

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL**

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO: USO DA TERMOMETRIA POR
INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DA SOJA**

Murilo Brum de Moura

Santa Maria, RS

2022

Murilo Brum de Moura

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO: USO DA TERMOMETRIA POR
INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientadora: Prof. Dra. Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Moura, Murilo Brum de
MANEJO DA IRRIGAÇÃO: USO DA TERMOMETRIA POR
INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DA SOJA / Murilo Brum de Moura.- 2022.
53 p.; 30 cm

Orientadora: Mirta Teresinha Petry
Coorientadores: Juliano Dalcin Martins, Astor
Henrique Nied, Joel Cordeiro da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Evapotranspiração da cultura 2. Crop Water Stress
Index 3. Déficit hídrico 4. Balanço de energia I.
Teresinha Petry, Mirta II. Dalcin Martins, Juliano III.
Henrique Nied, Astor IV. Cordeiro da Silva, Joel V.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MURILO BRUM DE MOURA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Murilo Brum de Moura

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO: USO DA TERMOMETRIA POR
INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DA SOJA**

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 08 de novembro de 2022.

Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM) - Videoconferência
(Orientador/Presidente)

Astor Henrique Nied, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Juliano Dalcin Martins, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Joel Cordeiro da Silva, Dr. (IFFar) - Videoconferência

Santa Maria, RS

AGRADECIMENTOS

À Deus, agradeço pela vida e saúde durante todo o percurso desta trajetória;

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por oportunizarem a realização desse trabalho.

Aos meus pais, Sonia e Severino e ao meu irmão Gabriel, pelo apoio, incentivo, compreensão e amor incondicional.

À minha namorada Daiane Valente, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

À minha orientadora, professora Mirta Teresinha Petry, pela orientação, amizade, confiança, ensinamentos e experiências compartilhadas.

Ao professor Juliano Dalcin Martins pela ajuda, apoio, amizade, ensinamentos e incentivo para desenvolver os trabalhos.

Ao professor Astor Henrique Nied pelo incentivo e apoio no desenvolver dos trabalhos.

Ao professor Joel Cordeiro da Silva pelo apoio ao longo da trajetória acadêmica e por aceitar ser membro da banca.

Aos meus familiares e amigos mais próximos, que se fizeram presentes de alguma forma durante o período de execução desse trabalho.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório Sistema Irriga: Bruna de Villa, Clarissa Moraes da Silva, Felipe Tonetto, Elton Ferreira, Jainara Fresinghelli, Giane Lavarda, Alessandro Stefanello, Jamilson Slim, Rafaela Werle, Andressa Gonçalves, Guilherme Hünemeier, Cassio Ferrazza, Julia Antunes, Carla Spielmann, Matheus Bellé, Luiz Copetti e a todos os estudantes que compõe o grupo por toda a ajuda e auxílio nas atividades desenvolvidas, pelos momentos de descontração e união de todos.

E a todos aqueles que torceram, incentivaram e contribuíram de alguma forma para a realização do trabalho.

RESUMO

AUTOR: Murilo Brum de Moura
ORIENTADORA: Mirta Teresinha Petry

MANEJO DA IRRIGAÇÃO: USO DA TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA CULTURA DA SOJA

O cultivo da soja tem se expandido nos últimos anos, tanto no Brasil como em outros países, entretanto o que mais limita a produtividade é o déficit hídrico, mas o mesmo pode ser contornado com o uso de irrigação suplementar. Para tanto, é necessária uma estimativa acurada do requerimento hídrico, para que o manejo da irrigação seja eficiente. Deste modo, o manejo da irrigação pode ser baseado no solo, na atmosfera e na planta, sendo do ponto de vista fisiológico o baseado na planta um dos mais acurados, para isso uma das medidas usadas é a temperatura do dossel da cultura, e a partir dela calculado o *Crop Water Stress Index* (CWSI). Portanto, o objetivo desse trabalho é mensurar a temperatura do dossel ao longo do cultivo da soja para quantificar o índice de estresse hídrico da cultura, através da metodologia empírica proposta por Idso et al., (1981) e a metodologia analítica Jackson et al. (1981). Para isso foram instalados termômetros infravermelhos (TIV) acima do dossel das culturas monitoradas. As culturas foram submetidas a diferentes níveis de estresse hídrico. Os dados da temperatura do dossel para o cálculo do índice de estresse hídrico foram associados a outros parâmetros meteorológicos, como: radiação líquida, velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar. Uma das primeiras respostas das plantas ao déficit hídrico é o fechamento estomático, e conseqüente redução na transpiração. Uma vez que a transpiração requer energia, quando falta água para o processo ocorrer, as folhas absorvem a energia que seria dissipada e aquecem, as plantas em ótimo estado hídrico apresentaram menores temperaturas do dossel, indicando que há uma relação entre status hídrico e temperatura do dossel. Comparando as duas metodologias foi observado que há uma boa correlação entre elas, entretanto a metodologia empírica apresentou maior variação entre os resultados, mas por ter fácil aplicação também pode ser utilizado.

Palavras-chave: Evapotranspiração da cultura; Crop Water Stress Index; déficit hídrico, balanço de energia.

ABSTRACT

AUTHOR: Murilo Brum de Moura
ADVISOR: Mirta Teresinha Petry

IRRIGATION WATER MANAGEMENT: USING THE INFRARED THERMOMETRY FOR DETECTING CROP WATER STRESS IN SOYBEAN

Soybean cultivation has expanded in recent years, both in Brazil and in other countries. However, what most limits productivity is the water deficit, which can be overcome by using supplementary irrigation. Therefore, an accurate water requirement estimate is necessary to ensure efficient irrigation management. In this way, irrigation management can be based on soil, atmosphere, and plant, and from a physiological point of view, plant-based irrigation is one of the most accurate. From it, the Crop Water Stress Index (CWSI) was calculated. Therefore, this work aims to measure the canopy temperature during soybean crop season to quantify the water stress index of the crop through the empirical methodology proposed by Idso et al. (1981) and the analytical methods of Jackson et al. (1981). For this, infrared thermometers (TIV) were installed above the canopy to monitor the crop from full ground cover by the canopy to the end of the cycle. The cultures were submitted to different levels of water stress. The canopy temperature data for calculating the water stress index were associated with other meteorological parameters, such as net radiation, wind speed, air temperature, and relative humidity. One of the first responses of plants to water deficit is stomatal closure and consequent reduction in transpiration. Since transpiration requires energy, the leaves absorb the energy that would be dissipated and heated up when water is lacking for the process to occur. So, plants in optimal water status had lower canopy temperatures, indicating a relationship between water status and plant temperature canopy. Comparing the two methodologies, it was observed that there is a good correlation between them. However, the empirical method presented more significant variation between the results, being an easy-to-use approach.

Key words: Crop evapotranspiration, Crop Water Stress Index, water deficit, energy balance.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1	A CULTURA DA SOJA NO BRASIL	12
3.2	REQUERIMENTO HÍDRICO DA SOJA	12
3.4	A TERMOMETRIA E O MANEJO DE IRRIGAÇÃO	14
3.4.1	Termometria por infravermelho	15
3.5	MANEJO DA IRRIGAÇÃO	15
3.5.1	Manejo da irrigação baseado em condições meteorológicas	16
3.5.2	Manejo da irrigação baseado na umidade do solo	17
3.5.3	Manejo da irrigação baseado na planta	19
4	ARTIGO I - TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA CULTURA DA SOJA	21
4.1	INTRODUÇÃO	21
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.2.1	Caracterização da área experimental e do experimento	23
4.2.2	Manejo da irrigação	24
4.2.3	Observações da planta durante o ciclo	24
4.2.4	Monitoramento das condições meteorológicas	26
4.2.5	Monitoramento do conteúdo de água no solo	26
4.2.6	Grau dia de estresse (SDD)	27
4.2.7	Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)	27
4.2.7.1	Método analítico do Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)	28
4.2.7.2	Método empírico do Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)	29
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.4	CONCLUSÃO	43
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja possui grande importância para a economia de diversos países, pois é utilizada na alimentação humana, ração animal, produção de biodiesel e em diversos produtos industrializados. A soja é a cultura de maior relevância do Brasil, ocupando uma área de 41,45 milhões de hectares, com uma produção de 125,55 milhões de toneladas na safra 2021/2022 e estimativa de produção de 149 milhões de toneladas em 2022/23 (CONAB, 2022). O Rio Grande do Sul (RS) representa cerca de 15% da área cultivada de soja no país, sendo o quarto maior estado produtor (CONAB, 2022). Na última década, o rendimento da soja no RS cresceu em torno de 35%, em comparação à década anterior (TAGLIAPIETRA et al., 2018). Esse crescimento é atribuído aos fatores de manejo, como o ajuste nas épocas de semeadura de menor risco climático, escolha dos cultivares (BATTISTI e SENTELHAS, 2017b) e ao uso da irrigação (NENDEL et al., 2014).

A redução na produtividade quando submetida ao déficit hídrico, pode acarretar perdas de 46% (BATTISTI et al., 2018) a 74% (SENTELHAS et al., 2015). O déficit hídrico afeta os processos fisiológicos das plantas, desencadeando alguns mecanismos de proteção, como o fechamento estomático, o enrolamento das folhas, a senescência foliar precoce, entre outros (PAGLIARINI et al., 2018). Portanto, quantificar os efeitos da redução de disponibilidade de água no solo na performance da cultura é fundamental, sobretudo em áreas de sequeiro, para se buscar práticas de manejo que mitiguem efeitos do déficit hídrico (JHA et al., 2018).

O déficit hídrico é particularmente danoso durante a floração, início da formação e enchimento do grão (KARAM et al., 2005, PAYERO et al., 2005). Déficits hídricos moderados durante o desenvolvimento vegetativo geralmente não impactam negativamente o rendimento (MONTROYA et al., 2017) e podem induzir a planta a um melhor desenvolvimento radicular, de forma a otimizar o uso da água do solo. Embora o total de chuvas durante o ciclo da soja seja suficiente para atender o requerimento hídrico da cultura, a distribuição irregular e eventual ausência durante os períodos críticos da cultura, fazem com que irrigações suplementares sejam muitas vezes requeridas para evitar ou diminuir os efeitos do déficit hídrico (GIMÉNEZ et al., 2017).

No RS, onde predomina um clima subtropical úmido, com uma alta variabilidade no total e na distribuição das chuvas durante os meses de primavera-verão, a estabilidade e aumento da produção poderá ser garantido com o uso de irrigação suplementar (GIMÉNEZ et al., 2017, PETRY et al., 2020). Para tanto, uma acurada estimativa do requerimento hídrico, sobretudo nos períodos críticos da cultura, é necessária, visando auxiliar o produtor no manejo, planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação (AYYOUB et al., 2017).

O adequado manejo da irrigação requer a quantificação do consumo de água, que é equivalente a evapotranspiração da cultura (ET_c). Vários métodos de estimativa da ET_c são nomeados na literatura, destacando-se a metodologia de duas etapas (K_c-ET_o) introduzida por Doorenbos e Pruitt (1977), revisada por Pereira et al. (2015a) em que o coeficiente de cultura (K_c) é multiplicado pela evapotranspiração de referência (ET_o) para estimar a ET_c . Por essa metodologia, a ET_o representa o efeito primário das condições meteorológicas do local, enquanto o K_c representa as características biofísicas da vegetação durante o ciclo da cultura. Entretanto, outros métodos podem ser utilizados para melhorar as estimativas da ET_c e que podem trazer benefícios ao método tradicional, como os métodos baseados na planta (JONES, 2004), métodos baseados na umidade do solo (IRMAK et al., 2014), assim como, o sensoriamento remoto através do uso de índices de vegetação (POÇAS et al., 2015).

Os métodos baseados na planta talvez sejam os mais eficazes para a tomada de decisão sobre quando irrigar (FERNANDEZ e CUEVAZ, 2010), dado que a planta responde às variações no conteúdo de água no solo e à demanda evaporativa da atmosfera. Recentemente, medições da temperatura do dossel (ou da folha) têm sido utilizadas para detectar o estado hídrico da planta. Dado que a abertura estomática atua como mecanismo de resfriamento via evapotranspiração, a temperatura das folhas é influenciada pelo estado hídrico da planta, do solo, e condições meteorológicas, (BLONQUIST et al., 2009). Entretanto, fatores meteorológicos e a velocidade do vento podem rapidamente alterar a temperatura do dossel, fazendo com que seja necessário criar índices entre a temperatura do dossel e a do ar que caracterizem o estresse (GIMÉNEZ-GALÉGO et al., 2021) e auxiliem na tomada de decisão de quando irrigar (DEJONGE et al., 2015).

Um dos primeiros sintomas de estresse hídrico que pode ser detectado é o aumento na temperatura do dossel da planta em comparação com uma cultura irrigada, em dias com grande incidência de radiação solar (KULLBERG et al. 2017). Isso ocorre porque a taxa de transpiração diminui, limitada pelo decréscimo de água na zona radicular (a transpiração das culturas resfria o dossel das culturas, visto que há perda de energia pela transformação do estado da água) (TAGHVAEIAN et al., 2012).

Dentre os métodos para a mensuração da temperatura do dossel, a termometria infravermelha tem sido mais utilizada, sendo um método não destrutivo, que pode monitorar desde plantas individuais até mesmo grandes plantações (O'SHAUGHNESSY et al., 2012). Estes sistemas de termometria infravermelha podem ser instalados fixos em campo, ou móveis em pivôs centrais ou em veículos aéreos não tripulados (VANT's), que facilitam a aplicação em grandes áreas devido a sua mobilidade (BELLVERT et al., 2013).

A partir dos dados de temperatura do dossel, podem ser utilizados diversos índices, entretanto, o mais utilizado tem sido o índice de estresse hídrico da cultura (EGEA et al., 2017), do termo técnico em inglês *Crop Water Stress Index* (CWSI). Para a sua estimativa, Idso et al. (1981) propuseram um método empírico, enquanto Jackson et al. (1981) propuseram um CWSI baseado no balanço energético do solo-planta-atmosfera. Assim, estas metodologias com base na temperatura do dossel para estimativa do CWSI, foram utilizadas neste estudo visando identificar o estresse hídrico da cultura de forma mais precisa, usando diferentes manejos de irrigação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Mensurar a temperatura do dossel ao longo do ciclo da soja, visando quantificar o índice de estresse hídrico da cultura por termometria de infravermelho.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a variação da temperatura do dossel ao longo do dia para cada manejo de irrigação;
- Comparar o método analítico de Jackson et al. (1981) e o empírico proposto por Idso et al. (1981) para a estimativa de índices de estresse, baseados na medição da temperatura do dossel;
- Quantificar diferentes índices de estresse hídrico da cultura (CWSI) em função dos diferentes manejos de irrigação adotados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A CULTURA DA SOJA NO BRASIL

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) teve origem na China, há aproximadamente 5.000 anos (Embrapa, 2003). A morfologia da planta era muito diferente da que se conhece hoje, pois tinha características de planta rasteira e que se desenvolvia apenas em locais extremamente úmidos, como nas proximidades de rios e lagos. O melhoramento genético foi realizado durante muitos anos, através de diversos cruzamentos, e então se chegou nas características conhecidas hoje (KIIHL et al., 1985).

No Brasil, o primeiro relato sobre o cultivo é de 1882, no estado da Bahia e, posteriormente, em São Paulo em 1990 (BONETTI, 1981). Entretanto, o cultivo foi consolidado no país no estado do Rio Grande do Sul, no ano de 1914, como alternativa para a rotação com a cultura do trigo (CÂMARA e HEIFFIG, 2006) sendo no estado que as cultivares trazidas dos EUA melhor se adaptaram às condições edafoclimáticas, principalmente o fotoperíodo (BONETTI, 1981). Ao longo dos anos, programas de melhoramento genético da cultura foram implantados, com objetivo de estender o período juvenil da cultura, possibilitando assim que o cultivo se estendesse para a região central, norte e nordeste do país (KIIHL e GARCIA, 1989; REIS et al., 2020).

3.2 REQUERIMENTO HÍDRICO DA SOJA

O cultivo da soja vem crescendo ao longo dos últimos anos, porém, a produtividade varia de acordo com a interação entre o genótipo, o ambiente e o manejo. Entretanto, o principal fator que limita a produtividade é a disponibilidade hídrica (BATTISTI E SENDELHAS, 2017); esta, no Sul do Brasil se deve às oscilações no regime pluviométrico, sendo este, fortemente influenciado pelo fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) (BATTISTI E SENDELHAS, 2019).

A cultura da soja requer uma média de 500 mm de água durante o ciclo para obter uma produtividade elevada (IRMAK e SHARMA, 2015), entretanto, valores 400 a 700 mm de água podem ser necessários (GIMÉNEZ et al., 2017), dependendo do ambiente e da duração do período de desenvolvimento. O requerimento hídrico, ou seja, a evapotranspiração da cultura (ET_c) pode variar

conforme as características do dossel, a fração de solo efetivamente sombreada (IRMAK, 2017), datas de semeadura (DO RIO et al., 2016) e duração do ciclo (KASSIE et al., 2015).

Um dos fatores de produção responsáveis pela estabilização e aumento do rendimento da soja nas regiões subtropicais é o uso da irrigação suplementar às chuvas (MONTROYA et al., 2017; GIMÉNEZ et al., 2017). O déficit hídrico resulta em menores rendimentos, sobretudo nos períodos críticos, entre o florescimento e enchimento de grãos porque envolvem diretamente a formação dos componentes do rendimento (PAYERO et al., 2005). Abortamento de flores, redução no número e tamanho de vagens, são os componentes mais afetados pelo déficit hídrico nesses estádios (ANDA et al., 2021).

A soja pode responder bem quando a reposição de água é menor que o requerimento hídrico, mantendo a umidade do solo acima de 50% da capacidade de campo (LICH et al., 2013), sobretudo durante o período vegetativo (MONTROYA et al., 2017). Por outro lado, quando o estresse ocorre durante o período reprodutivo, parte da biomassa produzida é particionada entre o caule e as raízes, em detrimento folhas e grãos (WIJEWARDANA et al., 2018), em decorrência da drástica redução na transpiração, afetando negativamente o rendimento.

A maior parte das áreas com soja no Brasil são conduzidas sob condições de sequeiro, deste modo, sujeitas às variabilidades climáticas, sobretudo, a distribuição irregular e/ou ausência de precipitações. Portanto, o uso de irrigação suplementar é um dos fatores de produção responsáveis pela estabilização e aumento do rendimento da soja nas regiões subtropicais (MONTROYA et al., 2017 e GIMÉNEZ et al., 2017). O uso de irrigação suplementar proporciona a estabilidade e incremento na produção em regiões subtropicais úmidas (MONTROYA et al., 2017), como é o caso do Rio Grande do Sul. Entretanto, diante do cenário atual de preços dessa commodity e dos custos de produção, incluindo aqueles relacionados à irrigação, o adequado manejo da irrigação passa a ter fundamental importância visando aumentos de lucratividade.

Em condições de suficiente umidade no solo para suprimir a demanda da cultura, plantas de soja transpiram normalmente, em resposta aos fatores ambientais (JONES et al., 2009). A transpiração (T) mantém regulada a temperatura dos tecidos em níveis adequados ao metabolismo fisiológico e, à

medida que a umidade do solo decresce, as plantas tendem a fechar os estômatos, desencadeando processos morfológicos e fisiológicos que resultam na redução da ET_c (ANDA et al., 2021). Assim, a estimativa da ET_c para fins de monitoramento da irrigação é fortemente recomendada. Embora existem muitos métodos de estimativa da ET_c (a modelação do balanço hídrico do solo, o método do balanço de energia, a Razão de Bowen), assim como os métodos diretos, como lisímetros, fluxo de seiva e “Eddy covariance” ou covariância de vórtices turbulentos (ANAPALLI et al., 2018).

Tradicionalmente, a ET_c é estimada através da associação da evapotranspiração de referência (ET_o) com um coeficiente de cultivo (K_c), onde a primeira representa os efeitos primários da demanda evaporativa da atmosfera, enquanto o K_c representa a cultura e suas variações fenotípicas (ALLEN et al., 1998). Embora mundialmente utilizada para uma grande gama de culturas, desde a publicação do FAO56 (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2015), ajustes locais são necessários, sobretudo aqueles relacionados aos estádios de desenvolvimento e ocorrência dos períodos críticos ao déficit hídrico. Assim, novas metodologias são constantemente incorporadas ao processo, visando dar maior garantia e segurança no manejo de irrigação. Uma dessas metodologias é o chamado índice de estresse (crop water stress index - CWSI), desenvolvido por Idso et al. (1981), que estabelece uma linearidade entre o CWSI e a redução na umidade do solo, fato que permite utilizar esse índice como um indicador confiável do estresse índice em plantas (RU et al., 2020).

3.4 A TERMOMETRIA E O MANEJO DE IRRIGAÇÃO

A termometria surge por meio da necessidade de padronizar medidas de temperatura dos corpos (FUCHS, 1972). Inicialmente, foram utilizadas substâncias com propriedades que se modificam quando submetidas a mudança de temperatura, a exemplo dos termômetros de mercúrio, utilizados até hoje. Posteriormente, metais sólidos que variam a condutividade elétrica em função da temperatura, como os termopares e termistores foram utilizados. Estes já possibilitaram a leitura eletrônica dos valores, abrindo novas possibilidades, porém, todos exigiam contato direto com o objeto em que se desejava realizar a leitura (PIRES, 2006), dificultando as leituras, até que se percebeu a

possibilidade de medir a temperatura sem contato físico com o corpo, sendo esta denominada termometria por infravermelho.

3.4.1 Termometria por infravermelho

O princípio de funcionamento dos termômetros de infravermelho ocorre pela medida da radiação eletromagnética, emitida por uma superfície na faixa do infravermelho. Sua origem provém do grau de agitação das moléculas, a mesma origem da medida de temperatura de um corpo e, por esse motivo, a radiação emitida por um corpo na faixa do infravermelho representa a temperatura de um corpo. A temperatura pode ser calculada a partir da radiação infravermelha por meio da Lei de Stefan-Boltzmann apresentada na equação 1 (SANMARTIN e ACEVEDO, 2001).

$$T_c = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{\epsilon_f \sigma}{q_e}}} \quad (1)$$

Onde: T_c : é a temperatura da folha (°K), ϵ_f é a Emissividade da folha (0,98), σ é a Constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), q_e é a Radiação de onda longa emitida por uma folha ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

Para a estimativa da temperatura é necessário ter a emissividade (ϵ) da superfície do corpo a ser medido. Esse valor é específico para cada material e representa a capacidade do mesmo em emitir radiação (em relação a um corpo negro). Para a cultura da soja, a emissividade da superfície do dossel é de 0.98, de acordo com Gomide (2011).

3.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO

As principais questões relacionadas ao manejo da irrigação são quando e quanto irrigar. As respostas a essas perguntas advém de uma acurada quantificação do requerimento hídrico das culturas, de forma a aplicar a água no momento e na quantidade que a cultura necessita (PETRY et al., 2021). O consumo de água de uma cultura está relacionado as características de solo, a

disponibilidade de água, a espécie cultivada, estágio de desenvolvimento, índice de área foliar (IAF), altura de plantas, profundidade do sistema radicular, fração de cobertura e a demanda evaporativa da atmosfera. Em geral, o consumo hídrico máximo coincide com o IAF máximo (MARTINS et al., 2013), pois a quantidade e estrutura da vegetação afeta o total de radiação absorvida, influenciando o saldo de radiação e as trocas de energia no processo de evapotranspiração (PETRY et al., 2021). Assim, uma adequada programação da irrigação é crucial para indicar quando e quanto irrigar, de forma a gerir melhor os recursos hídricos e otimizar a lucratividade da agricultura irrigada (AGUILAR et al., 2015; DEJONGE et al., 2015)

Os métodos mais utilizados na programação ou calendarização da irrigação são baseados nas condições meteorológicas, umidade do solo, métodos baseados em plantas (VORIES e SUDDUTH, 2021), métodos baseados no sensoriamento remoto (VENANCIO et al., 2019, GONÇALVES et al., 2022) ou a combinação de um ou mais desses métodos (PETRY et al., 2021).

3.5.1 Manejo da irrigação baseado em condições meteorológicas

Medidas diretas dos parâmetros da atmosfera são essenciais para o manejo da irrigação, entretanto, não é possível manejar a irrigação somente com estas medidas. Os métodos baseados nas condições meteorológicas programam a irrigação com base na quantidade estimada de água perdida pela evapotranspiração da planta (ET) e na quantidade de chuva efetiva e água de irrigação que entra na zona radicular da planta (VORIES e SUDDUTH, 2021).

A abordagem comum e prática, mundialmente usada para estimar as necessidades hídricas das culturas é o método FAO-56 (ALLEN et al., 1998), em substituição ao FAO-24 (DOORENBOS e PRUIT, 1979), na qual a evapotranspiração de referência (ET_o) é combinada a um coeficiente de cultura (K_c) na determinação da evapotranspiração das culturas (ET_c) sob disponibilidade ótima de água no solo (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2015). Valores de K_c (simples) para uma ampla gama de culturas são facilmente obtidos (ALLEN et al., 1998, PEREIRA et al., 2020a, b, 2021a), onde a transpiração da cultura e a evaporação do solo são combinadas em um único coeficiente. Para medições mais precisas e com foco na eficiência de uso ou

produtividade da água, a abordagem do coeficiente de cultura dual (K_{cb}) é recomendada (ALLEN et al., 1998) onde os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo são determinados independentemente (PEREIRA et al., 2015; PAREDES et al., 2018; PETRY et al., 2020). O método FAO-56 é baseado no uso de parâmetros meteorológicos na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), que se refere a uma superfície vegetada (gramada), com uma altura de 0,12 m, sem restrição hídrica, um albedo de 0,23 e a resistência da cultura ao transporte de vapor de água de 69 s m^{-1} (CARVALHO et al., 2011).

Outro parâmetro utilizado é o coeficiente da cultura (K_c), representado pelos parâmetros biofísicos da cultura em questão, sendo um fator de multiplicação da ET_o , variando de 0,3 no período inicial até 1,15 no pico de consumo de água para a cultura da soja (FAO 56) (ALLEN et al., 1998). Embora seja o método mais utilizado devido a sua simplicidade e representatividade, pois as variáveis meteorológicas são representativas de uma extensa área, podendo serem medidas por sensores mais simples (NAVARRO-HELLÍN et al., 2016), esse método pode apresentar falhas, como um menor reabastecimento da água no solo durante o ciclo devido a desajustes entre os parâmetros de cultura utilizados (HUNSACKER et al. 2015). Assim, esse método é fortemente atrelado a quatro fatores, segundo Pereira et al. (2015): (i) a acurácia na estimativa da ET_o , (ii) um K_c (simples ou dual) calibrado para as condições regionais, (iii) das propriedades do solo, como a retenção e disponibilidade de água e; (iv) medição da chuva em nível de parcela ou área irrigada.

3.5.2 Manejo da irrigação baseado na umidade do solo

A quantidade de água presente no solo e também a energia de retenção da mesma, é um dos principais indicadores de estresse hídrico. A medição do status de água no solo pode ser dividida em: (i) medição do seu conteúdo ou; (ii) medição da energia de retenção da água no solo (JONES, 2007). De acordo com Irmak et al. (2014) e Jones (2007), a medição da umidade do solo é essencial para a definição de limites a partir dos quais a planta é sensível pela redução da umidade do solo.

O conteúdo de água no solo pode ser expresso de forma direta através do método gravimétrico, coletando, pesando e secando amostras de solo

(WALTER, 1986), entretanto, são muito trabalhosos e necessitam de tempo e instrumentação para a sua determinação, então os métodos indiretos surgem para suprir essa necessidade de facilitar o trabalho a campo (MAROUELLI, et al. 2011).

Sensores de umidade do solo têm sido usados na agricultura por muitos anos para melhorar o manejo da irrigação em nível de produtor (DONG et al., 2020) devido à sua praticidade em fornecer dados contínuos, podendo ser instalados em várias profundidades e prover medidas não destrutivas. A sonda de nêutrons é confiável e precisa para medir o conteúdo de água do solo (CHANASYK e NAETH, 1996), mas sua aplicação foi limitada pelo custo e requisitos especiais associados ao manuseio da fonte radioativa. Sensores eletromagnéticos (EM), como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) foram desenvolvidos e amplamente adotados para medições de umidade do solo para fins de programação da irrigação (SUI e VORIES, 2020). Estudos indicam que o TDR fornece dados mais precisos, embora o sistema seja mais caro. Embora não sejam econômicos, os resultados são independentes da textura do solo, temperatura e condutividade elétrica, que são propriedades do solo que afetam alguns dos métodos de medida de umidade utilizados (SU et al., 2014).

Para determinar os parâmetros operacionais dos sensores de medição da umidade do solo para fins de manejo de irrigação, é necessário conhecer o solo e a curva de retenção de água, ou a relação entre o conteúdo de água e o potencial matricial, para determinar a quantidade de água que pode ser removida do solo antes de se iniciar uma irrigação. Em geral, o total de água disponível (TAW) é o conteúdo de água entre a capacidade de campo (θ_{FC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMF}), na profundidade de solo efetivamente explorada pelo sistema radicular das plantas (Zr) (EVETT et al., 2019).

O solo fornece uma interação crucial entre a cultura e a água, pois é o meio onde a água é armazenada. O limite superior da água do solo na zona radicular é determinado pela capacidade de retenção de água do solo – que, para fins de gerenciamento da água de irrigação, é conhecida como capacidade de campo. O limite inferior desejado para um ótimo o crescimento da cultura pode ser um valor mais variável dependendo da cultura, do estágio de crescimento e do objetivo de manejo. Muitas vezes, esse valor é referido como

o esgotamento ou depleção máxima permitida (p ou MAD) (ALLEN et al., 1998). Um p comum é de 0.5 (50% do TAW), embora esse valor deve ser ajustado, de acordo com a cultura, o local e método de irrigação utilizado (PETRY et al., 2021).

3.5.3 Manejo da irrigação baseado na planta

Nos últimos anos, muitos esforços tem sido feitos no desenvolvimento de novos métodos de detecção de estresse hídrico em nível de campo. A avaliação fenotípica das plantas a partir de técnicas de imagens tem sido pertinente em avaliar a performance das plantas sob quaisquer condições ambientais, segundo Pineda et al (2021). Técnicas baseadas no status de água ou a temperatura da folha são utilizadas para avaliar a condição hídrica da vegetação, uma vez que, a planta responde a redução da umidade do solo (PETRY et al., 2021). A detecção do estresse hídrico com base na planta é feita através da folha, observando: mudança da coloração, ângulo de posição das folhas, índice de crescimento, teor absoluto de água, potencial hídrico, temperatura, taxa de transpiração e abertura estomatal. Entretanto, esses métodos podem ser caros e trabalhosos (JONES, 2004).

O status hídrico da folha talvez seja o melhor indicador para iniciar as irrigações (FERNANDEZ e CUEVAS, 2010), entretanto, o uso dessa metodologia muitas vezes é limitado pela necessidade de instrumentação cara, por ser destrutivo e ausência de limites críticos que indicam estresse (JONES, 2004b). As trocas de água entre a planta e a atmosfera são coordenadas pela condutância estomática, em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera e conteúdo de água no solo (EGEA et al., 2017). Dentre os métodos de medição do status de água nas folhas e caules, o da câmara de pressão de Scholander é o mais comum (BALLESTER et al., 2013), entretanto, consome tempo, é trabalhoso e destrutivo, dificultando o seu uso a longo prazo (RU et al., 2020). Além disso, medir o potencial em apenas algumas folhas raramente pode ser indicador de déficit hídrico (JONES, 2004b)

Equipamentos portáteis, como o porômetro e o analisador de gás, conhecido como IRGA (*Infra-Red Gas Analyser*) são utilizados para medir simultaneamente a condutância estomática e o potencial de água nas folhas. A

atividade estomática é uma das características fisiológicas mais importantes relacionadas ao crescimento e desenvolvimento das plantas, desempenhando um papel fundamental no balanço de carbono e água, controlando a fotossíntese e a transpiração (JONES, 2014). Assim, a condutância estomática (g_s) está relacionada com o rendimento e à tolerância de estresses ambientais (PRAHAR et al., 2013) e correlaciona-se fortemente com a temperatura da folha (JONES, 1999).

Alguns autores (MEDRANO et al. 2002; FLEXAS et al. 2006) propuseram o uso da condutância estomática ao meio-dia solar (g_{s_max}) como uma forma objetiva de estabelecer o status de água em plantas como um parâmetro fisiológico a partir do qual há um comprometimento fotossintético, quando ultrapassado. Assim, a fotossíntese funciona satisfatoriamente em valores de g_{s_max} superiores a $0,10-0,15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sendo apontados como limites indicadores de irrigação em algumas culturas (FLEXAS et al., 2006). Dessa forma, segundo Medrano et al. (2002), é importante evitar que a condutância estomática caia abaixo de $0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (que é um limite crítico para batata, por exemplo) (RINZA et al., 2019).

Quando a umidade do solo afeta o crescimento e desenvolvimento da cultura, a mudança do comportamento estomático refletirá diretamente em alguns índices fisiológicos, como condutância estomática e taxa de transpiração, o que causará uma série de mudanças no estado hídrico da cultura, como teor de água. Portanto, os estômatos tendem a se fechar para manter o equilíbrio hídrico nas plantas, e a mudança na intensidade da transpiração geralmente determina o grau de perda de calor na superfície das folhas, e então leva à mudança da temperatura foliar (RU et al., 2020).

A temperatura foliar é um parâmetro básico no estudo das características fisiológicas e ecologia das plantas (BALLESTER et al., 2013). A temperatura do dossel reflete a troca de energia entre a planta e a atmosfera, podendo ser usada para prever o status hídrico da planta (RU et al., 2020). O uso da termometria de infravermelho para medir a temperatura foliar fornece um importante método de detecção do déficit hídrico da cultura. Quando há água suficiente na zona radicular, a transpiração produz um efeito resfriador nas plantas, ou seja, a temperatura do dossel é inferior à temperatura ambiente. Entretanto, com a redução na umidade do solo, a planta reduz a atividade estomática, reduzindo,

portanto, a transpiração, elevando a temperatura da folha (IDSO et al., 1981; JACKSON et al., 1981).

O método mais comum baseado na temperatura da folha é o índice de estresse hídrico da cultura, isto é, o Crop Water Stress Index (CWSI), idealizado por Idso et al. (1981) e Jackson et al. (1981). O CWSI foi desenvolvido como um indicador padrão do estresse e sintetiza o efeito do ambiente na variação da temperatura da folha (MAROUELLI, et al., 2011). O CWSI usualmente é determinado por métodos empíricos e analíticos, baseados na relação da temperatura do ar (T_a) e a do dossel (T_c) (O'SHAUGHNESSY et al., 2012).

Existem algumas metodologias para calcular o CWSI; Idso et al. (1981) propuseram empiricamente um método que tem como parâmetros de entrada apenas temperatura do dossel (T_c), temperatura do ar (T_a) e o déficit de pressão de vapor do ar (VPD), sendo de uso muito simples, porém, é necessário estimar uma linha de base sem estresse, pela diferença entre $T_c - T_a$, em função da VPD. A linha de base sem estresse é específica para cada cultura (IDSO, 1982). Para determiná-las, são necessárias medidas de temperatura do dossel, do ar e VPD, em plantas bem irrigadas. As medidas devem ser feitas ao longo de um dia, das 10 às 16 h, ou durante um período de dias no mesmo horário (GARDNER, 1992). Uma regressão linear entre a diferença de T_c e T_a em função da VPD é então estabelecida (GARDNER, 1992).

Por outro lado, Jackson et al. (1992), propuseram um CWSI baseado no balanço energético do solo-planta-atmosfera. Esse índice tem tido grande aceitação, entretanto, exige mais parâmetros de entrada, como radiação líquida, resistência aerodinâmica, entre outros, o que dificulta a sua implantação em campo (ALGHORY e YAZAR, 2019).

4 ARTIGO I - TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO PARA A DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA CULTURA DA SOJA

4.1 INTRODUÇÃO

A soja é a cultura mais expressiva no setor agropecuário brasileiro em volume e valor da produção (CONAB, 2022). Com grande importância na alimentação humana e animal, devido ao conteúdo de proteína, lipídios, carboidratos e minerais. Embora a produção de soja no Brasil seja quase a

totalidade em área de sequeiro, a água é o principal fator que limita a obtenção de maiores rendimentos (VIVAN et al., 2013). Em áreas de sequeiro, o total e a frequência de precipitações pluviais levam a variabilidade na absorção de água e nutrientes, com reflexos negativos no desenvolvimento e na produtividade. Nessas condições, a irrigação vem a ser uma importante ferramenta para garantir a estabilidade e o aumento na produção de soja (VIVAN et al., 2013).

A agricultura irrigada tem sido responsável pela retirada de grandes volumes de água de rios, aquíferos e reservatórios, em função de secas cada vez mais frequentes e prolongadas, incrementando as incertezas sobre o suprimento de água potável para a produção de alimentos, a indústria e o uso doméstico. Para melhor lidar com as incertezas sobre o suprimento de água, cada vez mais atenção deverá ser dada ao manejo e monitoramento da irrigação, visando produzir mais, com menores quantidades de água. Melhorar a relação produção/consumo de água passa pelo manejo da irrigação, o que também implica em melhorar o conhecimento sobre o requerimento hídrico das plantas e a decisão de quanta água aplicar em cada irrigação (PAREDES, PEREIRA, 2018; PETRY et al., 2021).

O manejo ou o monitoramento da irrigação, i.e., a decisão de quando e quanto irrigar, pode ser amparada em três metodologias, baseadas em medições do status de água do solo, planta e atmosfera. Atualmente, a metodologia mais usual é baseada nos parâmetros da atmosfera, publicado no boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998), também conhecido como a metodologia de duas etapas (K_c-ET_o) (PEREIRA et al., 2015). Neste método, a evapotranspiração de referência (ET_o) representa a demanda de água da atmosfera, enquanto o K_c (coeficiente de cultivo) representa as características biofísicas das plantas (PEREIRA et al., 2015). A combinação ET_o-K_c representa a demanda hídrica de uma cultura em condições de campo, englobando as características onde ela é cultivada.

Entretanto, os métodos mais precisos para manejar a irrigação são os que se baseiam em dados da planta, através de indicadores de estresse hídrico. Alguns desses indicadores que representam o estresse hídrico das plantas são: potencial de água no caule, fluxo de seiva, temperatura da folha, entre outras (DEJONG et al., 2015, JONES, 2004). Porém, o uso destas metodologias fica limitado devido à dois principais fatores: o alto custo dos equipamentos de

mensuração e também a necessidade de valores de referência para comparar com os valores medidos em campo (PETRY et al., 2021).

A termometria infravermelha é um método de medida da temperatura do dossel de plantas; dentre os parâmetros medidos da planta, este é o mais simples e que apresenta um menor custo, quando comparado aos outros. Este método associado aos parâmetros atmosféricos permite detectar com mais precisão o início do estresse hídrico nas plantas. O que explica o aquecimento do dossel das plantas é a redução da taxa de transpiração, sendo que a transpiração das culturas resfria o dossel, visto que há perda de energia pela transformação do estado da água (TAGHVAEIAN et al., 2012). Entretanto, o desafio é mensurar a elevação da temperatura do dossel, quando há redução da taxa de transpiração, limitada pelo decréscimo de água no solo e, com isso, calcular índices que indicam o estresse das plantas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi mensurar a temperatura do dossel ao longo do ciclo da soja, visando quantificar o índice de estresse hídrico da cultura por termometria de infravermelho.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização da área experimental e do experimento

O experimento de campo foi realizado no ano agrícola de 2021/2022, em área experimental do Sistema Irriga, do Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria – Campus Sede, localizada entre as coordenadas geográficas 29°43'S e 53°43'W, e altitude de 95 m. O clima da região é do tipo Cfa (Subtropical sem estação seca e com verões quentes), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

A semeadura foi realizada em parcelas de 12 x 2,5 m, no dia 28 de outubro de 2021, conforme recomendações do zoneamento agroclimático para a cultura da soja na região. Os tratamentos culturais, como o controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações agronômicas para a cultura da soja (SALVADORI et al., 2016). O delineamento experimental usado foi em blocos ao acaso, com três tratamentos: I: irrigado todo o ciclo de

desenvolvimento da cultura (I Veg-Rep); II:– irrigado durante a fase reprodutiva da cultura e (I Rep) e; III: sem irrigação (Seq), em três repetições.

4.2.2 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado pelo do Sistema Irriga[®], um serviço de manejo e monitoramento da irrigação, criado e desenvolvido na UFSM, no qual a necessidade de irrigação se baseia em dados meteorológicos, na disponibilidade de água no solo e no estágio de desenvolvimento da cultura. O Sistema Irriga[®] utiliza um fator de depleção de ~0,70, ou seja, as irrigações eram engatilhadas quando a fração de água facilmente disponível no solo (FAD) alcançasse 30%. Irrigações de 14 a 18 mm eram aplicadas em cada evento de irrigação.

As irrigações foram realizadas por um sistema de aspersão convencional, com aspersores instalados em esquema de espaçamento de 12 x 18 m, com uma altura média de 1,5 m, possuindo uma taxa de aplicação de aproximadamente 8 mm h⁻¹. Utilizou-se aspersores setoriais, com bocal de 4 mm, com a pressão de serviço de 2 bar.

4.2.3 Observações da planta durante o ciclo

A temperatura do dossel foi mensurada a partir do momento em que a fração de solo coberta pelo dossel (f_c) atingiu 100% ($f_c=100\%$), sinalizando que a partir desse momento, as perdas de água pela ET_c eram integralmente devido a transpiração da cultura (T_c). Os termômetros utilizados foram do tipo infravermelho, ou seja, calculam a temperatura através da radiação emitida pelas folhas. Os sensores utilizados foram do modelo MLX90614-DCI fabricado por Melexis, empresa sediada em Ypres, na Bélgica, com precisão de 0,3°C na faixa de temperatura utilizada. Os sensores foram instalados a uma altura de 0,5 m acima do topo do dossel, ajustados ao longo do ciclo de acordo com a altura do dossel, inclinados em 45° do plano horizontal, com o objetivo de evitar a possibilidade de aparecer o solo em sua área de leitura.

Quanto à orientação do termômetro, no hemisfério Sul, estes devem ser orientados para o Norte, de acordo com Jones et al. (2018). Os sensores foram

envolvidos em cápsulas plásticas, para proteção da chuva e da radiação solar, presas a hastes metálicas e fixadas ao solo.

Os sensores foram conectados a uma placa de desenvolvimento (ESP32 Development Kit), com conexão Wi-Fi de 2,4 GHz, Bluetooth de baixa energia (BLE), LoRa e 4 Megabytes (MB) de memória flash. As placas de desenvolvimento são dispositivos capazes de receber uma programação, onde é estabelecida uma rotina de tarefas, neste caso, a leitura dos sensores. As leituras foram realizadas em intervalos de 15 segundos, armazenando as médias a cada minuto, num cartão de memória Micro SD de 4 GB.

Os sensores foram previamente calibrados pelo fabricante para ler temperaturas em objetos com emissividade (ϵ) de 1. Assim, a temperatura deve ser corrigida para a emissividade do dossel de plantas. De acordo com Gomide (2011), a emissividade de um dossel é 0,98. A correção foi feita utilizando as seguintes equações:

$$q_e = \epsilon_s \sigma T_{Emissividade\ 1}^4 \quad (1)$$

Onde: q_e é a Radiação de onda longa emitida pela superfície do dossel ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$), ϵ_s é a Emissividade do sensor (calibrado para 1), σ é a Constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$), $T_{Emissividade\ 1}$ é a Temperatura do dossel com a emissividade 1 ($^{\circ}K$).

$$T_{compensada} = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{\epsilon_f \sigma}{q_e}}} \quad (2)$$

Onde: $T_{compensada}$: é a temperatura da superfície do dossel compensada pela ϵ ($^{\circ}K$), ϵ_f é a Emissividade da superfície do dossel (0,98), σ é a Constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$), q_e é a Radiação de onda longa emitida por uma folha ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$).

4.2.4 Monitoramento das condições meteorológicas

As variáveis de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram medidas no local do experimento, usando uma estação meteorológica da Campbell (Campbell Scientific, Inc.). O sensor de temperatura e umidade relativa do ar, modelo HMP35C, foi instalado a 1,5 m de altura, enquanto o sensor de velocidade do vento (modelo 03001), foi instalado a 2 m de altura. Todos estes sensores foram conectados a um datalogger CR10, também da Campbell, com leituras a cada minuto e armazenando médias horárias. Os demais dados meteorológicos foram extraídos da estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 300 m da área experimental.

4.2.5 Monitoramento do conteúdo de água no solo

O conteúdo de água no solo foi medido diariamente, de forma automática, através de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometer), modelo CS616, os quais foram conectados a um multiplexador analógico de canais (AM16/32) e um datalogger CR10 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). As leituras foram realizadas a cada 15 minutos, armazenando as médias a cada 60 minutos. Os sensores foram distribuídos nas camadas de 0 a 0,30 m e 0,30 a 0,60 m. Para efeito de cálculo do balanço hídrico e manejo da irrigação, foi assumido como a umidade diária (θ cm³/cm³), o valor do conteúdo de água medido pelos sensores às 23 horas de cada dia, em cada camada de solo. Os valores de água disponível no solo (ASW) foram obtidos pela diferença entre o conteúdo atual de água (θ) e o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) multiplicado pela espessura da camada explorada pelas raízes das plantas (Z_r), conforme apresentado na Equação 3:

$$ASW = 1000(\theta - \theta_{PMP})Z_r \quad (3)$$

As características físico-hídricas do solo, incluindo o conteúdo de água na saturação (θ_{sat}), na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), foram determinados no Laboratório de Física de Solo do Sistema Irriga®. Amostras de solo não destruídas foram retiradas das camadas de 0 a 0,30 m e 0,30 a 0,60 m para a determinação da curva de retenção de

água no solo, desde a saturação até o conteúdo de água na em - 100 kPa. O conteúdo de água em - 500 e -1500 kPa foram derivados por funções de pedotransferência (PTF), segundo Michelin et al. (2010). Nas mesmas camadas, amostras destrutivas foram coletadas para a determinação da textura do solo.

4.2.6 Grau dia de estresse (SDD)

A diferença entre a temperatura do dossel de uma planta e a temperatura do ar circundante pode ser um indicador do estado hídrico de uma cultura. O estresse hídrico causa fechamento estomático parcial, reduzindo assim, a transpiração e permitindo que as folhas expostas ao sol aqueçam acima da temperatura do ar ambiente. Sua quantificação pode ser determinada através dos graus dias de estresse (SDD), proposto originalmente por Idso et al. (1977) e Jackson et al. (1977).

O SDD é o valor diário de $T_c - T_a$, tendo sido medido durante a máxima temperatura do dossel, o que geralmente ocorre entre 1 a 1,5 h após o meio dia solar. O acumulado do SDD é determinado pela seguinte equação (Jackson et al, 1977)

$$SDD = \sum_{n=1}^N (T_c - T_a)n \quad (4)$$

Onde, T_c é a Temperatura do dossel (°C), T_a é a Temperatura do ar (°C).

4.2.7 Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)

O CWSI pode ser calculado usando a abordagem analítica (ou teórica) ou a abordagem empírica. A abordagem teórica é baseada no modelo de balanço de energia e foi proposta por Jackson et al. (1981). Essa abordagem fornece estimativas precisas do CWSI, mas seu cálculo requer grandes parâmetros de entrada ao modelo. A abordagem empírica (IDSO et al., 1981), por outro lado, é relativamente simples de usar e fornece estimativas confiáveis de CWSI. Esse

considera duas temperaturas de linha de base, sendo temperaturas do dossel de plantas bem irrigadas (T_{min}) e um dossel sem transpiração ou, em estresse (T_{max}).

4.2.7.1 Método analítico do Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)

O método analítico para calcular o CWSI requer muitos parâmetros para ser utilizado, desde características da superfície do dossel às variáveis meteorológicas, cujas equações são apresentadas na sequência. Para a equação abaixo foi utilizado o modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), então o CWSI pode ser calculado a partir de Jackson et al. (1981):

$$CWSI = \frac{\gamma(1 + r_c/r_a) - \gamma(1 + r_{cp}/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (5)$$

Onde, γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), r_c é a resistência do dossel (s m^{-1}), r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}), r_{cp} é a resistência potencial do dossel (s m^{-1}), Δ é a inclinação da curva pressão-temperatura do vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

A relação entre r_c/r_a pode ser expressa, conforme Jackson et al. (1981) e Silva et al. (1995) por:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{\gamma r_a R_n / (\rho c_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_s - e)}{\gamma[(T_c - T_a) - r_a R_n / (\rho c_p)]} \quad (6)$$

Onde, r_c é a resistência do dossel (s m^{-1}), r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}), R_n é a radiação líquida (w m^{-2}), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}), T_c é a Temperatura do dossel ($^\circ\text{C}$), T_a é a Temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), e é a pressão parcial de vapor (kPa), e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa), ρ é a densidade do ar (kg/m^3), c_p é o calor específico do ar ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}} \right] \ln \left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}} \right]}{K^2 U_z} \quad (7)$$

Onde, r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}), Z_m é a altura de medições de vento (m), Z_h é a altura de medições de umidade (m) d é a altura de deslocamento do plano zero (m), Z_{om} é a rugosidade aerodinâmica relativa à transferência da quantidade de movimento (m), Z_{oh} é a rugosidade aerodinâmica aos fluxos de calor (m), K é a constante de Von Karman, 0,41 (-), U_z é a velocidade do vento na altura z (m s^{-1}). A altura de deslocamento do plano de referência, d , é sobretudo função da altura das plantas (FAO), estimada por:

$$d = \frac{2}{3} h \quad (8)$$

Onde, d é a altura de deslocamento plano zero (m), h é a altura da cultura (m).

A rugosidade aerodinâmica relativa à transferência da quantidade de movimento, Z_{om} , foi estimada de acordo com Pereira e Alves (2016) por:

$$Z_{om} = \frac{1}{3} h \quad (9)$$

Onde, h é a altura da cultura (m).

A rugosidade aerodinâmica aos fluxos de calor, Z_{oh} , foi estimada de acordo com Pereira e Alves (2016), sendo 10% da rugosidade aerodinâmica relativa à transferência da quantidade de movimento, Z_{om} .

4.2.7.2 Método empírico do Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)

O método empírico de estimativa do CWSI requer poucas variáveis, como temperatura do ar e do dossel, e também as referências, temperatura de um dossel sem estresse hídrico e temperatura de um dossel totalmente estressado, sendo calculado através da seguinte equação (IDSO et al., 1981):

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a) - (T_{min} - T_a)]}{[(T_{max} - T_a) - (T_{min} - T_a)]} \quad (10)$$

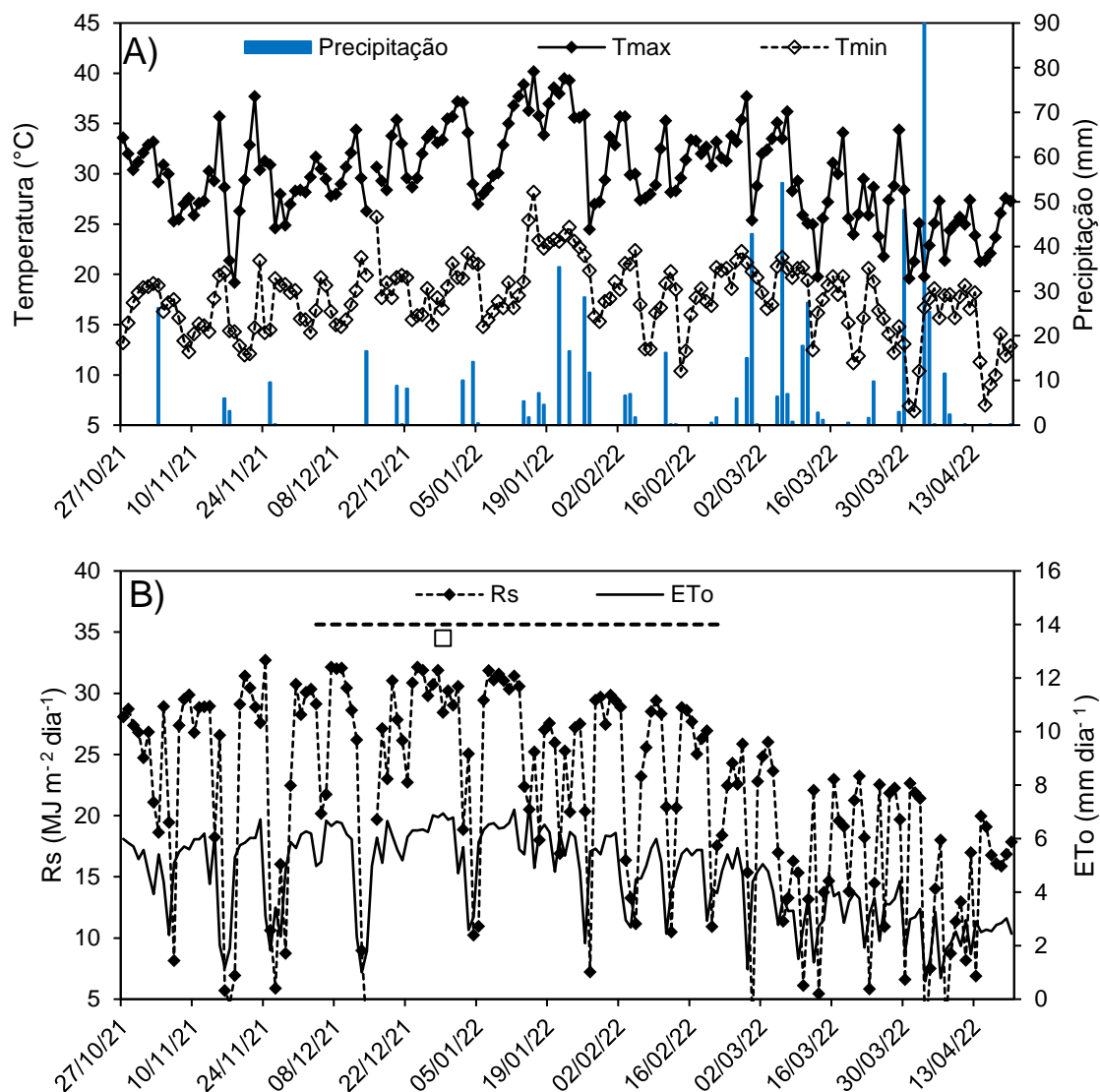
Onde, T_c é a Temperatura do dossel (°C), T_a é a Temperatura do ar (°C), T_{min} é a Temperatura do dossel a transpiração plena (°C), T_{max} é a Temperatura do dossel não transpirante (°C).

A T_{min} e a T_{max} foram obtidas por meio das linhas de base, geradas entre o VPD e $(T_c - T_a)$, de acordo com a metodologia proposta por Gardner (1992).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 1 são apresentados dados meteorológicos do período, que demonstram a escassez de chuva, principalmente no início do desenvolvimento da cultura. A safra 2021/2022 foi caracterizada por precipitações abaixo da média em toda região Sul do país, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, fato que acarretou em grandes perdas de produtividade.

Figura 1. Valores diários de temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}) e precipitação (A). Evapotranspiração de referência (ET_o), Radiação solar (R_s), (-----) = Período em que foram realizadas as medidas de temperatura dossel; (□) = Início da fase reprodutiva e da irrigação no tratamento I Rep.(B).



Fonte: Autor.

A temperatura máxima diária dos meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março foram de 28,6, 31,6, 33,9, 31,6 e 28,3°C, respectivamente (Figura 1a), estando próximos aos valores mensurados pelo INMET, para a série histórica de 1991 a 2020, sendo as seguintes médias: 28, 30,4, 31, 30,2 e 29,1°C para a mesma sequência de meses. Para as temperaturas mínimas diárias, os valores mensais para os meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março foram de 16,3, 17,8, 20,3, 18,2 e 16,9°C respectivamente, também muito próximos aos mensurados pelo INMET, que foram 16,5, 18,7, 20,1, 19,7 e 18,3°C, respectivamente.

A precipitação observada dos meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março foi de 45, 40, 133, 92 e 159 mm, respectivamente, valores esses abaixo da média histórica para os meses de cultivo. As médias de precipitação para estes meses, de acordo com o INMET, para a série histórica de 1991 a 2020 foi de 253, 161, 166, 131 e 179 mm. De acordo com Gimenez et al. (2019) a cultura da soja exige de 400 a 700mm, o acumulado no ciclo foi de 469 mm, porém a precipitação foi mal distribuída, tendo principalmente os meses de novembro e dezembro muito abaixo da média histórica.

Na Figura 1b, observa-se que a variação linha da ET_o foi semelhante à da R_s , indicando que a ET_o é muito influenciada pela R_s . Também é possível observar que a R_s decresce no final do período avaliado. Na tabela 1 são apresentadas as irrigações brutas aplicadas durante o ciclo na cultura, para cada um dos manejos de irrigação com uma lâmina total aplicada de 216 mm (I Veg – Rep) e 106 mm (I Rep).

Tabela 1. Datas e lâminas de irrigação aplicadas durante o ciclo de desenvolvimento da soja, nos tratamentos I Veg – Rep= Tratamento irrigado no estágio vegetativo e reprodutivo; I Rep= Tratamento irrigado no estágio reprodutivo.

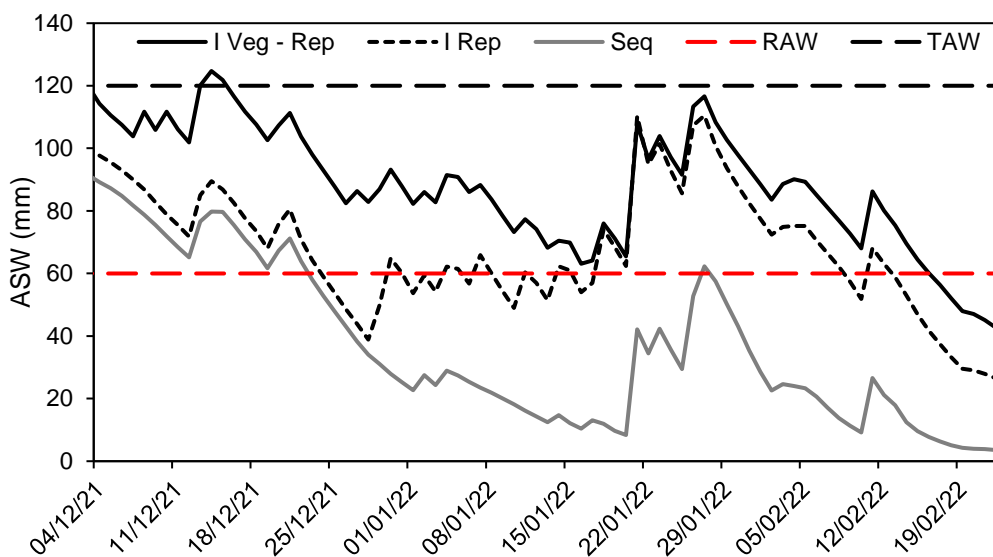
Data	I Veg - Rep	I Rep
29/10/2021	12	
13/11/2021	12	
24/11/2021	12	
03/12/2021	14	
08/12/2021	14	
10/12/2021	14	
13/12/2021	14	
27/12/2021	18	
29/12/2021	14	14
30/12/2021	18	18
07/01/2022	14	14
11/01/2022	18	18
14/01/2022	14	14
18/01/2022	14	14
11/02/2022	14	14
TOTAL	216	106

Fonte: Autor.

Na figura 2 é apresentada a variação da água disponível no solo (ASW) para os diferentes tratamentos, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. Picos nos valores de ASW são observados após cada evento de irrigação e/ou precipitação; um decréscimo acentuado no ASW foi observado em todos os tratamentos, a partir do sombreamento completo da superfície pelo dossel, a partir dos 30 dias após a semeadura. Um estresse leve foi observado no tratamento irrigado apenas durante o período reprodutivo (entre o fechamento completo e metade do período intermediário), que é o de maior consumo (24/12 a 30/12). No tratamento de sequeiro, a ASW se manteve abaixo da linha do RAW (RAW=TAW.p=0,50), indicando que houve estresse hídrico durante 80% do ciclo da soja no ano agrícola 2021/22, para semeaduras realizadas no final de outubro e novembro.

Figura 2. Valores diários de água disponível no solo (ASW), para os três tratamentos de irrigação durante o período analisado. A linha de TAW representa o total de água disponível no solo; A linha de RAW representa a água facilmente disponível, sendo 50% do TAW. I Veg – Rep= Tratamento irrigado no estádio

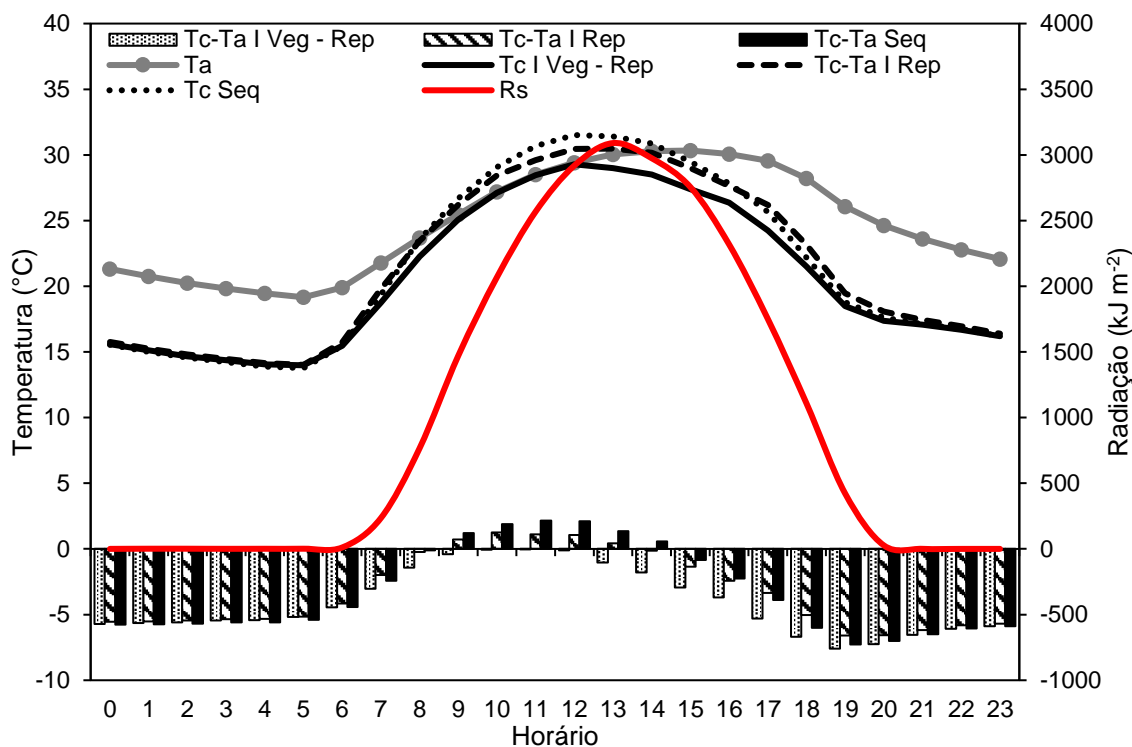
vegetativo e reprodutivo; I Rep= Tratamento irrigado no estágio reprodutivo; Seq= Tratamento sem irrigação.



Fonte: Autor.

As variáveis meteorológicas (R_s , T_a e T_c), apresentaram comportamento distinto ao longo do dia, para os diferentes tratamentos de irrigação adotados. A R_s apresentou valores nulos no período noturno, elevando-se durante as horas mais quentes do dia (das 07:00 às 19:00 h). Em contrapartida, a temperatura do dossel apresentou tendência similar entre os três manejos de irrigação, com maiores temperaturas no Seq, em relação ao I Rep e com o I Veg - Rep.

Figura 3. Variação horária média da temperatura do ar (T_a), temperatura do dossel (T_c), radiação solar (R_s), diferença entre temperatura do dossel e temperatura do ar ($T_c - T_a$) para os mesmos tratamentos, dados médios de todo o experimento de soja no ano agrícola 2020-21, excluindo apenas dias com precipitação ou irrigação. I Veg - Rep= Tratamento irrigado no estágio vegetativo e reprodutivo; I Rep= Tratamento irrigado no estágio reprodutivo; Seq= Tratamento sem irrigação.



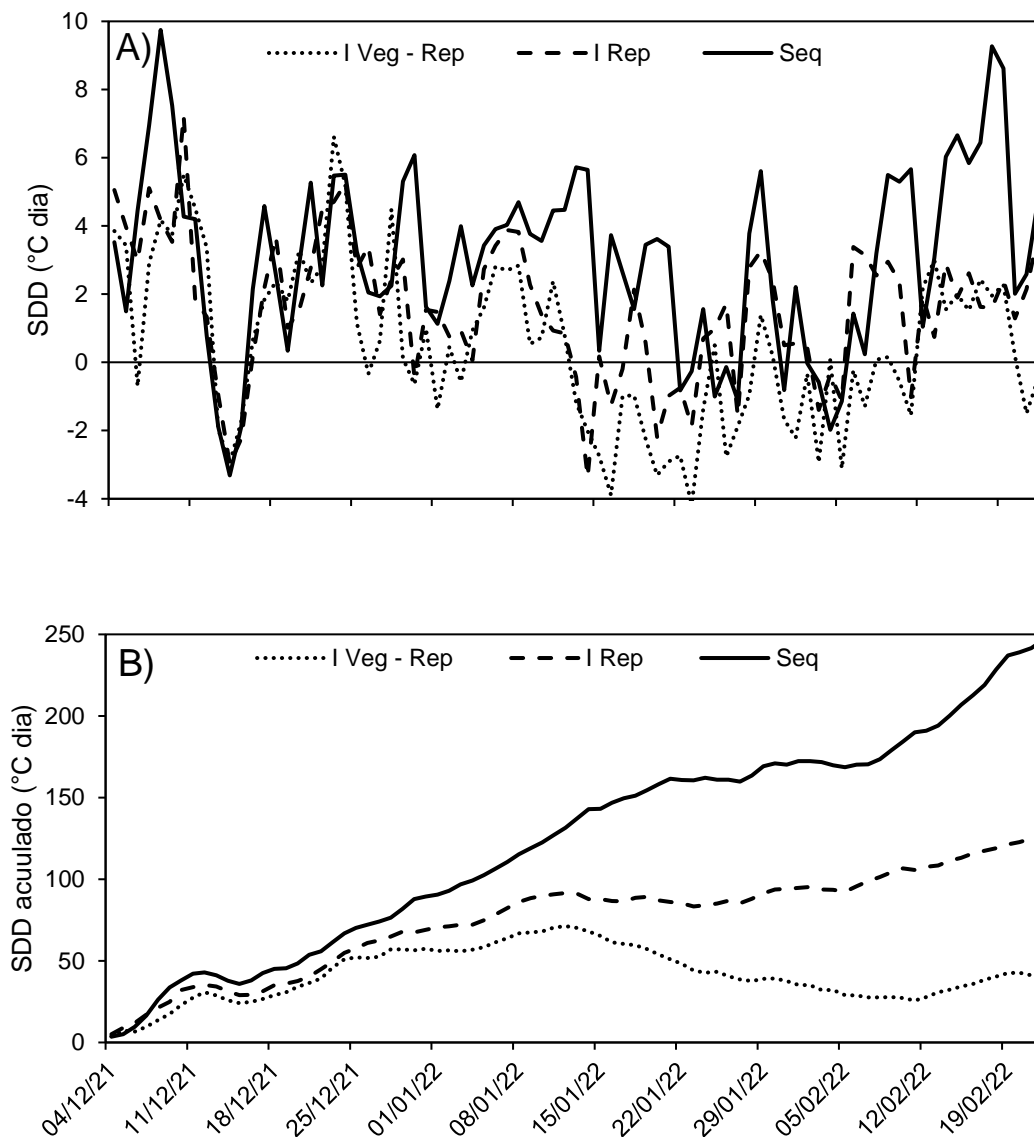
Observou-se também uma similaridade entre a temperatura do ar e a temperatura do dossel, exceto nos períodos onde houve estresse hídrico, quando a temperatura do dossel foi superior à temperatura do ar, nos tratamentos Seq e I Rep. As barras representam a diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar, mostrando que, durante o período noturno, as diferenças foram maiores para todos os tratamentos, com elevados picos das 10 e 12h.

Não se observou diferenças entre os tratamentos na relação $T_c - T_a$ no período noturno, entretanto, somente o tratamento I Veg-Rep, ou seja, mantido com o ASW acima do RAW, apresentou valores negativos durante o dia e em todo o ciclo, o que era esperado. Nos tratamentos irrigados, somente no período reprodutivo e no sequeiro (II-Rep e Seq) a relação $T_c - T_a$ foi positiva, sendo a maior leitura diária para o período, de 1.89 e 2.16 °C respectivamente. A maior diferença entre os três tratamentos ocorreu entre as 10 às 12 h, semelhante aos resultados encontrados por Gu et al. (2021), que observaram a maior diferença entre temperatura do ar e do dossel entre as 12 e as 15 h, nos horários de maior disponibilidade de R_s .

A diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar, em função dos diferentes manejos de irrigação, é apresentada na Figura 4 sendo os

valores diários (A) e o acumulado no período (B). Pode-se observar que esta variável foi influenciada pela disponibilidade hídrica, onde a menor soma de $T_c - T_a$ foi no tratamento I Veg - Rep, sem estresse durante o ciclo, e o tratamento com o maior acumulado de estresse térmico foi o Seq. Entretanto, todos os valores são positivos, indicando que pode ter ocorrido estresse hídrico em todos os tratamentos, inclusive no irrigado durante todo o ciclo. Isso pode estar relacionado com o valor de p (0,50) utilizado na determinação do RAW, indicando que o estresse hídrico ocorre quando a água acima do RAW se esgote, parâmetro largamente utilizado para engatilhar as irrigações. Os autores Allen et al. (1998) definiram valores de $p=0,5$ para as grandes culturas, entretanto, Gu et al. (2020) associaram o valor de p a taxa evapotranspiratória; para valores de $ET_c > 5,0$ mm/dia, o valor de p deve ser inferior a 0,5. Esses resultados indicam que, quando se utiliza sensores de medição da umidade do solo, cuidados extras devem ser tomados para engatilhar as irrigações, porque elevadas taxas de extração de água no solo podem não ser acuradamente detectadas por alguns sensores, fazendo com que a planta apresente estresse, mesmo que ainda haja água disponível no solo. Portanto, é sempre recomendável acoplar um cálculo da ET_c aos balanço hídrico com dados de umidade medido pelos sensores, usando os K_c 's tabulados na literatura (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2020b), evitando erros cumulativos que podem desencadear em estresse às plantas (HUNSACKER et al., 2015).

Figura 4. Estresse térmico diário (A) e acumulado (B) entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar ao longo do período de avaliação, para os 3 tratamentos. I Veg – Rep= Tratamento irrigado no estágio vegetativo e reprodutivo; I Rep= Tratamento irrigado no estágio reprodutivo; Seq= Tratamento sem irrigação.



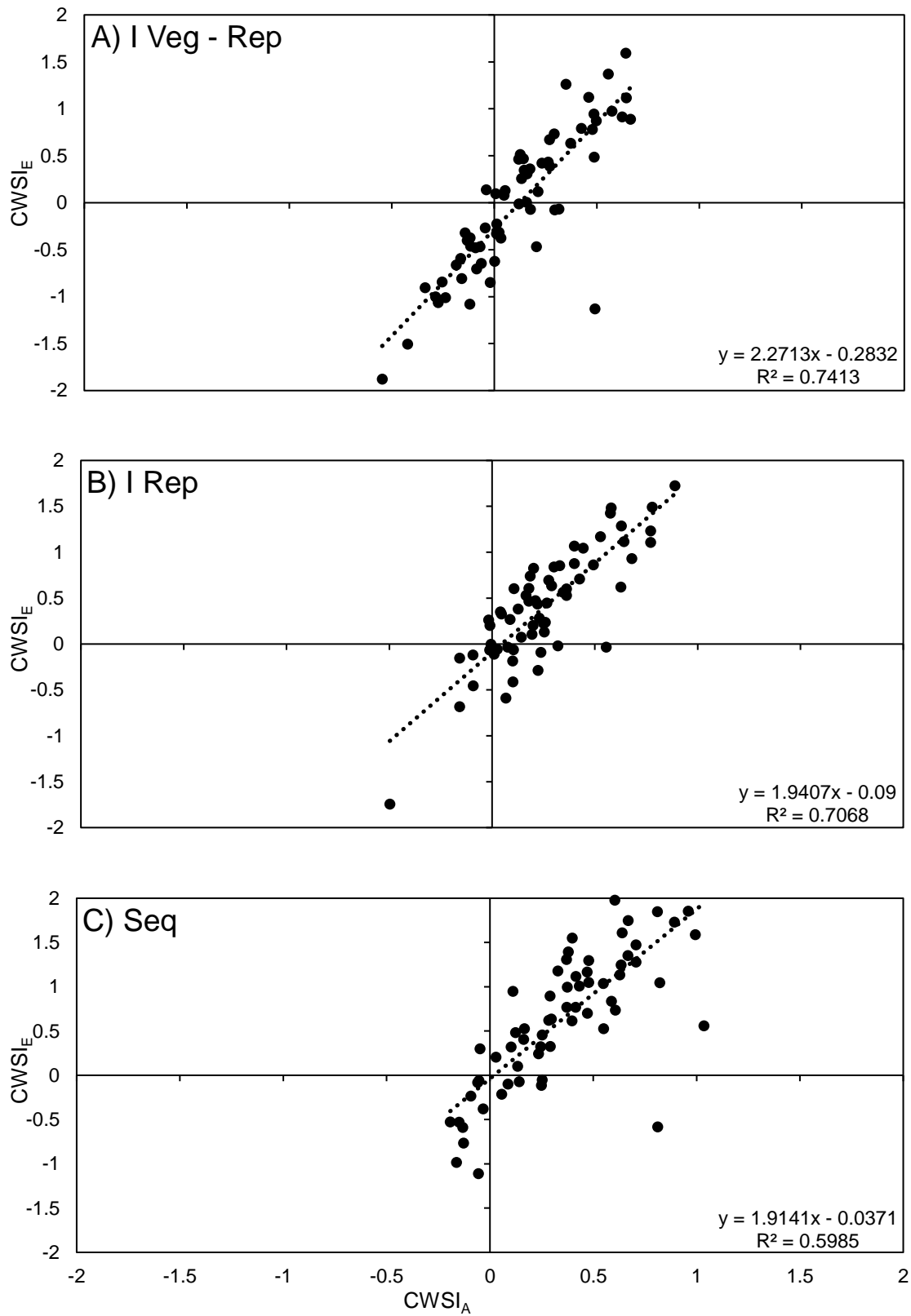
Fonte: Autor.

Na figura 5 (a, b e c) é apresentada a relação entre o CWSI analítico (teórico) e o CWSI empírico, para três tratamentos de manejo da irrigação, às 12 horas de cada dia. Os resultados podem ser considerados como bons, com um R^2 variando de 0,60 (sequeiro) a 0,74 (irrigado durante todo o ciclo), indicando que a maior parte da variação nos valores do CWSI podem ser explicados pelo modelo empírico. Os valores do CWSI variaram de -0,54 a 0,66 (Figura 5a), -0,49 a 0,90 (Figura 5 B) e -0,19 a 1,03 (Figura 5 C). Isso se deve ao manejo de irrigação, que foi diferente em cada um dos tratamentos, observando-se mais estresse no tratamento de sequeiro. Os autores Fernandes e Turco (2001) ressaltaram a eficiência do método analítico para detectar o estresse hídrico na cultura da soja, encontraram valores semelhantes aos encontrados neste

trabalho. No tratamento sem irrigação, os valores de CWSI foram de até 1,0, enquanto que, para os tratamentos irrigados, os valores máximos foram de 0,6.

Para o método empírico, os valores tiveram uma variação maior, sendo encontrados valores de CWSI de -1,87 a 1,59 (Figura 5A), -1,74 a 1,72 (Figura 5B) e -1,11 a 1,98 (Figura 5C) diferindo dos valores de CWSI encontrados por Taghvaeian et al. (2012) que obtiveram valores de -0,1 a 0,8 para a cultura do milho irrigado durante todo o ciclo de desenvolvimento. Para a cultura do trigo, Alghory e Yazar (2019) encontraram valores de CWSI de até 0,90. Silva et al. (2018) encontraram para a cultura do tomate um CWSI muito próximos a 1,0 no estresse máximo. Isso ocorreu em função das grandes temperaturas dos dosséis (Tc's), ocorridas em picos de radiação solar (Figura 7).

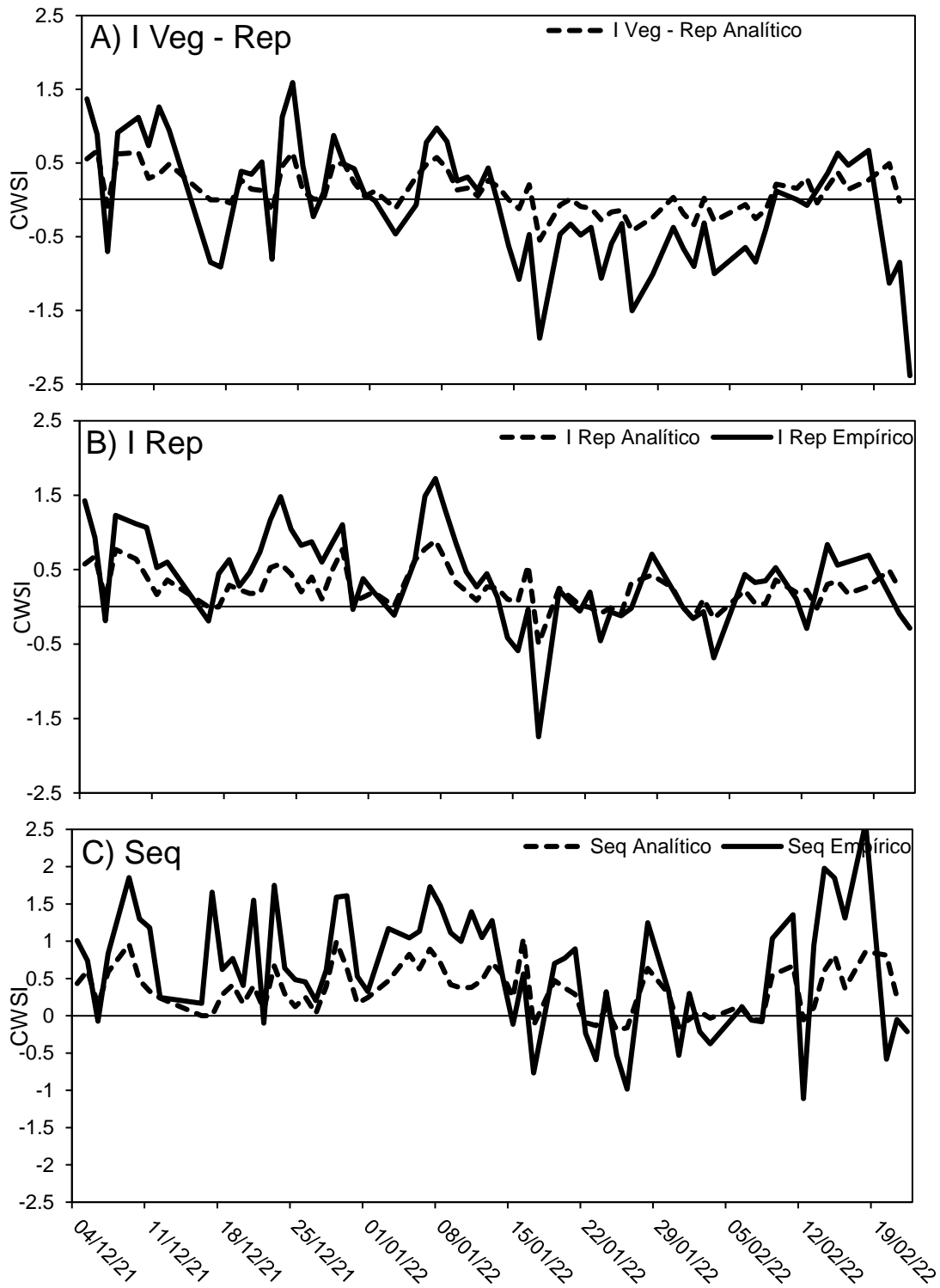
Figura 5. Relação entre o CWSI calculado através do método analítico e empírico para cada um dos manejos de irrigação. I Veg – Rep= Tratamento irrigado no estágio vegetativo e reprodutivo; I Rep= Tratamento irrigado no estágio reprodutivo; Seq= Tratamento sem irrigação.



Fonte: Autor.

Na figura 6 são apresentados os valores de CWSI para os dois métodos de estimativa e para os três manejos de irrigação. Os valores médios estimados pelo método empírico variaram mais que o valores estimados pelo método analítico. É notável que o CWSI-Empírico no I Rep e Seq foi superior aos valores estimados pelo método analítico, o que corrobora com os resultados de Silva et al. (2018), que encontraram valores maiores para o método empírico, quando comparados com o método analítico. Isso também acontece porque o método empírico não leva em consideração a radiação solar (R_s) e nem a velocidade do vento (u_2), então, quando estas variáveis são alteradas e influenciam na temperatura do dossel, o método empírico pode apresentar valores diferentes do método analítico (JACKSON et al., 1988).

Figura 6. Valores do CWSI calculado com os dois métodos, ao longo do período estudado, para as 12 h de cada dia. I Veg – Rep = Tratamento irrigado no estágio vegetativo e reprodutivo; I Rep = Tratamento irrigado no estágio reprodutivo; Seq = Tratamento sem irrigação.

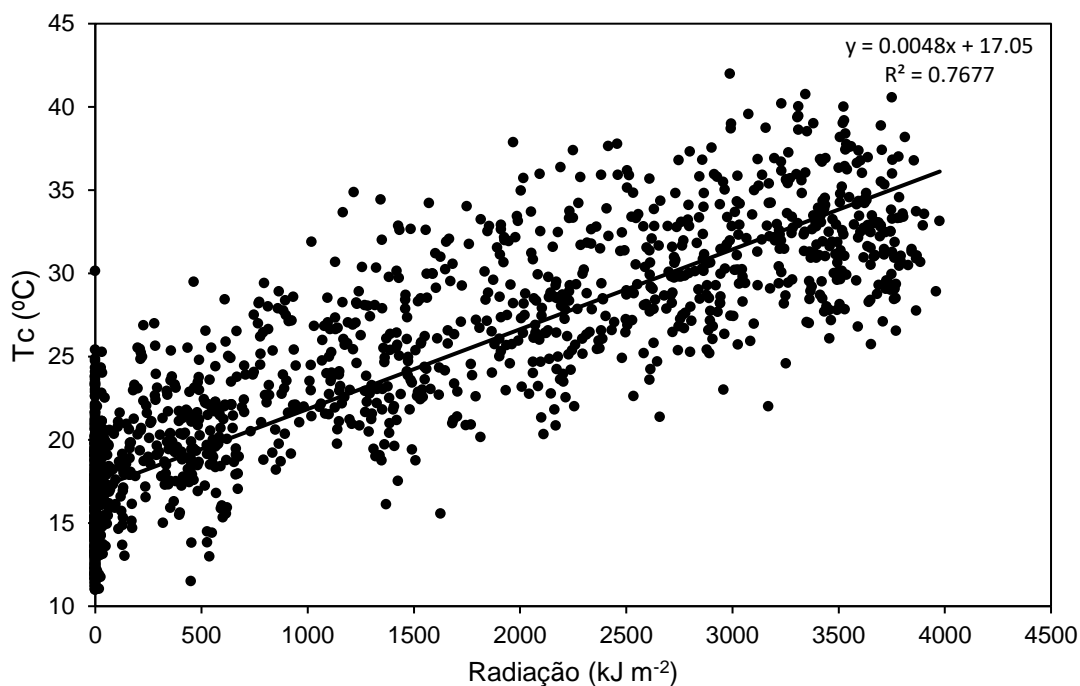


Fonte: Autor.

Na figura 7 é apresentada a correlação entre a temperatura do dossel e a radiação solar, esta apresentando um R^2 de 0,77. Muitos dados de radiação estão no zero do eixo devido a conter valores noturnos. A figura mostra que a

temperatura do dossel é maior nas horas de maior incidência de radiação solar, o que também foi encontrado por Gu et al., (2021), para a cultura do milho na China.

Figura 7. Análise de dependência horária entre a radiação solar global ($\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e temperatura do dossel ($^{\circ}\text{C}$).

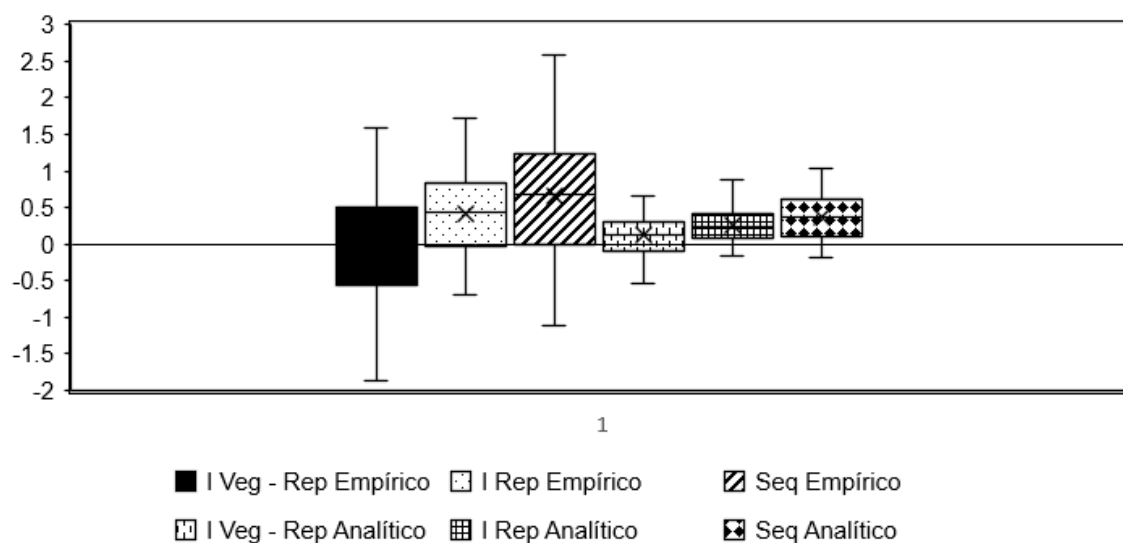


Fonte: Autor.

A variação encontrada nos valores de CWSI é apresentada na figura 8, onde se observa que o método empírico apresenta maior variabilidade quando comparado ao analítico. No tratamento irrigado durante todo o ciclo (I Veg – Rep), o valor do primeiro quartil é de -0,64 e do terceiro quartil de 0,48, quando se utilizou o método empírico enquanto que, para o mesmo manejo, quando o CWSI foi gerado pelo método analítico, os valores variaram de -0,9 a 0,30 para primeiro e terceiro quartil, respectivamente. No I Rep, para o método empírico, o valor do primeiro quartil foi de -0,04 e do terceiro quartil de 0,82, enquanto que, para o mesmo manejo usando método analítico, os valores variam de -0,7 a 0,40 para o primeiro e terceiro quartil, respectivamente. No Seq, os valores variaram

de -0,05 a 1,25 para o 1º e 3º quartil, respectivamente, para o método empírico, enquanto que, para o método analítico, esses valores variaram de 0,1 a 0,60, respectivamente, para o 1º e 3º quartil, respectivamente.

Figura 8. Valores de CWSI para os métodos de estimativa empírico e analítico, e três manejos de irrigação, durante o período de avaliação. I Veg – Rep = Tratamento irrigado no estágio vegetativo e reprodutivo; I Rep = Tratamento irrigado no estágio reprodutivo; Seq = Tratamento sem irrigação.



Fonte: Autor.

A utilização da termometria por infravermelho pode ser usada em grande escala, com imagens do sensoriamento remoto ou câmeras de infravermelho acoplados a veículos não tripulados (VANT's) ou sensores portáteis, pois estes abrangem áreas maiores e mais representativas. Portanto, estas abordagens trazidas neste trabalho podem ser empregadas no manejo da irrigação.

4.4 CONCLUSÃO

Os dois métodos, empírico e analítico de estimativa do CWSI apresentaram valores próximos e também uma boa correlação entre eles, indicando que ambos podem ser utilizados com boa precisão na estimativa do índice de estresse em plantas de soja.

A elevada correlação entre o CWSI empírico e analítico sugerem que esse

método (o empírico) pode ser utilizado, eliminando a necessidade de cálculo da resistência aerodinâmica e do dossel, que são procedimentos de cálculo que demandam tempo e dados de entrada.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, J.; ROGERS, D.; KISEKKA, I. Irrigation scheduling based on soil moisture sensors and evapotranspiration. **Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports**, 1(5):20, 2015.

ALGHORY A.; YAZAR A. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. **Irrigation Science**, v. 37, n.1, p. 61–77, 2019.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper, n. 56, FAO, Rome, 300 p., 1998.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANAPALLI, S.S.; FISCHER, D.K.; REDDY, K.N.; WAGLE, P.; GOWDA, P.H.; SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228–239, 2018.

ANDA, A.; SIMON, B.; SOÓS, G.; SILVA, J.A.T.; MENYHÁRT, L. Water stress modifies canopy light environment and qualitative and quantitative yield components in two soybean varieties. **Irrigation Science**, v. 39, p. 549–566, 2021.

AYYOUB, A.; ER-RAKI, S.; KHABBA, S.; MERLIN, O.; EZZAHAR, J.; RODRIGUEZ, J.C.; BAHLAOUI, A.; CHEHBOUNI, A. A simple and alternative approach based on reference evapotranspiration and leaf area index for estimating tree transpiration in semi-arid regions. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 61–68, 2017.

BALLESTER, C.; CASTEL, J.; JIMÉNEZ-BELLO, M.A.; CASTEL, J.R.; INTRIGLILOLO, D.S. Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees, **Agricultural Water Management**, v. 122, p.1–6, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, n. 1, 2019.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1612–1622, 2017.

BATTISTI R.; SENTELHAS P.C.; PASCOALINO J.A.L.; SAKO H.; DANTAS J.P.S.; MORAES M.F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159–168, 2018.

BELLVERT, J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; GIRONA, J.; FERERES, E. 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**, v. 15, p. 361–376, 2013.

BLONQUIST, J.M.; TANNER, B.D.; BUGBEE, B. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1709–1721, 2009.

BONETTI, L.P. Distribuição da soja no mundo: origem, história e distribuição. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. (Ed.). **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, p. 1–6, 1981.

CÂMARA G.S.; HEIFFIG L.S. **Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias primas para biodiesel**. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, p. 256, 2006.

CARVALHO, L.G.; RIOS, G.F.A.; MIRANDA, W.L.; NETO, P.C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

CHANASYK, D.D.; NAETH, M.A. Field measurement of soil moisture using neutron probes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 76, p. 317–323, 1996.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim da Safra de 34 Grãos. Brasília: Safra 2021/22: 12º Levantamento, 2022. 88p. (Boletim Técnico, 12).

DEJONGE, K.C.; TAGHVAEIAN, S.; TROUT, T.J.; COMAS, L.H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agricultural Water Management**, v. 156, p. 51–62, 2015.

DONG, Y.; KELLEY, L.; MILLER, S.A. **Efficient Irrigation Management With Center Pivot Systems**. Michigan: Michigan State University Extension, 9p., 2020.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Drainage and Irrigation paper, n. 24, 2 ed., FAO, Rome, Italy, 1979.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. In: FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Rome, Italy, p.144, 1977.

DO RIO, A. SENTELHAS, P.C.; FARIAS, J.R.B.; SIBALDELLI, R.N.R.; FERREIRA, R.C. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yield in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 3664–3672, 2016.

EGEA, G.; PADILLA-DÍAZ, C.M.; MARTINEZ-GUANter, J.; FERNÁNDEZ, J.E.; PÉREZ-RUIZ, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210–221, 2017.

EMBRAPA. Exigências climáticas. In: EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja - Paraná - 2003**. Londrina: Embrapa Soja, 2002. Cap.1, p.28–30. (Sistemas de Produção; 2).

EVETT, S.R.; STONE, K.C.; SCHWARTZ, R.C.; O'SHAUGHNESSY, S.A.; COLAIZZI, P.D.; ANDERSON, S.K.; ANDERSON, D.J. Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management. **Irrigation Science**, v. 37, p. 751–759 (2019).

FACCO, R.; NASCIMENTO, V.B.; WERLANG, M.K. Variabilidade de temperaturas médias mensais em santa maria/rs no período de 2004/2011. **Revista geonorte**, Edição Especial, v. 2, n.4, p.1103–1110, 2012.

FERNANDEZ, J.E.; CUEVAS, M.V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p.135–151, 2010.

FERNANDES, E.J.; TURCO, J.E.P. Utilização do CWSI na determinação de estresse hídrico em cultura de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 347–355, 2001.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J.; GALMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytologist**, v. 172, p.73–82, 2006.

FUCHS, W.R. **Física Moderna**. Polígono, São Paulo, 1972.

GARDNER, B.R.; NIELSEN, D.C.; SHOCK, C.C. Infrared thermometry and the crop water stress index. I. History, theory, and baselines. **Journal of Production Agriculture**, v. 5, p. 462–466, 1992.

GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. **Water**, v. 9, n. 6, p. 393, 2017.

GIMÉNEZ-GALLEGO, J.; GONZÁLEZ-TERUEL, J.D.; SOTO-VALLES, F.; JIMÉNEZ-BUENDÍA, M.; NAVARRO-HELLÍN, H.; TORRES-SÁNCHEZ, R. Intelligent thermal image-based sensor for affordable measurement of crop canopy temperature. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, 2021.

GOMIDE, R. L. Uso da termometria a infravermelho na fenotipagem para tolerância à seca de cereais e legumes. In: **simpósio sobre tolerância à deficiência hídrica em plantas: adaptando as culturas ao clima do futuro**, 2010, Goiânia. Trabalhos apresentados. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, p. 35–50, 2011.

GONCALVES, SL.; FARIAS, JRB.; SIBALDELLI, RNR.; NEUMAIER, N. Dinâmica espectral de áreas agrícolas e impactos causados pela geada de junho de 2021, por recortes de imagens do satélite Sentinel-2, na região de Londrina, PR, Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 52 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 444)

GU, S.; LIAO, Q.; GAO, S.; KANG, S.; DU, T.; DING, R. Crop Water Stress Index as a Proxy of Phenotyping Maize Performance under Combined Water and Salt Stress. **Remote Sensing**, v. 13, 4710, 2021.

GU, Z.; QI, Z.; BURGHATE, R.; YUAN, S.; JIAO, X.; XU, J. Irrigation Scheduling Approaches and Applications: A Review. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.146, p. 04020007, 2020.

HUNSAKER, D.J.; FRENCH, A.N.; WALLER, P.M.; BAUTISTA, E.; THORP, K.R.; BRONSON, K.F.; SANCHEZ, P.A. Comparison of traditional and ET-based irrigation scheduling of surface irrigated cotton in the arid southwestern USA. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 209–224, 2015.

IDSO, S.B. Non-water-stressed baselines: Ψ key to measuring and interpreting plant water stress. **Agricultural Meteorology**, v. 27, p. 59–70, 1982.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JR., 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.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. Remote-sensing of crop yields. **Science**, v. 196, p. 19–25, 1977.

IRMAK, S. Evapotranspiration Basics and Estimating Actual Crop Evapotranspiration from Reference Evapotranspiration and Crop-Specific Coefficients. Crops, **Irrigation Engineering**, 2017.

IRMAK, S.; PAYERO, J. O.; VANDEWALLE, B.; ZOUBEK, G.L.; REES, J.M. **Principles and operational characteristics of watermark granular matrix**

sensor to measure soil water status and its practical applications for irrigations management in various soil textures. University of Nebraska, Extension Publications. EC783., 2014.

IRрмак, S.; SHARMA, V. Large-scale and long-term trends and magnitudes in irrigated and rainfed maize and soybean water productivity: grain yield and evapotranspiration frequency, crop water use efficiency, and production functions. **Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)**, v. 58, n. 1, p. 103–120, 2015.

JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER, P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water resources research**, v. 17, p. 1133–1138, 1981.

JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J.; IDSO, S. B. Wheat Canopy Temperature: A Practical Tool for Evaluating Water Requirements. **Water resources research**, v. 13, n. 3, 1977.

JHA, P.K.; KUMAR, S.N.; INES, A.V.M. Responses of soybean to water stress and supplemental irrigation in upper Indo-Gangetic plain: Field experiment and modeling approach. **Field Crops Research**, v. 219, p. 76–86, 2018.

JONES, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls on plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, London, GB, v. 55, n. 407, p. 2427–2436, 2004.

JONES, H.G. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p.119–130, 2007.

JONES, H.G. **Plants and microclimate:** A quantitative approach to environmental plant physiology, Cambridge University Press, Cambridge. 3ed. 2014.

JONES, H.G. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 95, n. 3, p. 139–149, 1999.

JONES, H.G.; HUTCHINSON, P.A.; MAY, T.; JAMALI, H.; DEERY, D.M. A practical method using a network of fixed infrared sensors for estimating crop canopy conductance and evaporation rate, **Biosystems Engineering**, v. 165, 2018.

JONES, H.G.; SERRAJ, R.; LOVEYS, B. R.; XIONG, L.; WHEATON, A.; PRICE, A.H. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 11, p. 978–989, 2009.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 75, n. 3, p. 226–244, 2005.

KASSIE, B.T.; ASSENG, S.; ROTTER, R.P.; HENGSDIJK, H.; RUANE, A.C.; ITTERSUM, M.K.V. Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate changes scenarios and crop models. **Climatic Change**, v. 129, p. 145–158, 2015.

KIIHL, R.A.S.; ALMEIDA, L.A.L; DALL'AGNOL, A. **World Soybean Research Conference III**. Proceedings. Ames, IL, USA. p. 301–304, 1985.

KIIHL, R.A.S.; GARCIA, A. The use of the long-juvenile trait in breeding soybean cultivars. In: WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 4, p. 994–1000, 1989.

KULLBERG, E.G.; DEJONGE, K.C.; CHAVEZ, J.L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 64–73, 2017.

LICH, M.A.; WRIGHT, D.; LENSSEN, A.W. Soybean Response to Drought, Agriculture. Iowa State University Extension and Outreach, Ames, IA (USA), 2013.

MARTINS, J. D.; PETRY, M. T.; MOTOVANELLI, B. C.; FERRAZZA, C. M. Mapeamento da área irrigada por pivô central em nível de bacia hidrográfica no extremo sul do Brasil. **Irriga**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 281–296, 2021.

MARQUELLI, W. A.; MEDEIROS, M. A.; SOUZA, R. F.; RESENDE, F. V. Produção de tomateiro orgânico irrigado por aspersão e gotejamento, em cultivo solteiro e consorciado com coentro. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 429–434, 2011.

MEDRANO, H.; ESCALONA, J.M.; BOTA, J.; GULÍAS, J.; FLEXAS, J. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. **Annals of Botany**, Oxford, v. 89, n. 4, p. 895–905, 2002.

MICHELON, C.J., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z.B DE, KNIES, A.E., PETRY, M.T., MARTINS, J.D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.40, n.4, p.848-853, 2010.

MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 30–45, 2017.

NAVARRO HELLÍN, H., MARTÍNEZ DEL RINCON, J., DOMINGO-MIGUEL, R., SOTO VALLES, F., TORRES-SÁNCHEZ, R. A decision support system for

managing irrigation in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 124, p.121–131, 2016.

NENDEL, C.; KERSEBAUM, K.C.; MIRSCHEL, W.; WENKEL, K.O. Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model. **European Journal of Agronomy**, v. 52, p. 47–56, 2014.

O'SHAUGHNESSY, S.A.; EVETT, S.R.; COLAIZZI, P.D.; HOWELL, T.A. Grain sorghum response to irrigation scheduling with the time-temperature threshold method and deficit irrigation levels. **Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)**, v. 55, p. 451–46, 2012.

PAGLIARINI, R.F.; FERREIRA, L.C.; RODRIGUES, FA.; MOLINARI, H.B.C.; MARIN, S.R.R.; MOLINARI, M.D.C.; GOMES, M.J.M.; HENNING, L.M.M.; FARIAS, JRB; DE OLIVEIRA, M.C.N.; NEUMAIER, N.; KANAMORI, N.; FUJITA, Y.; MIZOI, J.; NAKASHIMA, K.; SHINOZAKI, K.Y.; NEPOMUCENO, A.L. Characterization of Soybean Genetically Modified for Drought Tolerance in Field Conditions. **Frontiers in Plant Science**, 2017.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G.J.; PETRY, M.T.; SEVERO, P.O.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L.S. Evapotranspiration Partition and Crop Coefficients of Tifton 85 Bermudagrass as Affected by the Frequency of Cuttings. Application of the FAO56 Dual Kc Model. **Water**, v.10, n.5, p.558–578, 2018.

PAYERO, J.O.; MELVIN, S.R.; IRMAK, S. Response of soybean to deficit irrigation in the semi-arid environment of West-Central Nebraska. **Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)**, v. 48, p. 2189–2203, 2005.

PRASHAR, A.; YILDIZ, J.; MCNICOL, J.W.; BRYAN, G.J.; JONES, HG. Infra-red thermography for high throughput field phenotyping in *Solanum tuberosum*. **PLoS ONE**, v. 8, e65816, 2013.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. **Agricultural Water Management**, v. 241, p.106197, 2020b.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; MELTON, F.; JOHNSON, L.; MOTA, M.; WANG, T. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization. **Agricultural Water Management**, v.252, p.106663, 2021a.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106196, 2021b.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4–20, 2015.

PEREIRA, L. S.; ALVES, I. Estimativa de evapotranspiração e da transpiração das culturas em ambiente salino. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura**: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza - CE, 2016.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; JOVANOVIĆ, N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. **Agricultural Water Management**, 2020a.

PETRY, M.T.; BASSO, L.J.; CARLESSO, R.; ARMOA, M.S.; HENKES, J.R. Modeling yield, soil water balance, and economic return of soybean under different water deficit levels. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 526–535, 2020.

PETRY, M.T.; CARLESSO, R.; MARTINS, J.D. Manejo da irrigação no Brasil: aplicações, desafios e tendências para o futuro. *In*: Alysson Paolinello; Durval Dourado Neto; Everardo Chartuni Mantovani. (Org.). **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil**: Técnica e Cultura. 1ed. Piracicaba: ESALQ-USP, v. 2, p. 215–233, 2021.

PINEDA, M.; BARÓN, M.; PÉREZ-BUENO, M.L. Thermal Imaging for Plant Stress Detection and Phenotyping. **Remote Sensing**, v.13, n.1, p. 68, 2021

PIRES, D.P.L.; AFONSO, J.C.; CHAVES, F.A.B. A termometria nos séculos XIX e XX. **Revista Brasileira de Ensino em Física**, v. 28, n.1, p. 101 – 114, 2006.

POÇAS, I.; RODRIGUES, A.; GONÇALVES, S.; COSTA, P.M.; GONÇALVES, I.; PEREIRA, L.S.; CUNHA, M. Predicting Grapevine Water Status Based on Hyperspectral Reflectance Vegetation Indices. **Remote Sensing**, v. 7, p.16460–16479, 2015.

RINZA, J., RAMÍREZ, DA, GARCÍA, J.; MENDIBURU, F.; WENDY, Y.; BARREDA, C.; VELÁSQUEZ, T.; MEJÍA, A.; QUIROZ, R. Infrared Radiometry as a Tool for Early Water Deficit Detection: Insights into Its Use for Establishing Irrigation Calendars for Potatoes Under Humid Conditions. **Potato Research**, v. 62, p. 109–122, 2019.

REIS, E.M.; ZANATTA, M.; REIS, A.C. Desempenho do protioconazol isolado ou adicionado ao mancozebe no controle da ferrugem asiática da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 46, n. 4, p. 345–347, 2020.

RU, C.; HU, X.; WANG, W.; RAN, H.; SONG, T.; GUO, Y. Evaluation of the crop water stress index as an indicator for the diagnosis of grapevine water deficiency in greenhouses. **Horticulturae**, v. 6, P. 864, 2020.

SALVADORI, J.R.; BACALTCHUK, B.; DEUNER, C.C.; JÚNIOR, G.L.C.L.; RIZZARDI, M. A.; LANGARO, N.C.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; BOLLER, W. Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa

Catarina, safras 2016/2017 e 2017/2018 - Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, n. 41, Passo Fundo, RS. Ed. Universidade de Passo Fundo, 2016.

SANMARTIN, J.P.; ACEVEDO, E. **Temperatura de canopia, CWSI e rendimento en genotipos de trigo**. Laboratorio de Relación Suelo-Água-Planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 58 p., 2001.

SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J.R.B.; HAMPF, A.C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solution. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

SILVA, B.B.; RAO, T.V.R.; AZEVEDO, P.V.; SOUZA, C.B.S. Quantificação de estresse hídrico em algodão herbáceo com termometria infravermelha. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 45–51, 1995.

SILVA, J. C.; SILVA, C.A.; FREITAS, C.A.; GOLYNSKI, A.; SILVA, L.F.M.; FRIZZONE, J. Tomato water stress index as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**. v. 22, n. 2, 2018.

STETSON, L.E.; MECHAM, B.Q. **Irrigation**. 6 ed. Falls Church, VA. Irrigation Association, 2011.

SUI, R.; VORIES, E.D. Comparison of Sensor-Based and Weather-Based Irrigation Scheduling. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 36, n.3, p. 375–386, 2020.

SU, S.L.; SINGH, D.N.; BAGHINI. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92–105, 2014.

TAGHVAEIAN, S.; CHÁVEZ, J.L.; HANSEN N.C. Infrared Thermometry to Estimate Crop Water Stress Index and Water Use of Irrigated Maize in Northeastern Colorado. **Remote Sensing**, 2012.

TAGLIAPIETRA, E. L. et. al. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 932–938, 2018.

VENANCIO, L.P.; CUNHA, F.F.; MANTOVANI, E.C.; AMARAL, C.H. Evapotranspiração de cultura: uma abordagem dos principais métodos aplicados às pesquisas científicas e na agricultura. **Irriga**, v. 24, n. 3, p. 719–746, 2019.

VIVAN, G.A.; PEITER, M.X.; ROBAINA, A.D.; BARBOZA, F.S.; BUSKE, T. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 282–292, 2013.

VORIES, E.; SUDDUTH, K. Determining sensor-based field capacity for irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 250, 106860, 2021.

WALTER, G. **Water Content**; American Society of Agronomy-Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 1986.

WIJewardana, C.; Reddy, R.; Shankle, M.W.; Meyers, S. Low and high-temperature effects on sweet potato storage root initiation and early transplant establishment. **Scientia Horticulturae**, v. 240, p. 38–48, 2018.