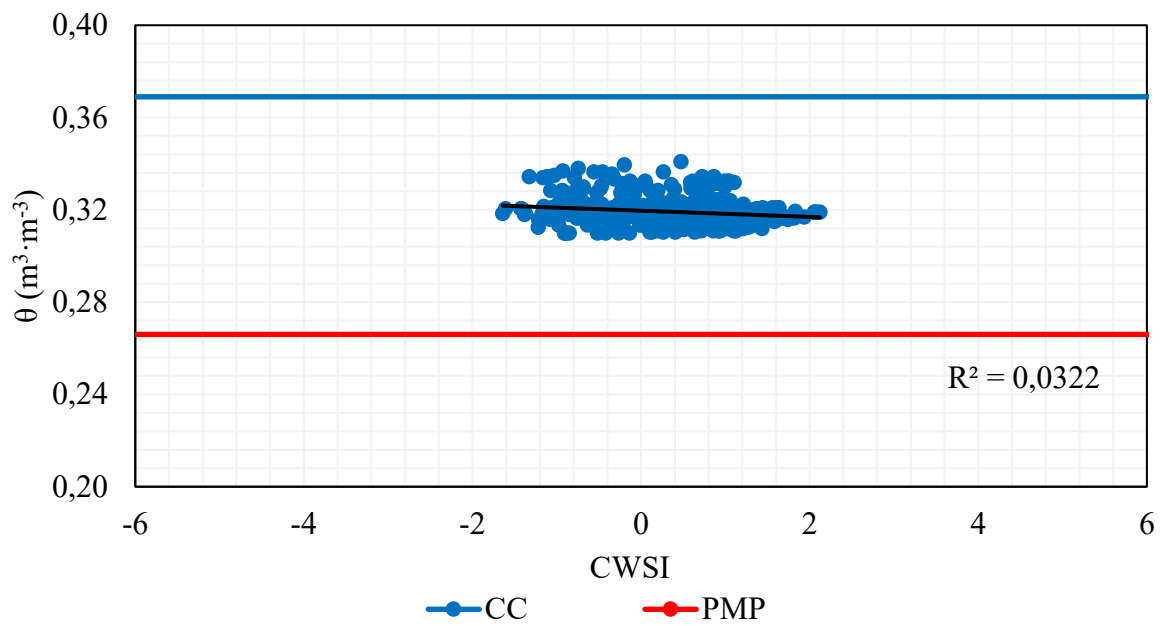
Os valores de CWSI fora do intervalo teórico entre 0 e 1 indicam limitações na definição das linhas de base inferior e superior, uma vez que esses limites representam, respectivamente, as condições de ausência e de máximo estresse hídrico.

Importante notar que a maior variação do CWSI ocorreu no estágio de brotação e florescimento, época em que a planta apresenta um crescimento de folhas e emissão de cachos ao mesmo tempo, processo esse denominado de crescimento indeterminado. Desta forma, a modelagem do CWSI para as condições reais de campo é um grande desafio para a pesquisa, pois as plantas ficam sujeitas às condições ambientais com variações dos elementos do clima e do armazenamento de água no solo constantemente.

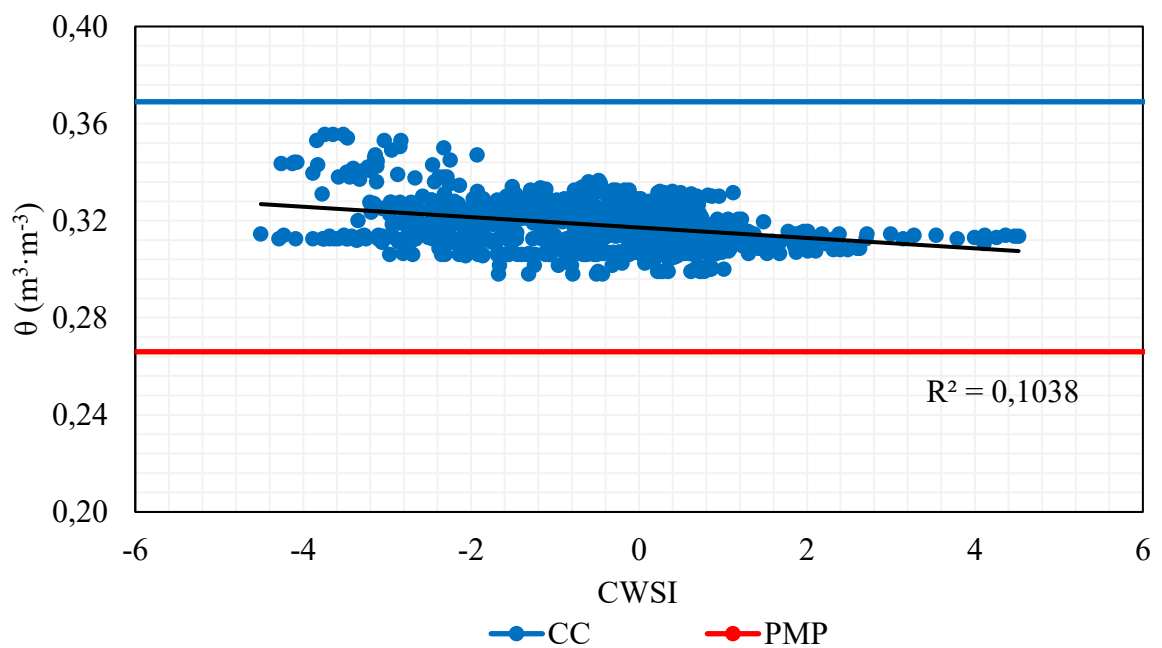
A Figura 22 mostra a linha de tendência da relação entre conteúdo de água no solo e o CWSI em cada estágio fenológico. O maior valor de  $R^2$  foi encontrado no estágio fenológico de emborrachamento do fruto com 0,22. Os resultados de Kapari et al. (2025) mostraram que durante o estágio vegetativo (V15) o  $R^2$  foi de 0,86 com base em NDWI, SAVI, TCARI\_RDVI, RedEdge, TIR, GNDVI e MTCI.



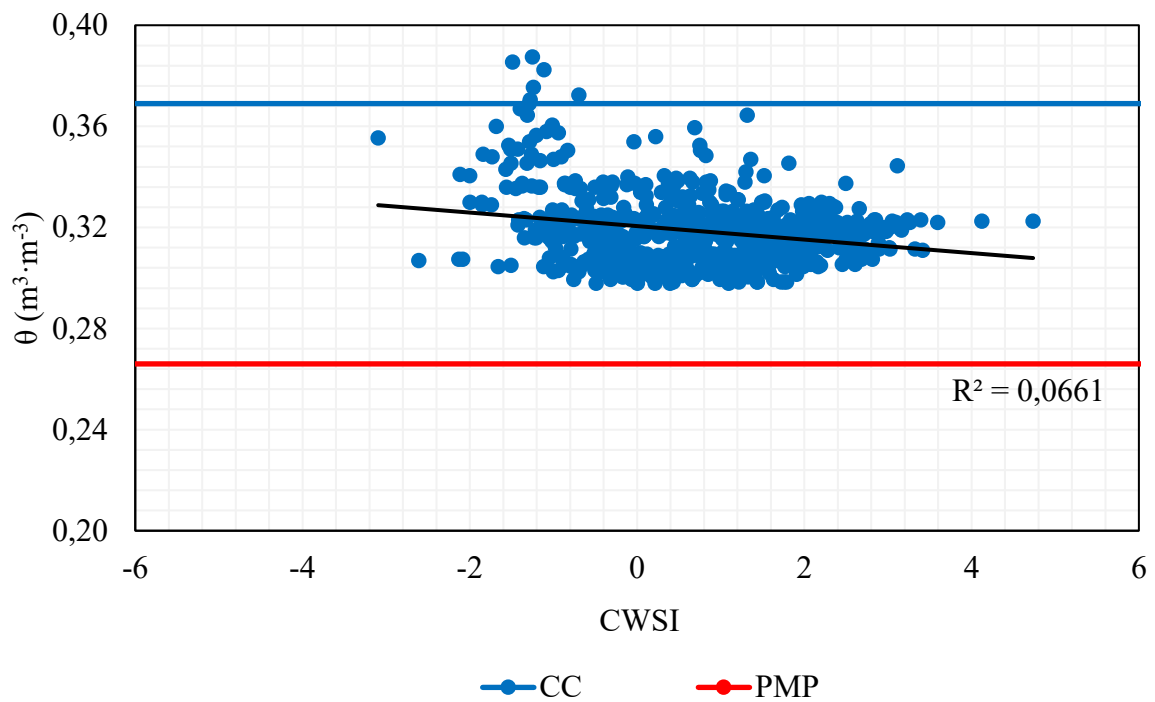
**Figura 22.** Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico de Repouso.



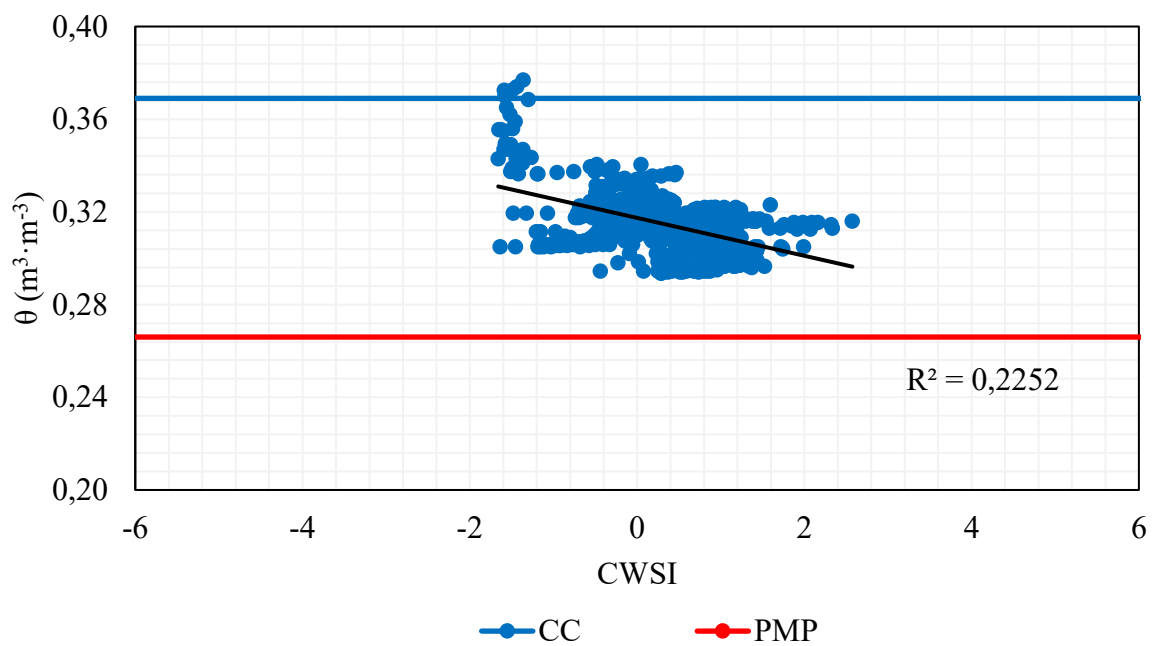
**Figura 23.** Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico de Brotação.



**Figura 24.** Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico de Brotação e florescimento.



**Figura 25.** Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico de Crescimento do fruto.



**Figura 26.** Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função do índice de estresse hídrico (CWSI) para o estágio fenológico de Emborrachamento do fruto.

Os baixos valores de  $R^2$  indicam que o CWSI não foi fortemente explicado pela umidade do solo, sugerindo que outros fatores, especialmente atmosféricos, exerceram influência sobre o CWSI.

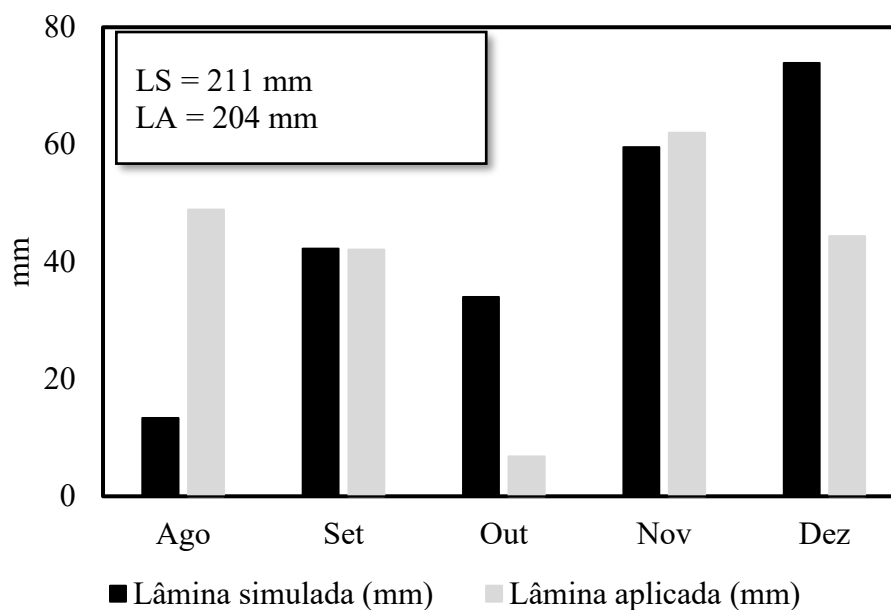
Nota-se que o estágio de brotação apresentou inclinação quase constante, provavelmente afetada pelo comportamento anormal que ocorreu pela arquitetura da copa não estar completamente formada e com folhas jovens, onde afetou a modelagem e o CWSI. Observa-se que no estágio de repouso fenológico alguns dados de umidade do solo chegaram próximo ao PMP, enquanto o estágio de crescimento do fruto os dados ultrapassaram a CC, indicando que alta umidade do solo, podendo ocorrer perdas superficialmente na área.

Com relação aos valores de CWSI nos estádios de repouso e brotação e florescimento, a maior parte dos dados concentrou-se na faixa de 0,2 a 0,4, correspondente à classificação “adequada”. Nos estádios de brotação e crescimento de fruto, a maioria dos valores variou entre 0,80 e 1, caracterizando condição “crítica”. E no estágio de emborrachamento do fruto os valores situaram-se entre 0,6 e 0,8, sendo classificados como “desfavoráveis”.

A relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e o CWSI, em geral apresentaram baixa correlação. Em todos os estádios fenológicos foi constatada uma tendência negativa, ou seja, à medida que o CWSI aumenta o conteúdo volumétrico diminui, sendo considerado comportamento ideal dessa relação e em conformidade do resultado esperado para o presente estudo.

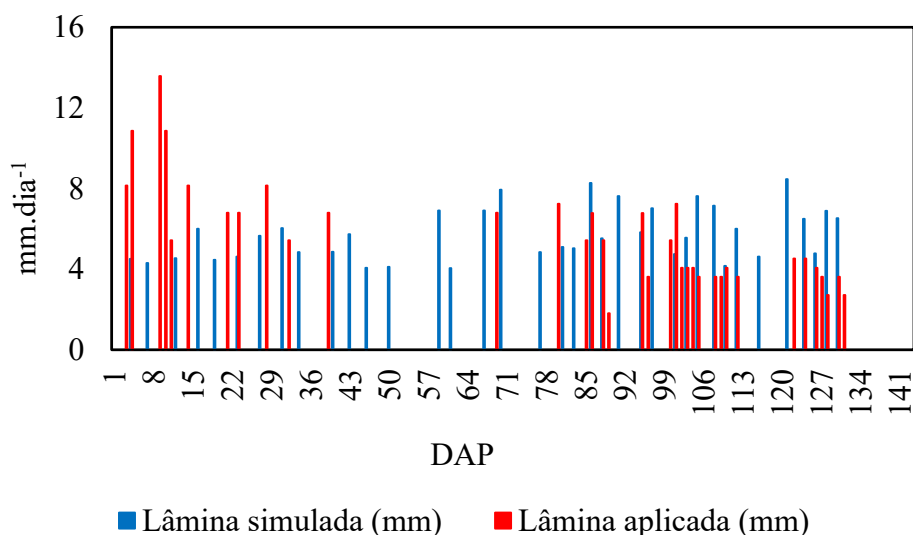
#### **4.8 Irrigação total necessária e eficiência do uso da água**

A Figura 27 ilustra os dados de lâmina mensal simulada obtida a partir da capacidade de armazenamento de água no solo na profundidade de 20 cm e de lâmina mensal aplicada pelo produtor para o ano de 2025. A lâmina simulada totalizou 211 mm, enquanto a lâmina total aplicada foi de 204 mm (Figura 27), evidenciando proximidade entre os valores acumulados ao longo ciclo da videira. Essa semelhança também foi observada nos meses de setembro (42,25 e 42,10 mm) e novembro (59,55 e 61,99 mm), indicando que, em termos sazonais, o volume total aplicado pelo produtor não apresentou discrepâncias relevantes em relação à demanda estimada.



**Figura 27.** Lâmina simulada e a lâmina aplicada pelo produtor em 2025.

Observa-se que logo após a poda, ocorrida em 19 de agosto, a lâmina aplicada pelo produtor foi quase quatro vezes maior que a lâmina simulada. Ao analisar os dados em escala diária, as lâminas aplicadas foram bem elevadas para o sistema de irrigação localizada, atingindo valores máximos de 13,58 mm e tempos de irrigação superiores a duas horas (Figura 16). Aplicações concentradas dessa magnitude podem exceder a capacidade de retenção de água no solo na zona radicular, favorecendo perdas por percolação profunda, no caso de solos de textura média a arenosa. Para a textura apresentada na área irrigada, solo argiloso, resulta em perdas por escoamento superficial.



**Figura 28.** Lâmina simulada e aplicada em função de Dias Após a Poda (DAP).

Embora o balanço hídrico acumulado tenha indicado adequação do volume total de água aplicado, a distribuição temporal da irrigação pode ser otimizada pelo manejo. Estratégias como o fracionamento da lâmina de irrigação em turnos menores ou ajustes na frequência de aplicação podem aumentar a eficiência do uso da água, reduzir perdas hídricas e favorecer maior disponibilidade de água na zona ativa do sistema radicular.

A eficiência do uso da água depende não apenas da quantidade total fornecida, mas também da sincronização entre a oferta hídrica, a demanda atmosférica e a capacidade de armazenamento de água no solo onde consiste na irrigação inteligente. Dessa forma, mesmo quando os volumes totais aplicados são semelhantes aos valores simulados, ajustes na programação diária da irrigação podem contribuir para maior eficiência agrônômica e energética do sistema.

A irrigação total necessária (ITN) estimada foi de 24,24 mm na área irrigada e na área não irrigada foi 58,8 mm.

A estimativa de produtividade foi realizada a partir da contagem do número de cachos em dez plantas de cada área experimental. Na área irrigada, foram produzidos em média de 37,7 cachos por planta. Posteriormente, foram selecionados e pesados cinco cachos representativos da área, obtendo-se massa média de 1,23 kg por cacho.

Com base na massa média e no número total de cachos, estimou-se a produção média por planta, a qual foi posteriormente extrapolada para área total, considerando o espaçamento e a densidade de plantio adotados. A Tabela 22 apresenta os valores estimados de produção por

planta, produtividade por hectare e eficiência de uso da água (EUA). A Tabela 21 apresenta os resultados de produtividade, produção e EUA.

Tabela 21. Produtividade, eficiência no uso de água (EUA), produção da videira.

Identificação	Variedade	Cachos	Produção	Produtividade	LA	EUA
			Kg planta <sup>-1</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	mm	Kg.m <sup>-3</sup>
Área irrigada	"Moscato"	37,7	46,2	40.535	204	1,99
Área não irrigada		20,6	16,4	14.416	Sem aplicação	Não aplicado

\*LA – Lâmina aplicada.

A produção média estimada foi de 46,2 kg planta<sup>-1</sup>, resultando em produtividade média de 40.535 kg ha<sup>-1</sup> na área irrigada, conforme apresentado na Tabela 21.

Para a área irrigada, a eficiência de uso da água (EUA) foi de 1,99 kg m<sup>-3</sup>, evidenciando adequada conversão do volume aplicado em produção comercial. Esse resultado foi superior aos valores apresentados por Andrade et al. (2023), para diferentes cultivares de videira: "Cabernet Sauvignon", "Malbec" e "Muscat Petit Grain", com eficiência de uso da água (EUA) de 0,54, 1,86 e 1,50 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente.

O valor observado no presente estudo indica que o manejo adotado proporcionou boa eficiência produtiva por unidade de água aplicada, reforçando o potencial da irrigação manejada com base em critérios técnicos para otimizar o desempenho hídrico da cultura.

É oportuno mencionar que foi realizada a contagem de cachos em 10 plantas da área não irrigada, resultando em média de 20,6 cachos por planta, ou seja, produtividade esperada muito abaixo da área irrigada. A produtividade estimada da área não irrigada foi de 14.416 Kg ha<sup>-1</sup> que corresponde a 1/3 da produção da área irrigada.

## 5 CONCLUSÕES

O monitoramento contínuo e em tempo real da umidade do solo demonstrou ser uma ferramenta eficaz para compreender o comportamento hídrico na zona radicular da videira, permitindo ajustes mais precisos no manejo da irrigação. Essa abordagem favorece maior sincronização entre reais necessidades da planta com base na oferta hídrica e demanda atmosférica, contribuindo para o uso eficiente da água e irrigação inteligente.

A linha de base inferior (NWSB) apresentou melhor ajuste na área irrigada, enquanto a linha de base superior demonstrou maior consistência na área não irrigada, exceto durante o estágio de brotação. Esses resultados indicam que o manejo da irrigação pode influenciar diretamente o comportamento térmico do dossel e a resposta fisiológica da planta.

Os limites inferiores (NWSB) e superiores do índice foram estabelecidos para cada estágio fenológico, dessa forma torna-se possível expandir a aplicação do CWSI para o mapeamento da variabilidade espacial do estresse hídrico em estudos futuros.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15.886-3 **Equipamentos de irrigação agrícola – Aspersores**. 1º ed., ISBN 978-85-07-09034-2, 24 p., 2022.

Allen, R. G.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 14 out. 2025.

Ammoniacci, M.; Kartsiotis, S. P.; Perria, R.; Storchi, P. State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 201, 2021.

Andrade, A. R. S.; Silva, E. G.; Silva, E. T.; Pereira, R. G.; Silva, J. F.; Costa, C. M.; Zamora, V. R. O.; Cruz, A. F. S.; Ferreira, M. E. S.; Silva, M. G. S.; Noronha, D. A. Avaliação do desempenho de sistema de irrigação por gotejamento em cultivo de maracujá. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, 2021, ISSN 2525-3409, DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14034>.

Andrade, Daniela da Silva; Silva, Mairon Moura da; Oliveira, Cássio Lopes de; Leão, Patrícia Coelho de Souza; Correia, Felipe Carnevalheira; Antonino, Antônio Celso Dantas; Alves, Maria Fernanda de Albuquerque Tenório; Lopes, Márcio Henrique Leal; Lima, José Romualdo de Sousa. Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência no uso de água de uvas viníferas cultivadas no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.16, n.03 2023, 1376-1386.

Bassoi, L. H.; Chaves, A. R. M.; Teixeira, R. P. Responses of Syrah grapevine to deficit irrigation in the Brazilian semi-arid region. **Agricultural Water Management**, Oxford, v. 258, p. 107186, 2021.

Bellvert, J.; Marsal, J.; Girona, J.; Zarco-Tejada, P. J. Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrig. Sci.* 33 (2), 81–93, 2015.

Bellvert, Joaquim; Marsal, Jordi; Girona, Joan; Gonzalez-Dugo, Victoria; Fereres, Elías. Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Agricultura de Precisão**, 15:361-376, DOI 10.1007/s11119-013-9334-5, 2014.

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 265p

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Análise territorial para o desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil para o período 2020-2023**. 2020. Disponível em: [https://www.gppesalq.agr.br/\\_files/ugd/9957b7\\_08c174c8c60e4d9cb8213f9e040f563a.pdf](https://www.gppesalq.agr.br/_files/ugd/9957b7_08c174c8c60e4d9cb8213f9e040f563a.pdf). Acessado em: 11 abr. 2025.

Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. A. S. **Métodos de análise química e física de solos do IAC**. Campinas, IAC, 2009. 94 p. (Boletim técnico, 106).

Cassel, D. K.; Nielsen, D. R. Field Capacity and Available Water Capacity, In: Klute A (ed), *Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of American, Book Series 5.1, **Anais...** Madison: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, p. 901-926, 1986.

Costa-Filho, E.; Chávez, J. L.; Comas, L. Determining maize water stress through a remote sensing-based surface energy balance approach. **Irrig. Sci.**, v.38, n.5, pp. 501-518, 2020.

Dayer, Silvina; Herrera, José; Dai, Zhanwu; Burlett, Régis; Lamarque, Laurent J.; Delzon, Sylvain; Bortolami, Giovanni; Cochard, Hervé; Gambetta, Gregory A. Nighttime transpiration represents a negligible part of water loss and does not increase the risk of water stress in grapevine. **Plant Cell Environ**, 2021;44:387–398.

El-Hendawy, S.; Al-Suhaibani, N.; Hassan, W.; Tahir, M.; Schmidhalter, U. Hyperspectral reflectance sensing to assess the growth and photosynthetic properties of wheat cultivars exposed to different irrigation rates in an irrigated arid region. **PLoS One**, v. 12, n. 8, p. e0183262, 2017.

EMBRAPA - **Uva e Vinho** (2023). Cadastro Vitícola Nacional. Online. Disponível em: <https://www.embrapa.br/uva-e-vinho/cadastro-viticola-nacional?>. Acesso em: 21 nov. 2025.

EMBRAPA. **Tolerância de Videiras à Salinidade**. Seminário Novas Perspectivas para o Cultivo da Uva sem Sementes... Embrapa Semi-Árido, Documentos 185, 2004.

EMBRAPA. **Índices para a Quantificação da Seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1ª ed., 244, 48 p., ISSN 1678-9644, 2009.

FAO. **CLIMWAT for CROPWAT**: a climatic database for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 49. Rome, 1993. 113 p.

Góes, Juliana de Almeida; Prado, Dijaina Ferreira Sardinha; Pires, Regina Célia de Matos; Chiorato, Alisson Fernando; Silveira, Jane Maria de Carvalho. Crop water stress index of beans. **BRAGANTIA**, v. 84, p. 1-14, 2025.

Gonzalez-Dugo, V.; Testi, L.; Villalobos, F. J.; López-Bernal, A.; Orgaz, F.; Zarco-Tejada, P. J.; Zarco-Tejada, P. J.; Fereres, E. E. Validation of the relationship between the crop water stress index and relative transpiration in almond trees. **Agric. Meteorol.**, pp. 292-293, 2020.

Helaly, M. N.; El-Hoseiny, H.; El-Sheery, N. I.; Santos-Villalobos, S. D. L.; Wróbel, J.; Hassan, I. F.; Gaballah, M. S.; Abdelrhman, L. A.; Mira, A. M.; Alam-Eldein, S. M. 5-aminolevulinic acid and 24-epibrassinolide improve the drought stress resilience and productivity of banana plants. **Plants**, v.11, n.6, pp.743, 2022.

Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Pinter, P. J.; Reginato, R. J.; Hatfield, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45-55, 1981.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acessado em: 3 Set. 2024.

Instituto de Economia Agrícola - IEA. **Estatísticas da Produção Paulista**. 2025. Disponível em: [https://infoiea.agricultura.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](https://infoiea.agricultura.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1). Acesso em: 25 abr. 2026.

INSTITUTO AGRONÔMICO (IAC). Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Edição 2022. Campinas: Instituto Agrônômico, 2022. 500 p

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**: Ministério da agricultura e pecuária. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A715>. Acessado em: 20 mai. 2025.

Jackson, R. D.; Idso, S.; Reginato, R.; Pinter, P. Jr. Canopy temperature as a crop water stress index indicator. **Water Resources Research**, 17, 1133–1138.

Jackson, R. D.; Kustas, W. P.; Choudhury, B. J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrig Sci** 9, 309-317, 1988. <https://doi.org/10.1007/BF00296705>.

Katimbo, A., Rudnick, D.R., DeJonge, K.C., Lo, T.H., Qiao, X., Franz, T.E., Nakabuye, H.N., Duan, J., 2022. Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. **Agricultural Water Management** 266, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107575>.

Kapari, M.; Sibanda, M.; Magidi, J.; Mabhaudhi, T.; Mpandeli, S.; Nhamo, L. Assessment of the Maize Crop Water Stress Index (CWSI) Using Drone-Acquired Data Across Different Phenological Stages. **Drones**, 2025, 9, 192. <https://doi.org/10.3390/drones9030192>.

Keller, J.; Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-784, 1974.

Keller, J.; Karmeli, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133 p.

King, B. A.; Shellie, K. C.; Tarkalson, D. D.; Levin, A. D.; Sharma, V.; Bjorneberg, D. L. Data-driven models for canopy temperature-based irrigation scheduling. **Trans. ASABE**, v. 63, n. 5, pp. 1579-1592, 2020.

Khanal, Sami; Fulton, John; Shearer, Scott. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture, **Computers and Electronics in Agriculture**, v.139, p.22, 2017.

Leão, P. C. S. De; Silva, D. J. Cultivo da videira no semiárido nordestino. In: PIO, R. **Cultivo de fruteiras de clima temperado em regiões subtropicais e tropicais**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2018. p.586-625.

Lena, B. P.; Ortiz, B. V.; Jiménez-Lópe, A. F.; Sanz-Sáez, Á.; O'shaughnessy, S. A.; Durstock, M. K.; Pate, G. Evaluation of infrared canopy temperature data in relation to soil water-based irrigation scheduling in a humid subtropical climate. **Trans. ASABE**, v.63, n.5, pp. 1217-1231, 2020.

Libardi, P. L. Água no solo. In: Lier QJV (ed), física do solo. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 103-152, 2010.

Machado, J. L.; Tormena, C. A.; Fidalski, J.; Scapim, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **R Bras Ci Solo**, 32: 495-502, 2008.

Mota, J. C. A.; Libard, P. L.; Brito, A. S.; Assis Junior, R. N.; Amaro Filho, J. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo com cobertura e desnuda. **R Bras Ci Solo**, 34: 1721-1731, 2010.

Mantovani, E. C., Bernardo, S., Palaretti, L. F. **Irrigação - Princípios e Métodos**. Editora UFV. Pág. 355, 3ª ed. Viçosa – MG, 2009.

Martello, M.; Molin, J. P.; Bazame, H. C.; Tavares, T. R.; Maldaner, L. F. Use of Active Sensors in Coffee Cultivation for Monitoring Crop Yield. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 740, 2022.

Meyer, P. D.; Gee, G. W. Flux-based estimation of field capacity. *J. Geotechn. Geoenviron. Eng.*, v. 125, p. 595-599, 1999.

MONTEIRO, A. I.; MALHEIRO, A. C.; BACELAR, E. A. Morphology, physiology and analysis techniques of grapevine bud fruitfulness: A review. **Agriculture**, Basel, v. 11, n. 2, p. 127, 2021.

Neto, J. M. D. M.; Nascimento, A. A. D.; Silva, I. O. D.; Oliveira, C. E. D.; Silva, A. R. A. D.; Fernandes, C. N. V. Coeficientes de Uniformidade na Irrigação por Aspersão Convencional em Área de Pastagem Cultivada. **Irriga, Botucatu**, v. 29, p. 162-168, 2024.

Ochsner, T. E. Rain or shine An introduction to soil physical properties and processes. **Department of Plant and Soil Sciences**, Oklahoma State University, 2024.

Oliveira, J. A. M. Balanço hídrico climatológico e classificação climática de Thornthwaite e Mather para o município de Conceição do Mato Dentro – MG. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 13, n.1, p. 3203-3211, 2019.

OIV. **Database:** What we do. 2024. Disponível em: <https://www.oiv.int/what-we-do/data-discovery-report?oiv>. Acesso em: 25 abr. 2026.

Parahybaet, R. B. V.; Araújo, M. S. B.; Almeida, B. G.; Rolimneto, F. C.; Sampaio, E. V. S. B.; Caldas, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 1-20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920181031>.

Pérez, F. J.; Rubio, S. Relationship Between Bud Cold Hardiness and Budbreak in Two *Vitis vinifera* L Cultivars, Chardonnay and Thompson Seedless. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 41, n. 2, p. 840–847, 2022.

Pereira Filho, J. V.; Bezerra, F. M. L.; Silva, T. C.; Pereira, C. C. M. S. Chagas, K. L. Alteração química do solo cultivado com feijão caupi sob salinidade e dois regimes hídricos. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.11, n.º.8, p. 2206 - 2216, 2017a. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v11n800717>.

Piña-Rey, A., Ribeiro, H., Fernandez-Gonzalez, M., Abreu, I. and Rodriguez-Rajo, J. (2021). Phenological model to predict bud-break and flowering dates of four *Vitis vinifera* L. cultivars cultivated in DO. Ribeiro (North-West Spain). *Plants*, 10, 502. <https://doi.org/10.3390/plants10030502>.

Raij, B. van., Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A., 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas. 285p. ISBN 85-85564-05-9.

Ratnaparkhi, S.; Khan, S.; Arya, C.; Khapre, S.; Singh, P.; Diwakar, M.; Shankar, A. WITHDRAWN: Smart agriculture sensors in IOT: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 13, 2020.

Richards, L.A. Physical conditions of water in soil. In: Black, C. A., Evans, D. D.; White, J. L.; Clark, F. E. (ed.) **Methods of soil analysis** - physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSSA, p.128-152, 1965.

Richards, L.A. Physical conditions of water in soil. In: Black, C. A., Evans, D. D.; White, J. L.; Clark, F. E. (ed.) **Methods of soil analysis** - physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSSA, p.128-152, 1965.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo:** revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118 p.

São Paulo (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Instituto de Economia Agrícola. Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável. **Projeto LUPA 2016/2017:** Censo Agropecuário do Estado de São Paulo. São Paulo: SAA: IEA: CDRS, 2019.

Silva, B. M.; Silva, E. A. d.; Oliveira, G. C. d.; Ferreira, M. M.; Serafim, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 38, n. 2, 2014.

Silva, Roberta Patrícia de Sousa; Santos, Juscelina Arcanjo dos; Campoe, Otávio Camargo; Guillemot, Joannès; Silva, Magali Ribeiro da; Maire, Gueric Beaudouin Cathel Maire le. Relação da condutância estomática com o déficit de pressão de vapor de dois clones de Eucalyptus em diferentes manejos no período seco e chuvoso. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 315-319 p., 2023.

Silva, G. B. S. Da.; Bolfe, E. L., G. J. De C.; Moraes, J. F. L. De.; Silveira, J. M. De C.; Maria, I. C. De; Pires, R. C. De M.; Sano, E. E.; Parreiras, T. C.; Santos, C. O. Dos; Leandro, V. B. S.; Castro, V. H. M. De; Rezende, P. M. de.; MARTINS, L. L. Diagnóstico agroambiental dos municípios com os distritos agrotecnológicos do projeto Semear Digital. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 21. Ed., 53 p., 2965-7342, 142, 2025.

Silva, A. P.; Tormena, C. A.; Dias Junior, M. S.; Imhoff, S.; Klein, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Van Lier QJ (ed), Física do Solo. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, p. 241-281, 2010.

Silveira, J. M. de C.; Góes, J. de A.; Prado, D. F. S.; Pires, R. C. de M.; Chiorato, A. F. Baselines for Calculating Crop Water Stress Index in Bean Cultivation. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume 48, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-2024-501-2024>, 2024.

Soares, J. M.; Costa, F. F da. Irrigação da cultura da videira. In: Souza Leão, P. C. de; Soares, J. M. (Ed.). **A Viticultura no semi-árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2000. p. 147-212.

Souza, L. O. C.; Mantovani, E. C.; Soares, A. A.; Ramos, M. M.; Freitas, P. S. L. Avaliação de Sistemas de Irrigação por Gotejamento, Utilizados na Cafeicultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n.3, p.541–548. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG. 2005.

Spachos, P.; Gregori, S. Integration of Wireless Sensor Networks and Smart UAVs for Precision Viticulture. **IEEE Internet Computing**, v. 23, n. 3, p. 8-16, 2019.

Taiz, L.; Zeiger, E; Moller, I. M.; Murphy, A. Plant physiology and development. **Artmed**, 6 ed., ISBN 9781605352558, 2017.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W G. **MANUAL DE METODOS DE ANALISE DE SOLO**. Brasília, DF: Embrapa solos, 3. ed. ver. e ampl., 2017.

Van Genuchten, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci**. V44, n. 5, p. 892-898, 1980.

Vieira, Gustavo Haddad Souza; Nascimento, Demétrius Pinto; Monaco, Paola Alfonsa Vieira Lo; Hadadde, Ismail Ramalho; Rosado, Thiago Lopes; Neto, Alberto Chambela. Eficiência de Irrigação em Cafeeiros Conilon na Região Centro Serrana do Espírito Santo. **Ifes Ciência**, v.6, n.3, p. 22-34, ISSN 2359-4799, 2020.

Wong, C. Y. S.; Bambach, N. E.; Alsina, M. M.; Mcelrone, A. J.; Jones, T.; Buckley, T. N.; Kustas, W. P.; Magney, T. S. Detecting short-term stress and recovery events in a vineyard using tower-based remote sensing of photochemical reflectance index (PRI). **Irrigation Science**, v. 40, n. 4-5, p. 683-696, 2022.

Yuan, G.; Luo, Y.; Sun, X.; Tang, D. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. **Agric Water Manag**, 64(1):29–40, 2004.

Zhuang, S.; Wang, P.; Jiang, B.; Li, M.; Gong, Z. Early detection of water stress in maize based on digital images. **Comput. Electron. Agric.** v.140, p.461–468, 2017.